

褚颖佳,高帆,张永婧,等.一次由线状风暴和阵风锋引发的致灾大风成因[J].海洋气象学报,2023,43(2):53-63.
CHU Yingjia, GAO Fan, ZHANG Yongjing, et al. Causes of a damaging gale event triggered by linear convective storms and gust fronts[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2): 53-63. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.005. (in Chinese)

一次由线状风暴和阵风锋引发的致灾大风成因

褚颖佳^{1,2},高帆^{1,2},张永婧^{1,2},郑丽娜^{1,2},胡鹏^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.济南市气象局,山东 济南 250102)

摘要: 2018年6月13日,多条线状风暴和阵风锋造成山东多地出现致灾大风,基于常规、加密气象观测资料、卫星云图和多普勒天气雷达资料,对此次大风成因进行了分析。结果表明:(1)冷涡后部横槽转竖引导冷空气叠加在低层暖脊之上,850 hPa与500 hPa温差高达34.7℃,同时925~600 hPa的干层与地面至925 hPa的近饱和层相叠置,上下层大气之间温、湿差异显著,形成强热力不稳定,持续并增强的低层逆温层使不稳定能量得到积累,显著干层和低层强温度垂直递减率为夹卷和蒸发冷却过程提供了有利条件。(2)线状风暴各生命期强阵风是由内嵌其中的普通单体或超级单体下击暴流所引发。单体间下沉气流合并使地面大风的影响范围和强度有所增大。强阵风均伴随较强降雨和降雹,雨滴和冰雹的拖曳是产生下击暴流的重要原因,极大风速与5 min降水量具有正向相关性,青岛34.8 m·s⁻¹的极端大风出现时5 min降水量达19 mm。(3)山东东南部的初生对流在地面辐合线、海风锋、对流云街上被接连触发,遇阵风锋后生命史延长,得以并入到主风暴,使风暴发展壮大,而风暴中的下沉气流又驱动多股阵风锋加速向南推进,增强地面风速,阵风锋与风暴主体之间存在相互促进机制。在对流潜势较高的条件下,需关注边界层辐合线对对流的触发作用。

关键词: 线状对流风暴;阵风锋;超级单体;下击暴流;致灾性大风

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)02-0053-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.005

Causes of a damaging gale event triggered by linear convective storms and gust fronts

CHU Yingjia^{1,2}, GAO Fan^{1,2}, ZHANG Yongjing^{1,2}, ZHENG Lina^{1,2}, HU Peng^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China)

Abstract: Several linear convective storms and gust fronts triggered a damaging gale event in multiple places in Shandong on 13 June 2018. Based on conventional and intensive meteorological observation data, satellite cloud imageries, and Doppler radar data, the causes of the gale event are analyzed. The results are as follows. (1) The horizontal trough behind the cold vortex turns to longitudinal style and guides cold air to superimpose on the warm ridge in the lower atmosphere. The temperature difference

收稿日期:2022-11-08;修回日期:2023-01-31

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021MD010,ZR2022MD088);山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QD028);山东省气象局预报员专项(SDYBY2017-05,SDYBY2019-05,SDYBY2020-04);山东省气象局科研项目(2022sdqxm07)

第一作者简介:褚颖佳,女,硕士,工程师,主要从事强对流天气发生机理研究,oucejy2009@163.com。

通信作者简介:高帆,男,高级工程师,主要从事强对流天气预报,gaofan8510@sina.com。

between 850 hPa and 500 hPa is as high as 34.7 °C. At the same time, the dry layer of 925–600 hPa superimposes on the nearly saturated layer from the surface to 925 hPa, resulting in a significant difference in temperature and humidity between the upper and lower atmospheres, as well as strong thermal instability. The continuous and intensified inversion layer in the lower layer helps accumulate unstable energy. The significant dry layer and the high vertical temperature lapse rate of the lower atmosphere provide favorable conditions for the entrainment and evaporative cooling process in the storm. (2) The gales in each life stage of the linear storm are caused by the downbursts in the embedded ordinary cells or supercells. The combination of downdrafts between cells increases the influence range and intensity of the surface gales. Strong gales in each life stage are accompanied by heavy precipitation and hails. The dragging of raindrops and hails is an important reason for downbursts. The maximum wind speed is positively correlated with the 5-minute precipitation, and the 5-minute precipitation reaches up to 19 mm when the extreme gust of 34.8 m·s⁻¹ appears at Qingdao station. (3) The primary convective cells in the southeast of Shandong are triggered successively at the surface convergence line, sea breeze front, and convective cloud street. After encountering the gust fronts, the primary convective cells are prolonged and are incorporated into the main storms, which accordingly grow stronger. The downdrafts in the storms, in turn, drive gust fronts to accelerate southward, increasing the surface wind speed. There is a mutual promotion mechanism between the gust fronts and main storms. Attention should be paid to the convection triggering action of boundary layer convergence line under high convective potential conditions.

Keywords: linear convective storm; gust front; supercell; downburst; damaging gale event

引言

山东是大范围雷暴大风事件(Derechos)发生的最高频地区之一^[1],雷暴大风所致的灾害事故给人民生命财产和经济社会造成了巨大的损失。由于引发雷暴大风的中小尺度对流系统具有局地性和突发性特点,因此雷暴大风的监测和预报、预警工作一直以来都面临极大的挑战。

产生雷暴大风的方式主要有4种:风暴中下沉气流辐散、阵风锋、高空风动量下传、风暴上升气流区的抽吸作用^[2]。当风暴内下沉气流强烈,到达地面后产生8级或以上强风时,该下沉气流底部及其导致的强辐散风被称为下击暴流,这是最常见的致灾大风发生机制^[3-4]。下击暴流往往是由降水物(冰雹和雨滴)的拖曳作用所直接发动,中层干空气的卷入、雨滴蒸发、冰雹和雪花的融化等因素可对其起到增强作用^[5-7]。下沉气流在地面形成的冷池与周围暖湿气流的界面称为阵风锋^[2],冷池阵风锋在灾害性大风的产生中也具有重要作用^[8];快速移动且持续的阵风锋可造成10级以上雷暴大风^[9],冷池的水平尺度和强度也会直接影响地面灾害性大风的强度^[10-11]。同时,阵风锋也是一种重要的对流触发机制^[12],有时还会影响对流系统的强度变化^[13-16]。在实际个例中,下击暴流和冷池阵风锋产生的大风

