

侯淑梅,李昱薇,张鹏,等,2022.“4·29”山东近海 10 级以上雷暴大风的成因分析[J].气象,48(10):1242-1256. Hou S M, Li Y W, Zhang P, et al, 2022. Cause of a thunderstorm gale event over grade 10 along the Shandong coast on 29 April 2021 [J]. Meteor Mon, 48(10):1242-1256(in Chinese).

“4·29”山东近海 10 级以上雷暴大风的成因分析^{*}

侯淑梅^{1,2} 李昱薇² 张 鹏³ 朱晓清² 高荣珍⁴

张永婧⁵ 梅婵娟⁶ 石 磊⁷ 朱义青⁸

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

3 山东省聊城市气象局, 聊城 252000

4 山东省青岛市气象局, 青岛 266003

5 山东省济南市气象局, 济南 250102

6 山东省威海市气象局, 威海 264200

7 山东省烟台市气象局, 烟台 264001

8 山东省临沂市气象局, 临沂 276004

提 要: 2021 年 4 月 29 日山东近海出现 10~13 级雷暴大风, 造成一艘渔船翻扣。基于多普勒天气雷达、地面加密自动气象观测站、ERA5 再分析及常规观测资料, 分析了此次雷暴大风的成因, 结果表明: 东北冷涡后部强盛的西北气流携带干冷空气叠加在低层暖温度脊之上, 强烈的位势不稳定层结和垂直风切变为当天产生强对流天气提供了有利的环境条件。高空强劲的西北气流, 一方面导致阵风锋移动速度快, 另一方面高空动量下传, 增大了下沉气流的角动量。阵风锋移动速度快、持续时间长, 是造成所经之地产生 10 级以上雷暴大风的直接原因。对流层中低层大气干燥, 高层水凝物下落过程中蒸发降温, 在近地面形成厚度高达 120 hPa 的冷池。小尺度冷池造成的加压与大尺度气旋后部增压叠加, 与气旋的减压区形成变压风。冷池与日照暖温度脊之间产生的密度流与变压风叠加, 造成地面大风强度增强。冷池小高压入海后气压梯度方向转变造成风向发生旋转, 增加了渔船翻扣的风险。日照上空的蒸发作用、锋区梯度、密度流强度、多尺度天气系统的叠加效应均比青岛强, 导致处于青岛雷暴边缘的日照市出现 10 级以上雷暴大风的强度和范围均比受青岛雷暴主体影响的青岛市大。

关键词: 阵风锋, 密度流, 多尺度天气系统叠加, 蒸发降温, 高空动量下传, 变压风

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041801

Cause of a Thunderstorm Gale Event over Grade 10 Along the Shandong Coast on 29 April 2021

HOU Shumei^{1,2} LI Yuwei² ZHANG Peng³ ZHU Xiaoqing² GAO Rongzhen⁴

ZHANG Yongjing⁵ MEI Chanjuan⁶ SHI Lei⁷ ZHU Yiqing⁸

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

3 Liaocheng Meteorological Office of Shandong Province, Liaocheng 252000

4 Qingdao Meteorological Office of Shandong Province, Qingdao 266003

5 Jinan Meteorological Office of Shandong Province, Jinan 250102

6 Weihai Meteorological Office of Shandong Province, Weihai 264200

7 Yantai Meteorological Office of Shandong Province, Yantai 264001

8 Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276004

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD010)、山东省气象局精准预报技术创新团队(SDCXTD2021-1)、中国气象局预报员专项(CMAY-BY2018-041)和山东省气象局重点课题(2016sdqxz01)共同资助