往往难以截然分开^[2]。

引发雷暴大风的对流系统组织类型包括超级单体风暴、强脉冲风暴、多单体风暴簇和飏线^[1-2,17],侯淑梅等^[18]通过普查发现,线状中尺度对流系统与多单体风暴合并的多数个例会产生雷暴大风灾害。弓形回波是出现雷暴大风典型的回波形态^[19]。王秀明等^[10]对一次由超级单体和飏线所致的区域性雷暴大风成因进行分析,指出下沉气流辐散和合并、强冷池密度流、降水蒸发是引发极端雷暴大风的重要原因。杨晓亮等^[20]在一次秋季飏线过程的分析中指出,由雷暴高压驱动的冷池密度流增强了地面风速,大风主要出现在辐合线到正变压中心之间的区域。王艳春等^[21]、王珏等^[22]、夏文梅等^[23]、梅婵娟等^[24]、吴福浪等^[25]也分别对出现在超级单体、脉冲风暴、飏线等风暴中的大风事件进行了细致的分析。

2018年6月13日,山东受多条线状风暴及其前侧阵风锋影响出现了区域性大风灾害。线状风暴内产生的强风风速极端,致灾性强,在当日预报中阵风风力被低估,山东东南部的临沂、日照等地的对流和大风在当日预报中出现漏报,因此分析此次雷暴大风的成因将有助于增进对类似天气的认识和积累预报经验。本文将重点分析此次区域性致灾大风的天气系统、环境条件以及线状风暴和阵风锋引发大风的过程,以期对山东地区雷暴大风预报和预警提

供一定的参考。

1 资料

所用资料包括:2018年6月13日山东省内滨州(118.0°E,37.4°N,海拔104.2 m)、潍坊(118.9°E、36.7°N,海拔269.0 m)、青岛(120.2°E、36.0°N,海拔173.8 m)、临沂(118.4°E、35.3°N,海拔301.7 m)4部多普勒天气雷达资料,高空和地面常规气象观测资料,山东省区域自动气象站逐5 min加密地面气象观测资料,以及FY-4G可见光云图资料。

文中附图涉及的行政边界是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的标准地图制作的,所有底图均无修改。图1审图号为GS(2017)3320号,其他涉及行政边界的图片审图号为GS(2019)3082号。

2 天气实况及灾情

2018年6月13日11:00—20:00(北京时间,下同),多条线状风暴自西向东影响山东,山东境内出现大范围的雷暴大风(图1),并伴有短时强降雨和冰雹。此次天气过程共有318站次出现8级及以上阵风,涉及14个地市。其中鲁西南、鲁中至青岛地区直接受线状风暴影响,风速极端,致灾性强,最大阵风风速为 $42.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (14级),出现在胶州营海,17:08青岛国家级地面气象观测站出现 $34.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)阵风,成为该站1966年以来6月的最大阵风。而山东东南部的临沂、日照等地受风暴前侧阵风锋影响,多站监测到8~9级阵风,风力弱于线状风暴区,但大风出现时本地未发生降水或仅有微弱降水,此种情况下产生的大风在短时临近预警中较容易被忽视。

此次区域性雷暴大风事件使山东省受灾极其严重。强风发生时正值省内小麦收获期和阳信鸭梨等重要经济作物的生长期,大风造成大面积农作物倒伏减产、树木折断。据统计,农作物受灾面积共 $16\,702 \text{ hm}^2$,直接经济损失达3.4亿元。受灾总人口91 653人,其中青岛胶州湾海域一艘载有6人的渔船发生倾覆,2名船员确认遇难,4名船员失踪。此外,青岛地区的极端强风伴随强降雨影响时正值晚高峰,树木被连根拔起,路灯杆、广告牌等设施被刮倒,建筑物被吹塌,部分区域电力一度中断,致使城区交通严重瘫痪。

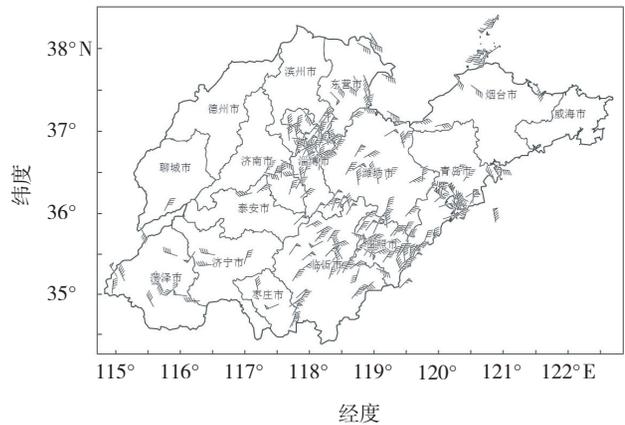


图1 2018年6月13日11:00—20:00山东省8级(含)以上大风(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布

Fig.1 Distribution of gales (wind barb, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) exceeding the Beaufort scale 8 (inclusive) in Shandong Province from 11:00 to 20:00 BST 13 June 2018

3 环流形势和环境条件

此次雷暴大风过程发生在东北冷涡背景下。6月13日08:00(图2a),500 hPa冷涡中心位于河北北部(117.0°E,42.0°N),且有 $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷中心与之相配合;冷涡后部横槽呈东北—西南走向,伸至河套地区,横槽及槽后西北气流强劲,大气干冷(太原站气温为 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$,温度露点差为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$,风速为 $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。08:00—20:00,横槽转竖,干冷空气东侵至山东上空,叠加在850 hPa $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 暖温度脊之上,使位势不稳定层结增强。地面上有气旋发展,暖锋位于山东中北部,呈东西走向,暖锋北侧形成温度露点差 $t-t_d \leq 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的湿区,显示山东中北部及半岛地区近地面大气处于高湿的状态。

青岛探空资料显示,6月12日08:00—13日08:00,低层一直有逆温层存在,并逐渐增强、增厚(图略),13日08:00逆温层顶接近925 hPa(图2b),逆温强度达 $8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,持续并增强的逆温层非常有利于不稳定能量的积累。利用13:00青岛站地面气温($26 \text{ }^\circ\text{C}$)和露点温度($20 \text{ }^\circ\text{C}$)对对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)进行订正后,其数值从 $1\,008 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增强到 $2\,300 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见,在判断对流能量条件时需关注低层逆温层存在与否及其强度大小。850 hPa与500 hPa温差高达 $34.7 \text{ }^\circ\text{C}$,高于盛杰等^[26]统计的华北雷暴大风型线状对流发生时该值的最大值(约 $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$);相对湿度的

垂直廓线(图 2c)显示,925~600 hPa 的干层(相对湿度 $H_R \leq 50\%$)与地面至 925 hPa 的近饱和层($H_R \geq 80\%$)相叠置,表明上下层环境大气在温度和湿度上均存在显著的差异,热力不稳定条件强。此外,干层位于 0°C 层高度及以下,有利于环境干空气夹卷进入风暴,增强冰雹融化后水膜的蒸发作用;地面至 0°C 层温度直减率为 $7.40^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,较高的温度直减率可

使雨滴在下降过程中保持与环境大气之间较大的温差,维持气块的负浮力^[27],对下沉气流有增强作用。

3 km 和 6 km 以下垂直风切变分别达到 $16.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $19.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,均高于费海燕等^[28]统计的华东 10 级以上雷暴大风天气对应参数的 75%分位数($14.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $19.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),为组织化风暴的形成提供了动力不稳定条件。

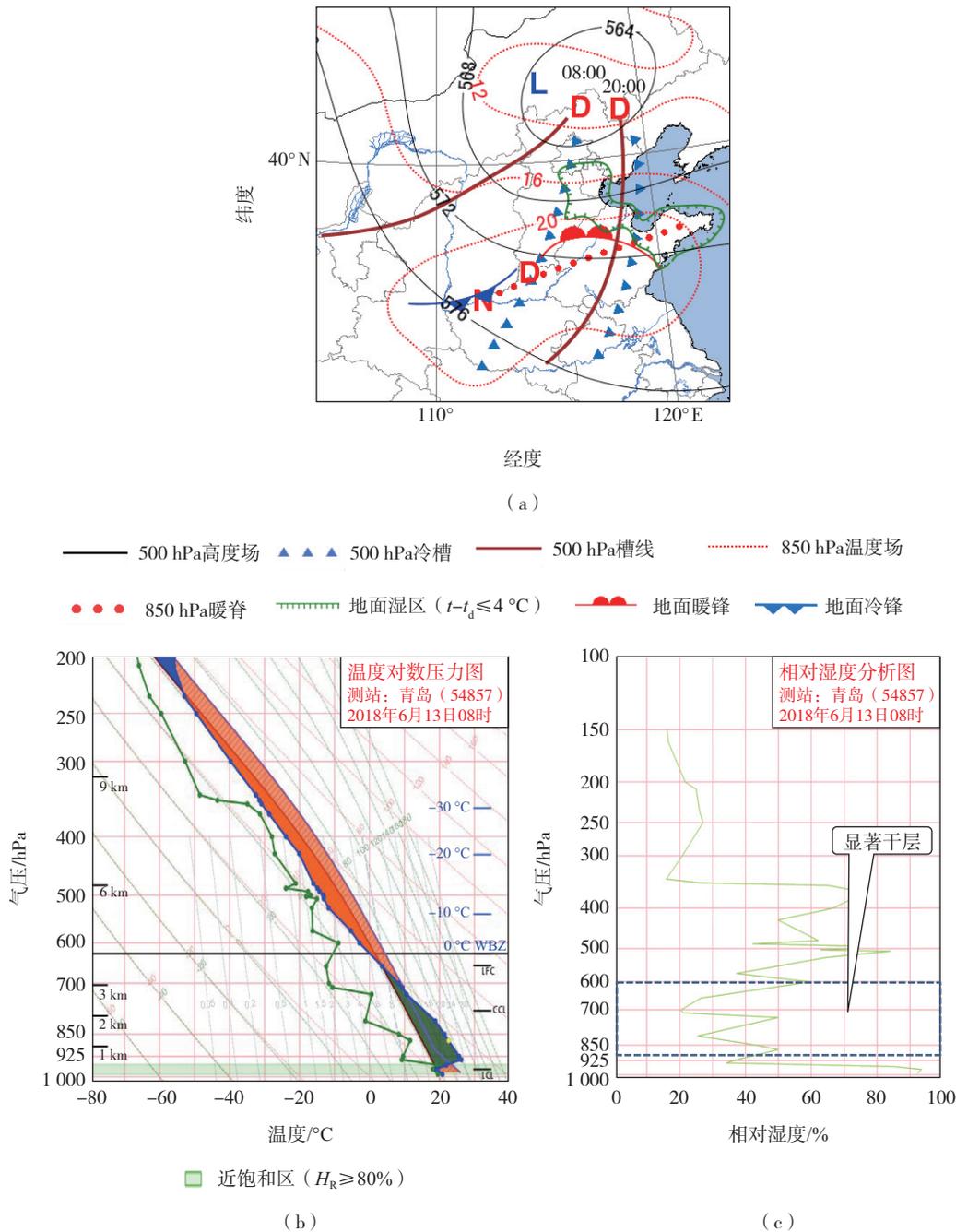


图 2 2018 年 6 月 13 日 08:00 500 hPa 高度场(单位: dagpm) 和 850 hPa 温度场(单位: $^\circ\text{C}$) (a) 以及青岛探空站 t - $\ln p$ 图(b) 和相对湿度垂直廓线(c) of Qingdao sounding station at 08:00 BST 13 June 2018

天气形势和环境条件共同表明,山东地区具备线状风暴发生的水汽、能量和热力、动力不稳定条件,雷暴大风的发生潜势显著。

4 线状风暴的发展演变引发不同强度持续大风

此次雷暴大风影响山东的主要时间为 2018 年 6 月 13 日 11:00—20:00,长达 9 h,其间线状风暴经历了不同的生命阶段。按照风暴发展和演变的不同特点,分为 3 个阶段:I 为发展阶段(11:00—13:20),对流初步发展并分化为多条线状风暴;II 为组织化阶段(13:21—15:00),多条线状风暴结构逐

渐紧实,组织化程度增强;III 为增强阶段(15:01—20:00),线状风暴间出现合并,风暴强度发展至强盛。

4.1 发展阶段

6 月 13 日 11:27 在东营垦利至聊城临清一带初步发展成一条中等强度的线状回波 L2,长度近 300 km,结构较为松散(图 3a)。随后在 L2 的南、北部各有一个单体向右后方传播,并分别发展成新的线状回波,13:20 左右,两条新生线状回波逐渐与 L2 分离,在山东境内初步形成了 3 条线状回波 L1、L2、L3(图 3b)。在此阶段仅 9 站次出现雷暴大风,最大阵风风速为 $19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8 级),出现在寿光羊口。