2021 年 12 月 4 日收稿; 2022 年 5 月 20 日收修定稿

第一作者: 侯淑梅, 主要从事强对流等灾害性天气预报研究. E-mail: shmh0808@163.com

Abstract: The thunderstorm gale as powerful as grade (10—13) overturned a fishing ship along the Shandong Coast on 29 April 2021. The causes of this thunderstorm gale process are investigated in this paper based on the data of Doppler weather radar and densely-distributed automatic weather station, ERA5 reanalysis data and the conventional observation data. The results show that the cold and dry air coming from northwest behind the northeast China cold vortex superimposed the lower-level warm ridge, and the strong potential instability stratification and vertical wind shear provided favorable environmental conditions for this severe convection weather. Under the influence of the strong upper-level northwest steering currents, the advection of both the Qingdao thunderstorm and the gust front were fast, and the angular momentum of downdraft was increased due to momentum downward-transporting. The gust front lasted for a long time and moved fast, directly causing thunderstorm gale of grade 10—13 to hit the places it passed through. Dry air in the middle-low troposphere and evaporative cooling of upper-level hydrometeor during its falling process, formed a cold pool with thickness up to 120 hPa near the ground. Allobaric wind formed between the pressurization area at the rear of the large-scale cyclone superimposed with the small-scale cold pool and the decompression area of the cyclone. Density currents between the cold pool and warm ridge in Rizhao superimposed with allobaric wind led to enhancement of surface wind. Considering the orientation of the pressure gradient changed after the high pressure cold-core entering sea. Wind direction became rotated so that the risk of fishing boat overturning increased. The evaporation, gradient of the frontal zone, intensity of density flow and superposition effect of the multi-scale weather system over Rizhao, were all stronger than those in Qingdao, so that the thunderstorm gales above grade 10 in Rizhao City, which lay on the edge of Qingdao thunderstorm, had a greater power and scope than those in Qingdao City, that was affected by the main body of the thunderstorm.

Key words: gust front, density current, multiscale weather system superposition, evaporative cooling, momentum downward-transporting, allobaric wind

引 言

雷暴大风是指对流风暴中下沉气流达到地面时产生辐散,造成的地面大风(俞小鼎等,2006)。雷暴大风主要是由对流风暴的强下沉气流造成,有时还包括冷池密度流、高空水平动量下传和上升气流的抽吸作用(王秀明等,2013)。全国范围内按照平均每万平方千米发生次数排序,华北和华东地区发生强雷暴大风($25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上)的次数最多(费海燕等,2016)。引发雷暴大风的对流系统的组织类型主要有飑线、弓形回波和超级单体(杨新林等,2017)。北京和天津地区产生雷暴大风的雷达回波中带状回波的占比最高(杨璐等,2018;王亚男等,2020)。有组织的飑线产生强雷暴大风的案例较多,中等到强垂直风切变环境条件下,大范围的雷暴大风大多由沿飑线的弓形回波造成(Johns and Doswell III, 1992)。如 2009 年 6 月 3 日受飑线影响,晋陕西南部、冀豫交界处出现了大范围的雷暴大风, $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

以上大风造成河南商丘及其东部下游地区 25 人死亡(孙虎林等,2011;王秀明等,2012;2013)。2018 年 3 月 4—5 日飑线在江西境内造成严重的大风灾害,20 个县(市)阵风达 10 级以上,覆盖范围为 1959 年江西有完整气象记录以来第一位(盛杰等,2019)。2016 年 6 月 30 日受一条长寿命飑线的影响,山东出现大范围的雷暴大风,国家气象观测站有 21 个站次出现 10 级以上雷暴大风,最大风为 $33.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12 级)出现在广饶县大码头站(万夫敬等,2021)。发展为弓形回波的飑线造成雷暴大风的案例更是屡见不鲜(程月星等,2018;康岚等,2018;公衍铎等,2019)。除了飑线,超级单体也是造成极端雷暴大风的重要形式,龙卷经常发生在超级单体风暴中。2016 年 6 月 23 日 14—15 时江苏阜宁县发生了历史罕见的 EF4 级龙卷极端天气(张小玲等,2016;郑永光等,2016),造成 99 人死亡,846 人受伤,分析表明此次龙卷灾害主要由超级单体龙卷造成(杨波等,2019)。2015 年 6 月 1 日湖北监利“东方之星”沉船事故主要也是由超级单体触发的下击暴流造成的