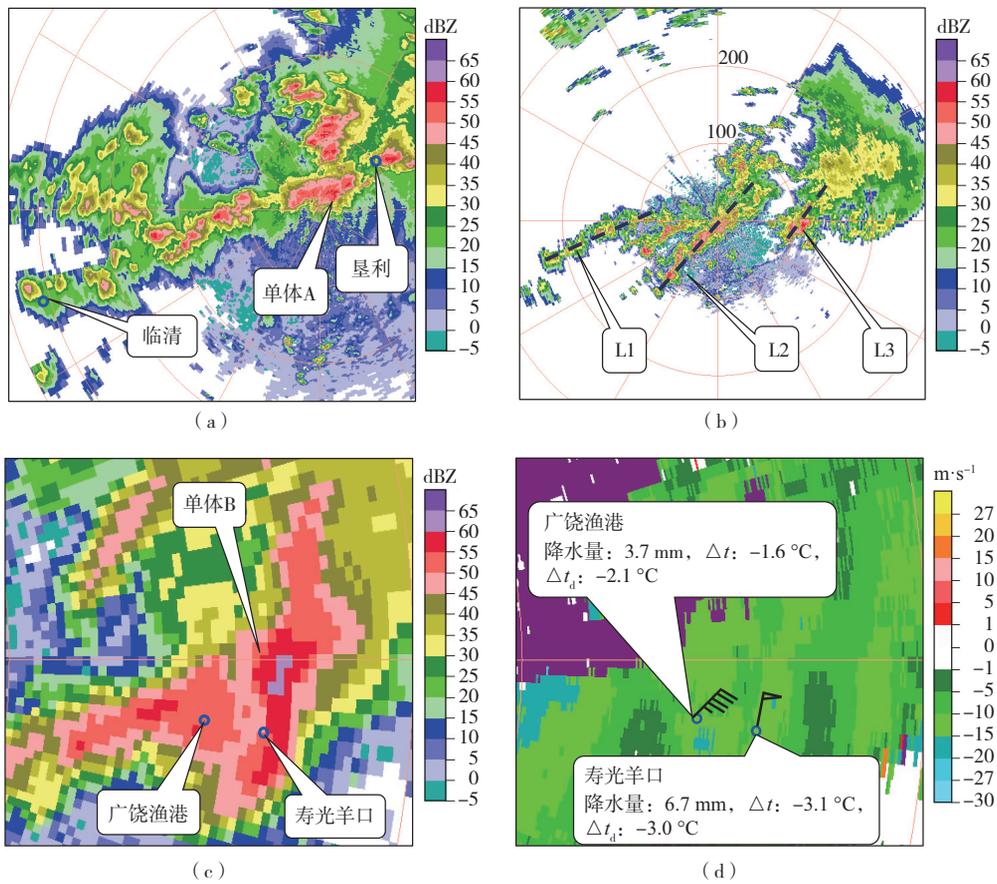


图 3 2018 年 6 月 13 日滨州雷达站 11:27 组合反射率(a,色阶)、13:20 0.5°仰角反射率因子(b,色阶)、12:44 0.5°仰角反射率因子(c,色阶)和径向速度(d,色阶)

Fig.3 Composite reflectivity (a, color scale) at 11:27 BST, reflectivity at 0.5° elevation (b, color scale) at 13:20 BST, reflectivity (c, color scale) and radial velocity (d, color scale) at 0.5° elevation at 12:44 BST 13 June 2018 from Binzhou radar station

滨州站雷达资料显示,11:45 L2 中较强的单体 A 发展成熟并产生阵风锋,阵风锋在东营附近触发出新的对流单体 B(图略)。单体 B 迅速发展并向东北方向移动,最强反射率因子达 60 dBZ 以上(图

3c),12:20—12:44,其质心高度由 7 km 快速下降至 3 km;12:44 在 0.5°仰角径向速度图上可见 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的负速度(图 3d)。与此同时,寿光羊口、广饶渔港自动气象站监测到 $17.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $19.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的阵风,

实际风向与雷达径向有一定夹角,所以雷达径向速度略弱于实际风速。大风出现时还伴有较强降水和降雹,寿光羊口 5 min 降水量为 6.7 mm,雨滴和冰雹的拖曳作用引发下击暴流造成上述两站出现大风。地面气温、露点温度在 5 min 内出现明显下降(图 3d),结合环境条件可知中低层大气较为干燥,由此可推断除降水物的拖曳作用外,干冷的环境空气卷入风暴加剧了蒸发作用,使地面风速增强。

4.2 组织化阶段

13:20 之后,3 条线状风暴空间尺度增大,回波强度增强,组织化程度也明显增强,结构更加紧实,14:59 分别位于济南、淄博、潍坊附近(图 4a)。

此阶段的最大阵风风速为 $30.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11 级),由 L2 上超级单体 C 造成。13:26,超级单体 C 低层反射率因子呈钩状(图 4b),最大反射率因子达

65 dBZ,且 60 dBZ 以上强回波高悬于低层弱回波区之上,高于当日 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度(6.8 km),有利于直径 2 cm 以上大冰雹的形成,从而产生更强的拖曳作用。后侧回波墙内 60 dBZ 以上的强回波已接地(图 4c),表明超级单体内的强降雨和大冰雹已降落至地面,邹平九户 5 min 降水量为 11.8 mm。强降雨和降雹引发的下击暴流在地面产生强烈辐散,近地面处雷达径向速度达 $23.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 4d),相应地,13:25、13:26、13:28 分别在邹平九户、邹平孙镇、高青黑里寨监测到 $30.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $18.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风,风向呈辐散状。由地面加密气象要素可知,上述 3 站强风出现的 5 min 内,气温出现了不同程度的下降(图 4b)。由雷达径向速度剖面图可以看出,超级单体 C 前侧上升气流与后侧下沉气流相互分离,此种气流结构有利于中气旋和风暴的维持。

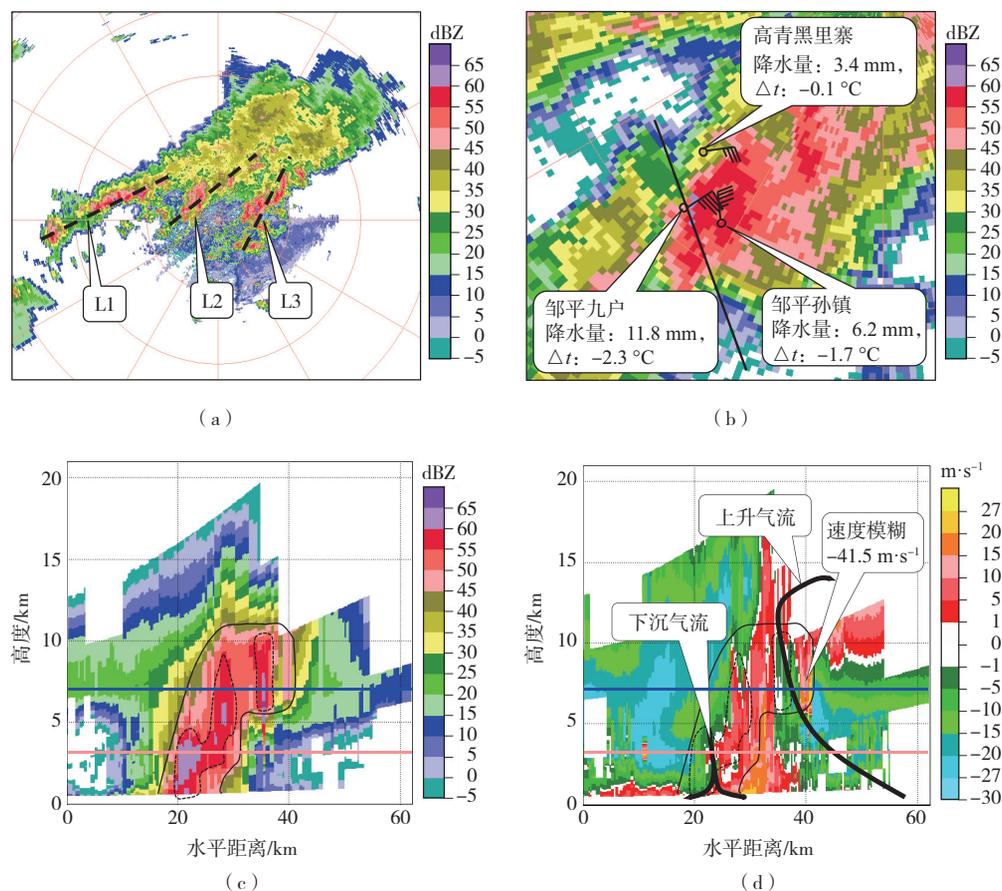


图 4 2018 年 6 月 13 日 14:59 潍坊雷达站 0.5° 仰角反射率因子(a, 色阶)以及 13:26 滨州雷达站 2.4° 仰角反射率因子(b, 色阶)、同时刻反射率因子剖面(c, 色阶)和径向速度剖面(d, 色阶)
(粉色和蓝色直线分别是湿球 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层和 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度)

Fig.4 Reflectivity at 0.5° elevation (a, color scale) at 14:59 BST from Weifang radar station, and reflectivity at 2.4° elevation (b, color scale), profile of reflectivity (c, color scale), profile of radial velocity (d, color scale) at 13:26 BST 13 June 2018 from Binzhou radar station (the pink and blue lines are the heights of wet bulb $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ layer and $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ layer, respectively)

L2 内嵌有多个单体,其中有些发展为超级单体,这些单体内的下沉气流辐散形成的冷池发生合并,在其前沿温度梯度大值区形成一致的出流(图略),在济南东部至淄博北部造成了非常集中的地面大风。

4.3 增强阶段

15:00—17:00,在 L3 右侧的潍坊南部、日照、临沂等地不断有新生单体生成并入 L3(图 5a),L3 强度增强,平均移速为 $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,而 L2 强度减弱,移速为 $61 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,17 时许二者逐渐合并(图 5b)。L2 和右侧新生单体的并入使 L3 强度增强,水平尺度快速增大,17:00 发展为长达 300 km 的飚线(图 5b),强中心位于青岛附近。

此阶段持续时间最长,产生的地面大风范围最广,强度最强。大风影响了山东中、东部多个地市,

有 6 站次阵风风力达 12 级及以上,最大阵风风速为 $42.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (14 级),出现在胶州营海,青岛国家级地面气象观测站最大阵风风速达 $34.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12 级)。

根据青岛站雷达资料,16:02—16:25,L3 上的超级单体 S 途经胶州地区,在此期间超级单体内的中气旋底高从 5.0 km 降至 2.7 km。16:25 超级单体 S 的下沉气流在 0.5° 仰角径向速度图上形成 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心 I,普通单体 D 的下沉气流形成的径向速度大值中心 II 与之相邻,最大径向速度为 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5c),16:37 上述两个下沉气流区发生合并(图 5d),径向速度增强至 $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,强风使风暴形态向前凸起,发展为弓形(图略),16:38 位于弓形回波顶端的胶州营海站监测到 $42.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的阵风。