(杨波等,2019)。2019年3月21日,飑线内强单体发展成为超级单体,造成广西林桂站出现 $60.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (17级)的极端雷暴大风,打破了广西风速的历史纪录,直接经济损失达26万元(王艳兰等,2021)。除此之外,多单体风暴、脉冲风暴和孤立的一般单体也能产生雷暴大风。2017年7月9日受多单体风暴影响,河北保定21个站出现10级以上大风,顺平的高于铺极大风速高达 $43.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (14级),多站突破历史极值,损失严重(马鸿青等,2019)。2018年9月8日脉冲风暴在山东威海文登机场附近造成一次湿微下击暴流,文登东部20 km范围内地面风场呈现明显辐散状特征,出现风向突变、风速跃升等现象(梅婵娟等,2020)。2018年7月26日一次脉冲风暴造成宁波的强对流天气,最大风力达到10级,短时强降水、低能见度和雷暴大风等因素造成宁波机场多架航班延误和返航备降(吴福浪等,2021)。以上这些雷暴大风无不给当地造成严重的经济损失或人员伤亡,但对于雷暴大风发生的时间、强度、影响区域等精细的预报预警仍是预报业务面临的巨大挑战。

近几年,山东省极端雷暴大风事件层出不穷。2016年6月13—14日,受华北冷涡影响,山东省连续两天出现强对流天气(张琴等,2018;高晓梅等,2018),造成全省大范围出现8~10级雷暴大风,汶上出现 $33.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)雷暴大风(朱义青和高安春,2021)。无独有偶,2018年6月13日,同样受华北冷涡影响,山东省再次出现大范围强对流天气,青岛奥帆基地出现 $39.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13级)雷暴大风。极端雷暴大风不仅造成严重的经济损失,还可能造成人员伤亡。2017年8月6日受飑线影响,山东东部地区出现了一次罕见的12~13级雷暴大风事件,全省共有99个站出现8~9级大风,16个站出现10~11级大风,2个站达到12级或以上,潍坊南孙站极大风速高达 $37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13级),受灾人口为15.8万人,直接经济损失达2.4亿元(万夫敬等,2018)。

2021年4月29日下午,山东省出现一次强对流天气,对流区域出现8级以上雷暴大风,在日照、青岛及其沿海一带出现10~13级雷暴大风(图1),以下称为“4·29”山东近海10级以上雷暴大风。王福侠等(2016)对河北省雷暴大风的雷达回波特征统计发现,雷暴大风的反射率因子一般都在50 dBz以上,当雷达回波强度超过50 dBz时,与雷暴大风的

隶属度超过90%(周康辉等,2017)。造成“4·29”山东近海10级以上雷暴大风的雷暴主体位于青岛境内,称其为青岛雷暴。日照处于青岛雷暴的边缘,雷暴范围小、强度弱,最大反射率因子为45 dBz,但大风的范围和强度均比青岛大。对于强雷暴(超级单体或飑线)产生的雷暴大风,尽管大风的强度、范围预报可能与实况有偏差,但通过对雷达回波的监测,能够发现可能产生雷暴大风的一些先兆信号,预报员对于强雷暴产生的雷暴大风具有一定的预报预警能力;但对于弱雷暴,由于出现次数少,对其认识不足,预报能力有限。本文试图分析日照及其沿海弱雷暴背景下10级以上雷暴大风产生的原因,提高对弱雷暴背景下雷暴大风形成机理的认识,增强预报员对该类雷暴大风的预报能力。

1 资料

研究中所用资料包括:高空、地面等常规观测资料,山东省加密自动气象观测站逐小时资料,江苏省连云港站、山东省青岛站多普勒雷达产品;华东区域多普勒雷达组合反射率因子拼图。其中,连云港多普勒雷达产品由江苏省气象台提供,其他资料由山东省气象台提供。空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 、时间分辨率为1 h的ECMWF第五代全球大气再分析资料(以下简称为ERA5再分析资料)。

2 天气实况

2021年4月29日14—17时(北京时,下同),在鲁西北、鲁中、鲁东南和山东半岛南部地区出现8级以上大风(图1a),其中日照、青岛一带出现10级、局地11~12级雷暴大风(图1b)。当日15:30左右,鲁岚渔船“71001”在日照石臼港区以东42海里处翻扣(图1c~1e中紫色圆点为渔船翻扣位置),4人遇险,其中1人获救、3人失联。

从逐小时雷暴大风的演变可见(图1c~1e),10级以上雷暴大风15—17时逐渐从日照北部向东南推进到日照沿海及其海域。日照境内的雷暴大风主要出现在15时前后,最大风速为 $33.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)于14:55出现在五莲县的叩官站,五莲县在前后10 min之内有4个站风速超过 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在日照沿海的东港马陵水库、日照帆船基地、山海天鲁南