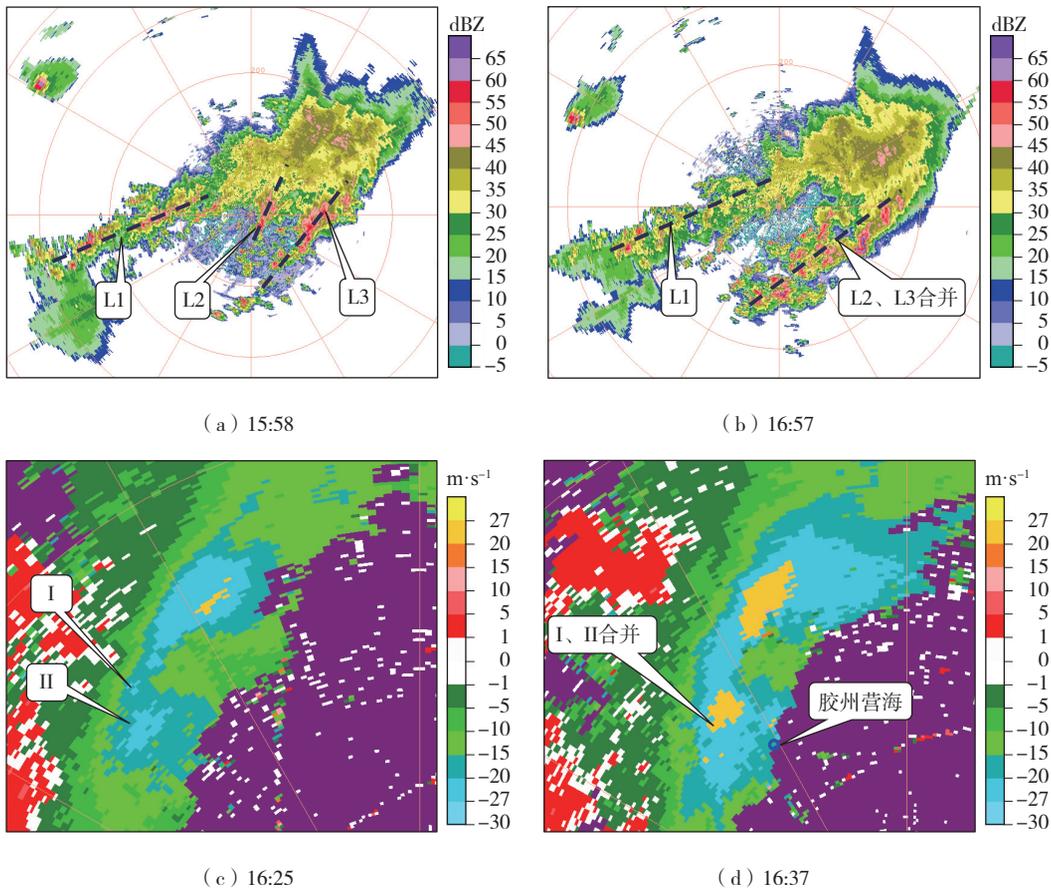


图 5 2018 年 6 月 13 日潍坊雷达站 0.5° 仰角反射率因子(a,b,色阶)以及青岛雷达站 0.5° 仰角径向速度(c,d,色阶)
 Fig.5 Reflectivity at 0.5° elevation (a/b, color scale) from Weifang radar station and radial velocity at 0.5° elevation (c/d, color scale) from Qingdao radar station on 13 June 2018

16:48—17:00,中气旋结构难以识别,单体 S 的底高、顶高、质心高度都有所升高;17:00 之后单体 S 前侧入流明显增强,李沧十梅庵和青岛第一海水浴场

分别监测到 18.5 、 $19.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (均为 8 级)的东南向和西南向入流大风。暖湿入流的增强使中气旋再度形成,也使超级单体 S 产生了更强的降水和与之相伴随

的强下击暴流。17:05—17:10,青岛站降水量为19 mm,露点温度下降2℃,气温下降3.1℃,并伴有小冰雹,17:08产生 $34.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)的阵风。17:05—17:17,仅两个体扫内,中气旋底高从2.0 km降至0.3 km,包括青岛站在内的4个站监测到12级以上大风,最大阵风达 $39.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略)。

5 山东东南部地区对流的发展及大风成因

14:00之后,对流在山东东南部的日照、临沂等地迅速传播,并引发8~9级阵风,短期预报难度较大,出现了漏报情况,本节将重点分析上述区域对流的触发和大风的成因。

14:00,在 0.5° 仰角反射率因子图中可见4种窄

带回波,分别是阵风锋、地面辐合线、海风锋(图6a)、对流云街(图6b)。阵风锋窄带回波位于L3南侧10 km处,反射率因子为15~20 dBZ,长约100 km,高约1 km,移速为 $26 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,此时阵风锋尚未引发8级以上大风。地面辐合线和海风锋分别位于安丘—诸城、诸城—五莲,地面气象要素资料显示,地面辐合线和海风锋两侧存在明显的气温差、露点差和风场辐合(图6c)。对流云街分布在潍坊南部至临沂南部,呈西南—东北走向,在雷达和卫星云图上分别表现为平行排列的窄带回波和积云线(图6b—c)。它通常出现在中等不稳定环境中^[29],是由边界层水平对流卷间产生的上升运动而激发^[30],是雷暴重要的触发机制之一。

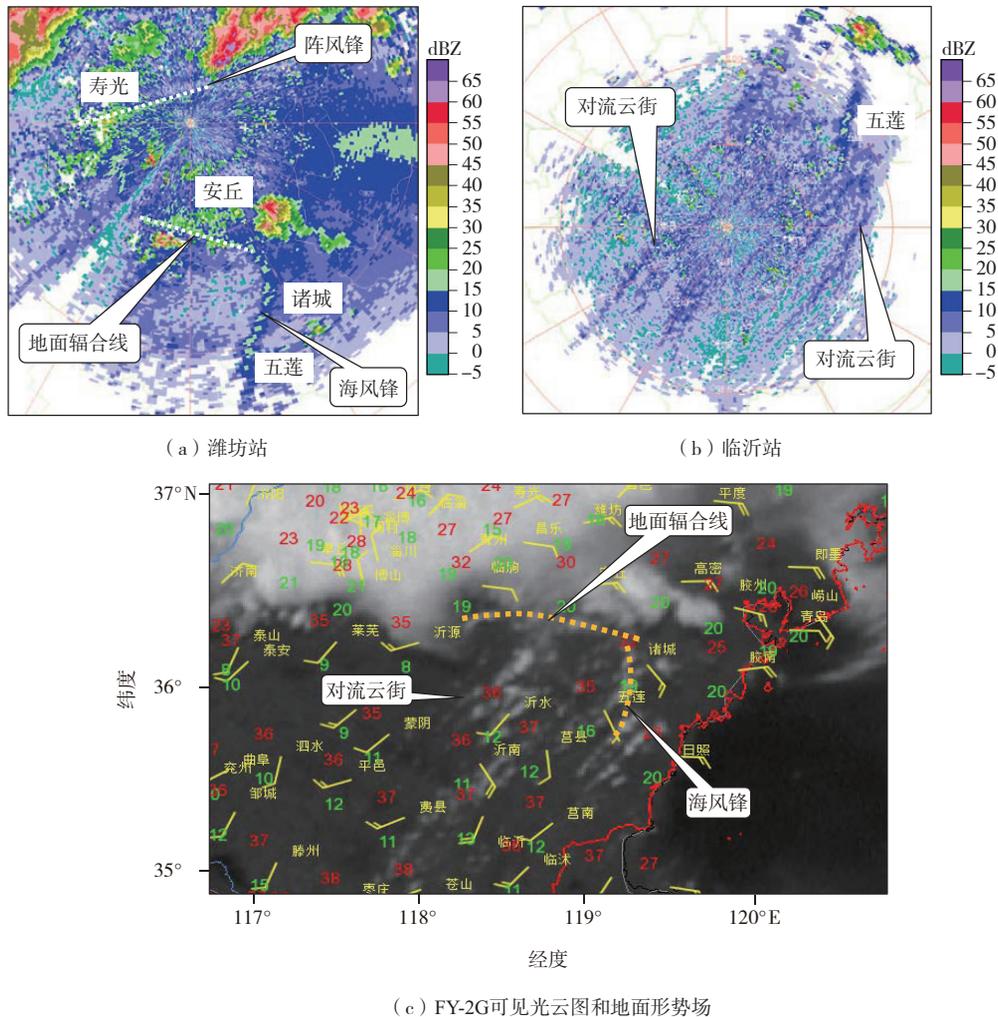


图6 2018年6月13日14:00雷达 0.5° 仰角反射率因子(色阶)以及FY-2G可见光云图和地面风场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气温(红色观测值,单位: $^\circ\text{C}$)、露点温度(绿色观测值,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig.6 Radar reflectivity (color scale) at 0.5° elevation, FY-2G visible cloud imagery, surface wind field (wind barb, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), air temperature (observation value in red, units: $^\circ\text{C}$), and dew point temperature (observation value in green, units: $^\circ\text{C}$) at 14:00 BST 13 June 2018

14:00 在安丘南部地面辐合线和海风锋附近有单体 F 生成并向东北方向移动。由其反射率因子剖面(图 7)可见,14:29 回波顶高于 10 km,在高度 2.5 km 和 7.0 km 处各存在一个 57 dBZ 的反射率因子核心(图 7a);14:35 单体 F 与南移的阵风锋在安丘东部相遇,反射率因子快速增强至 62 dBZ,回

波顶高和核心高度保持不变(图 7b);14:41—14:53,最大反射率因子维持在 60 dBZ 以上,但反射率因子核心出现连续下降,14:53 降至 1.0 km 左右(图 7c—e);而 14:59—15:11,当单体逐渐并入 L3 主体风暴时,核心高度再度上升至 5.0 km 左右,呈现再度发展之势(图 7f—h)。

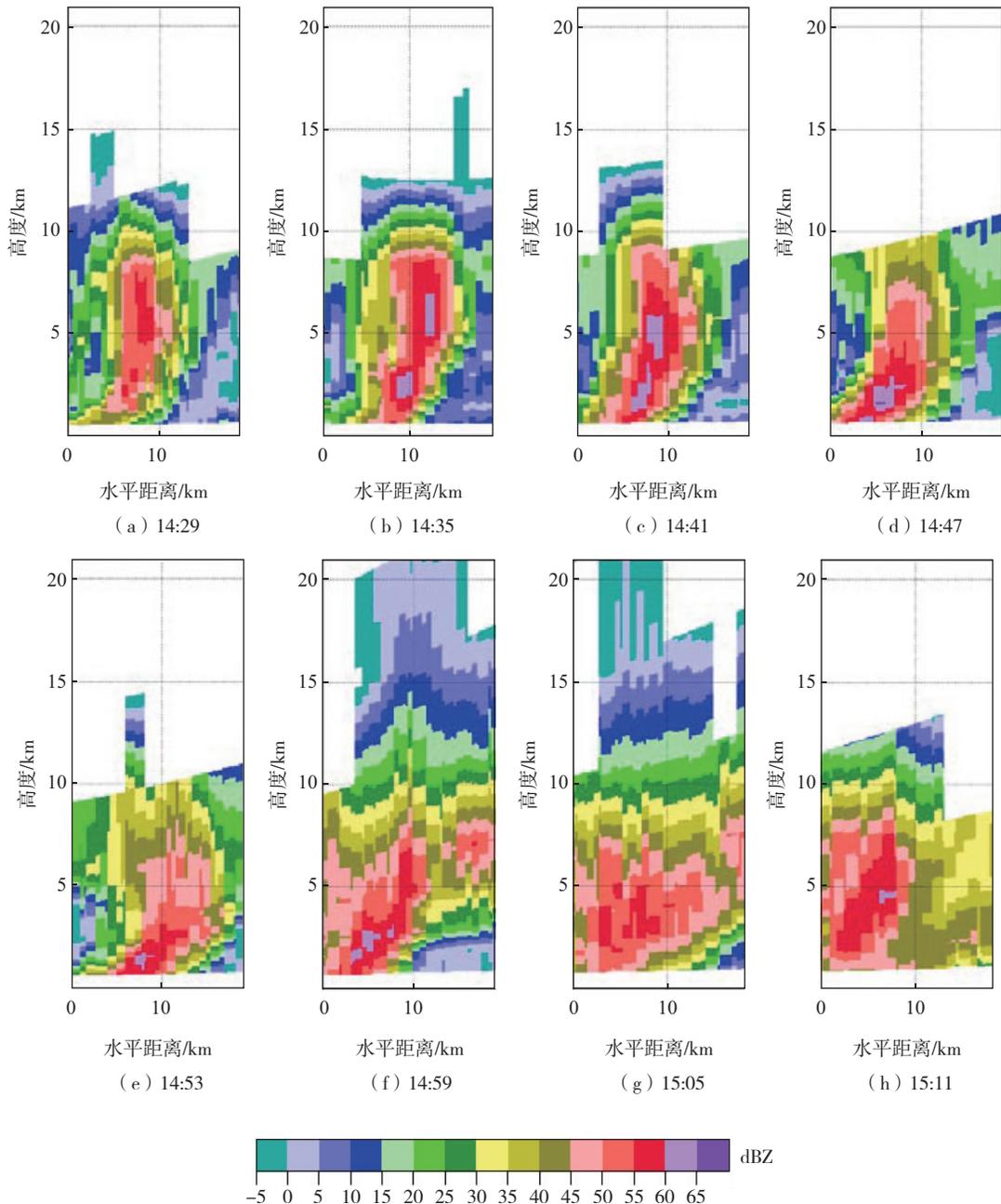


图 7 2018 年 6 月 13 日 14:29—15:11 单体 F 反射率因子剖面(色阶)
Fig.7 Profile of reflectivity (color scale) of F cell from 14:29 to 15:11 BST 13 June 2018

在单体 F 形成之前,地面辐合线上触发的单体由于没有受到阵风锋的增强作用,生命史较短,并未入风暴就已减弱消散。而在单体 F 之后,地面辐合

线、海风锋、对流云街上又源源不断地触发多个单体,这些单体在遇到阵风锋后强度增强,最终并入 L3 和东移过来的 L2,使风暴水平尺度快速增大。

风暴产生的多股下沉气流持续不断地将干冷空气补充到地面冷池中,形成多条阵风锋,15:31 昌乐白塔站在经历第二次阵风锋过境时产生 $18.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8级)大风。增强的冷池驱动阵风锋加速移动,16:00—20:00,阵风锋移速增至 $40\sim 50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,途经潍坊南部、临沂、日照等地,所到之处产生8~9级的地面大风。