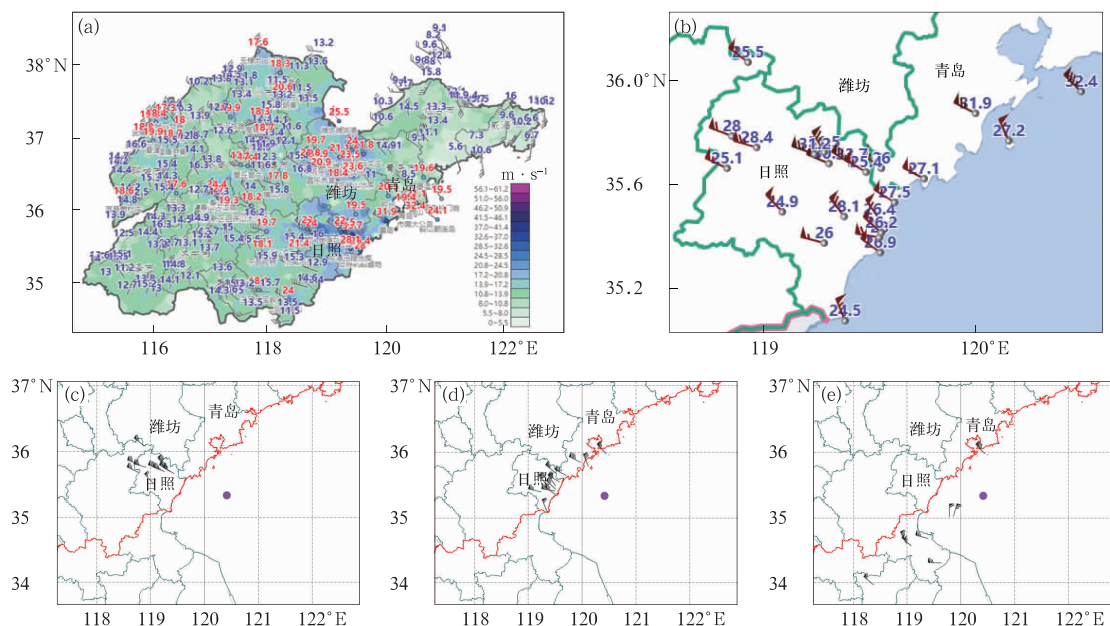


图 1 2021 年 4 月 29 日 14—17 时 (a) 极大风 (红色数字为 8 级以上, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、
(b) 10 级以上极大风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、(c) 15 时、(d) 16 时、(e) 17 时 1 h 10 级以上极大风 (风羽)
(紫色圆点: 事故发生地, 下同)

Fig. 1 (a) Extreme wind from 14:00 BT to 17:00 BT (red number: wind over grade 8),
(b) extreme wind over grade 10 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), hourly extreme wind over grade 10 (barb)
at (c) 15:00 BT, (d) 16:00 BT, (e) 17:00 BT 29 April 2021
(purple dot: place of accident, the same below)

森林公园、日照港站的极大风分别为 $28.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级)、 $28.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级)、 $27.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级) 和 $26.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级), 出现时间为 15:04—15:17。董加口浮标站 (位于日照港东偏北海域 34 km 左右) 15:30 监测到 $37.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13 级) 的极大风速, 大公岛 (位于青岛海域) 15:07 监测到 $32.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11 级) 的极大风速。根据日照内陆到沿海极大风向东南方向的推进速度, 渔船翻扣时正好遇到较强的雷暴大风。

从图 2a 可见, 14:00—17:00 全省大部分站累计降水量不足 10 mm, 日照境内降水量小于 2 mm。从雷达组合反射率因子动态可见, 14:48 (图 2b) 青岛雷暴的主体位于青岛境内, 日照的中北部处于青岛雷暴的边缘, 回波强度为 30~40 dBz。日照西部与临沂交界处有对流单体 A 生成, 回波强度为 30~40 dBz。15:12 (图 2c), 青岛雷暴东南移, 前沿已入海, 日照的东北部处于青岛雷暴的边缘, 回波强度为 30~40 dBz。单体 A 减弱到 30 dBz, 在单体 A 南侧新生一单体 B 向偏东方向移动。15:30 (图 2d) 青岛雷暴已移出日照入海, 日照海域回波强度仍为 30~40 dBz, 单体 B 到达海陆边界, 强度为 30~40 dBz。15:42 (图 2e), 青岛雷暴位于日照海域部分强度略