综上所述,山东东南部对流的新生单体是在地面辐合线、海风锋、对流云街上被接连触发的,因此,在对流潜势较高的条件下,需特别关注边界层辐合线对对流的触发作用^[31-32]。新生单体在遇到阵风锋后强度增强、生命史得以延长,当增强的单体并入到主风暴后,使对流风暴发展壮大。而风暴中的下沉气流又驱动着多股阵风锋加速向南推进,快速移动的阵风锋有利于地面风速的增强。阵风锋与线状风暴主体之间存在相互促进的机制。

6 结论

2018年6月13日山东受多条线状风暴和阵风锋共同作用,造成区域性致灾大风,此次过程预报难度大,出现量级低估和漏报的现象。本文针对预报难点,重点分析线状风暴引发地面极端大风和山东东南部对流的触发和大风成因,主要结论如下:

(1)此次雷暴大风过程发生在高空冷涡背景下。冷涡后部的横槽转竖引导冷空气叠加在低层暖脊之上,850 hPa与500 hPa温差高达 $34.7 \text{ }^\circ\text{C}$;同时925~600 hPa的干层($H_R \leq 50\%$)与地面至925 hPa的近饱和层($H_R \geq 80\%$)相叠置,上下层大气之间存在显著的温、湿差异,热力不稳定条件强,持续并增强的低层逆温层使不稳定能量得到积累。显著干层和低层强温度垂直递减率为风暴中夹卷和蒸发冷却等过程提供了有利条件,有助于风暴中下沉气流的增强。3 km和6 km以下垂直风切变强度强,为组织化风暴的形成提供了有利的动力不稳定条件。

(2)线状风暴经历了发展、组织化和增强阶段,不同生命期的地面大风由下击暴流所引发,风速极端,致灾性强。发展阶段下击暴流发生在普通单体中,组织化和增强阶段下击暴流发生在超级单体中,青岛地区12级以上极端强风出现在超级单体中气旋底高从2.0 km降至0.3 km过程中。单体间下沉气流的合并使地面大风的影响范围和强度有所增大。

(3)线状风暴不同生命期强阵风出现时均伴随较强降雨和降雹,雨滴和冰雹的拖曳作用是下击暴流产生的重要原因。极大风速与5 min降水量具有正向相关性,青岛站 $34.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极端大风出现时5 min降水量达19 mm。

(4)山东东南部的初生对流单体在地面辐合线、海风锋、对流云街上被接连触发,这些单体在遇到阵风锋后强度增强、生命史得以延长;当增强的单体并入到主风暴后,使风暴发展壮大,而风暴中的下沉气流又驱动着多股阵风锋加速向南推进,有利于地面风速的增强。阵风锋与风暴主体之间存在相互促进的机制。在对流潜势较高的条件下,需特别关注边界层辐合线对对流的触发作用。

参考文献:

- [1] 陈晓欣,俞小鼎,王秀明.中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J].气象学报,2022,80(1):67-81.
- [2] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社,2020:292-293.
- [3] FUJITA T T. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner[J]. Mon Wea Rev,1977,105(2):129-146.
- [4] FUJITA T T. Manual of downburst identification for project NIMROD: Satellite and Mesometeorology Research Paper No. 156[R]. Chicago: The University of Chicago,1978:103-104.
- [5] 刘洪恩.微下击暴流的特征及其数值模拟[J].气象学报,2001,59(2):183-195.
- [6] 孙凌峰,郭学良,孙立潭,等.武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究[J].大气科学,2003,27(6):1077-1092.
- [7] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,2006,17(4):385-393.
- [8] 刘香娥,郭学良.灾害性大风发生机理与飏线结构特征的个例分析模拟研究[J].大气科学,2012,36(6):1150-1164.
- [9] 侯淑梅,李昱薇,张鹏,等.“4·29”山东近海10级以上雷暴大风的成因分析[J].气象,2022,48(10):1242-1256.
- [10] 王秀明,俞小鼎,周小刚,等.“6·3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].高原气象,2012,31(2):504-514.
- [11] 屈梅芳,俞小鼎,农孟松,等.一次弱垂直风切变环境下

- 飏线发展维持的成因分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5):466-473.
- [12] WILSON J W, ROBERTS R D. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective [J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(1):23-47.
- [13] FRITSCH J M, VISLOCKY R L. Enhanced depiction of surface weather features [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3):491-506.
- [14] WILSON J W, MEGENHARDT D L. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125(7):1507-1525.
- [15] 吴芳芳,王慧,韦莹莹,等.一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 2009, 35(1):55-64.
- [16] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3):311-337.
- [17] JOHNS R H, DOSWELL C A III. Severe local storms forecasting [J]. *Wea Forecasting*, 1992, 7(4):588-612.
- [18] 侯淑梅,周成,韩永清,等.山东省线状中尺度对流系统与多单体风暴的合并特征[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(1):57-65.
- [19] JOHNS R H, HIRT W D. Derechos: widespread convectively induced windstorms [J]. *Wea Forecasting*, 1987, 2(1):32-49.
- [20] 杨晓亮,杨敏.2017年秋季河北一次飏线引发的雷暴大风过程分析[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(6):1-9.
- [21] 王艳春,尉英华,张楠,等.2017年夏季天津一次下击暴流事件的成因初探[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(5):556-563.
- [22] 王珏,肖艳姣,冷亮,等.2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2):119-129.
- [23] 夏文梅,马中元,慕瑞琪,等.江西副高边缘雷暴大风雷达拼图回波特征分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5):717-726.
- [24] 梅婵娟,张灿,许可,等.山东半岛秋季一次脉冲风暴下击暴流观测分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2):131-139.
- [25] 吴福浪,杨琦堡,沈欣,等.宁波机场附近一次孤立强雷暴大风事件分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4):133-140.
- [26] 盛杰,郑永光,沈新勇.华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. 气象学报, 2020, 78(6):877-898.
- [27] 章国材.强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社, 2011:337.
- [28] 费海燕,王秀明,周小刚,等.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12):1513-1521.
- [29] ETLING D, BROWN B A. Roll vortices in the planetary boundary layer: a review [J]. *Bound-Layer Meteor*, 1993, 65(3):215-248.
- [30] 刁秀广,刘畅,万明波,等.山东3次大暴雨过程云街雷达回波特征及其作用分析[J]. 气象, 2020, 46(2):179-188.
- [31] 于怀征,龚佃利,朱君鉴,等.日照一次EF2级龙卷的环境场及雷达特征[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(3):38-47.
- [32] 侯淑梅,郭俊建,郭庆利,等.对流风暴的移动和演变对下游地区对流降水影响的个例分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2):58-69.