有增强, 强度为 40~50 dBz; 单体 B 入海后强度也略有增强, 最强反射率因子增强到 45 dBz, 30 dBz 的回波范围有所增大。从单体 B 的入海位置看, 与发生翻船事件的地点接近。

从日照陆地和沿海的雷达回波演变可见, 日照处于青岛雷暴的边缘, 强度为 50 dBz 以下。除此之外还有一些单体发展, 但强度也在 50 dBz 以下。二者入海后虽然强度略有增强, 但最大强度也只有 40~50 dBz。那么, 造成翻船事件的 10~13 级雷暴大风是如何产生的? 弱雷暴背景下产生 10 级以上强雷暴大风的原因是什么? 日照处于青岛雷暴的边缘, 为什么日照出现 10 级以上雷暴大风范围最大、强度最强? 下文将针对以上问题进行分析。

3 10 级以上雷暴大风的成因

3.1 有利的环境条件

4 月 29 日 08 时 500 hPa 东北冷涡中心位于内蒙古东北部, 有一 -32°C 的冷中心与之配合 (图 3a)。冷涡南侧高空槽的南段移速比北段快, 北段槽位于内蒙古东部到河北省北部, 南段槽位于辽宁东部到

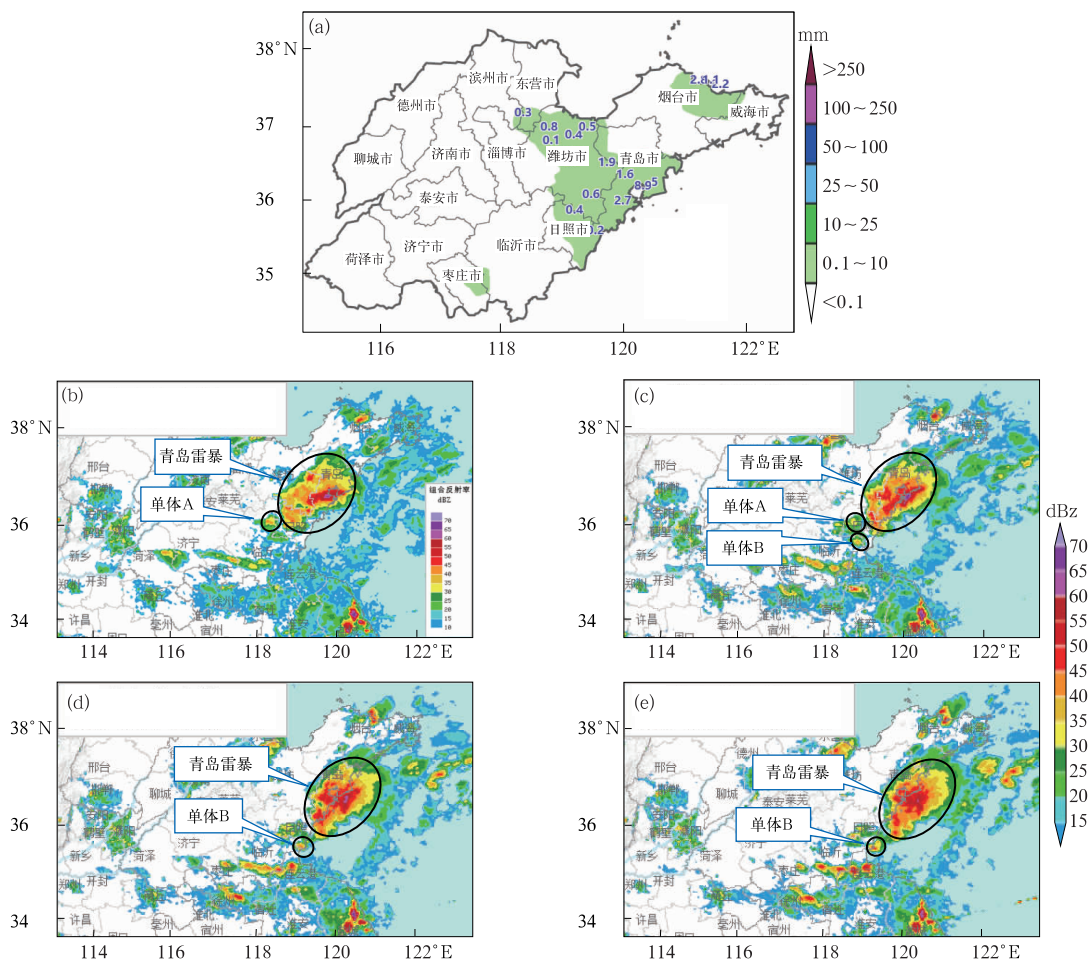


图 2 2021 年 4 月 29 日(a)14—17 时山东省累计降水量,

(b)14:48,(c)15:12,(d)15:30,(e)15:42 雷达组合反射率因子拼图

Fig. 2 (a) Accumulated precipitation from 14:00 BT to 17:00 BT, (b–e) radar reflectivity mosaic at (b) 14:48 BT, (c) 15:12 BT, (d) 15:30 BT, (e) 15:42 BT 29 April 2021

黄海南部。冷涡后部从蒙古、内蒙古中部一直延伸到山东、江苏一带形成大于 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风中急流,最大风速高达 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,携带干冷空气入侵山东、江苏一带。850 hPa 冷涡中心与 500 hPa 位置相同,冷涡南侧高空槽从内蒙古东部经山东省西部伸到河南省东部(图 3b)。温度槽落后于高度槽,槽后冷平流明显,槽前暖温度脊从河南省东部经山东省西部向东北伸向辽宁省西部。高空干冷的西北气流正好在鲁中地区叠加在暖温度脊上,位势不稳定层结增强,为强对流天气创造了有利的环境条件。

从青岛站 29 日 08 时探空可见(图 4a), $0 \sim 6 \text{ km}$ 、 $0 \sim 3 \text{ km}$ 风矢量差分别高达 $30.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 850 hPa 与 500 hPa 温差高达 36.1°C 。用青岛 14 时气温 17.0°C 、露点温度 10.1°C 订正当日 08 时探空(图 4a),发现对流有效位能(CAPE)高达 $1126.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能量

(CIN)为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,非常有利于当天出现强对流天气。用日照 14 时气温 23.7°C 、露点 7.8°C 订正当日 08 时青岛探空(图 4b),发现 CAPE 高达 $1947.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,比用青岛站资料订正后的 CAPE 大。对比图 4a 和 4b 还可以发现用日照实况订正后的 CAPE 比青岛的 CAPE 形态上更“胖”,即更有利于出现风雹类强对流天气。从露点的廓线还可以发现,550 hPa 以上为湿层,940~550 hPa 较干,湿度廓线既不是上干下湿的湿下击暴流形态,也不是下喇叭口的干下击暴流形态,且下沉对流有效位能(DCAPE)只有 $20.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,并不是产生雷暴大风的典型特征。但从温度廓线的分布可见,14 时气温上升后,日照上空已经完全消除了近地面的逆温层, CIN 为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,800 hPa 以下温度直减率接近干绝热递减率,有利于产生雷暴大风。

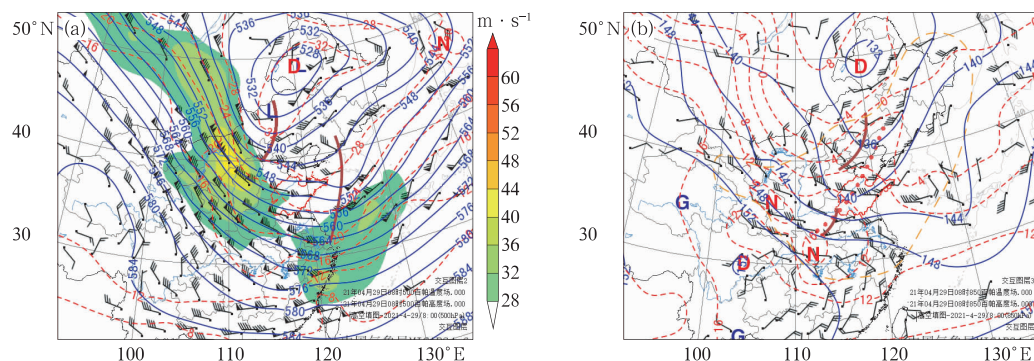


图 3 2021 年 4 月 29 日 08 时 (a) 500 hPa, (b) 850 hPa 高空图

(蓝色实线:等高线,单位:dagpm;红色虚线:等温线,单位:℃;填色:500 hPa 风速 $\geq 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域;红色圆点:850 hPa 暖脊;黄色虚线:850 hPa 与 500 hPa 温差 $> 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域;D:低压中心,G:高压中心,N:暖中心,下同)

Fig. 3 Synoptic chart at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 08:00 BT 29 April 2021

(blue solid line: contour, unit: dagpm; red dotted line: isotherm, unit: $^{\circ}\text{C}$, colored: wind speed $\geq 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 500 hPa, red dotted line: warm ridge at 850 hPa, orange dashed line: region of temperature difference $> 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ between 850 hPa and 500 hPa; D: low-pressure center, G: high-pressure center, N: warm center, the same below)

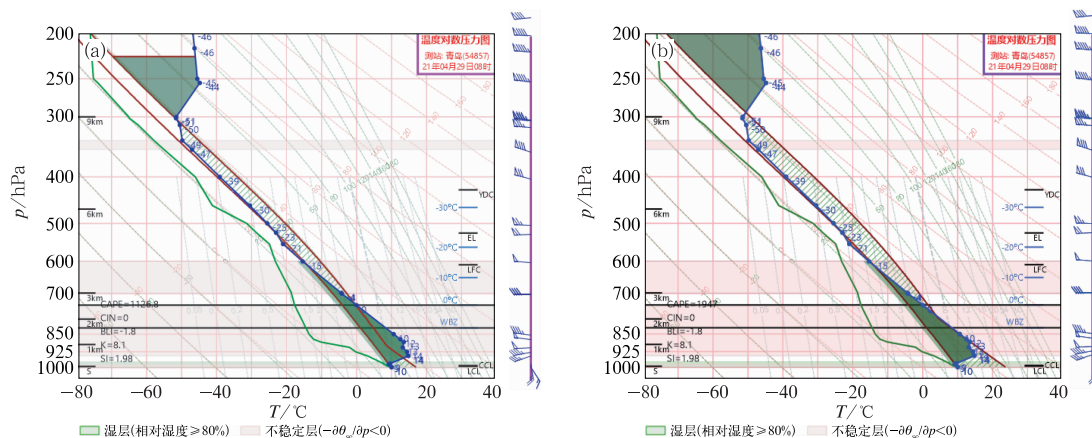


图 4 2021 年 4 月 29 日分别用 (a) 青岛和 (b) 日照 14 时气温、露点订正青岛 08 时 $T\text{-ln}p$ 图

Fig. 4 Revised $T\text{-ln}p$ of Qingdao at 08:00 BT corrected by (a) Qingdao and (b) Rizhao temperature and dew-point temperature respectively at 14:00 BT 29 April 2021

综上所述,事故发生当天,环境条件是有利于强对流天气发生的,温度的垂直分布特征是有利于出现雷暴大风,但湿度的垂直分布并不是典型雷暴大风的形态。那么 10 级以上的雷暴大风是如何产生的?

3.2 阵风锋

12:20 初始对流单体在山东省淄博市的淄川、博山一带被触发,单体生成后快速向东南方向移动并发展,范围扩大,统称其为青岛雷暴。青岛雷暴在向东南方向快速移动的同时,其南侧莱芜和前侧潍坊境内均有新单体生成并快速发展。14:21 在潍坊到青岛一带青岛雷暴逐渐与周边单体合并加强,并

继续向东南方向移动,仍称其为青岛雷暴。此时强回波中心位于青岛境内,其西南部位于日照市西北部的五莲、莒县境内。此时青岛雷暴呈现出后向传播的特征,其西南方向,在临沂境内开始有新单体生成(图略)。

14:56 青岛雷暴的西南侧开始出现阵风锋(图 5a),由于此时阵风锋距离雷达较远,距地高度为 1.8 km,因此雷达反射率因子较弱,范围较小。阵风锋随着青岛雷暴快速向东南方向移动,距地高度逐渐降低,其形态特征逐渐明显(图 5b),15:19 阵风锋入海(图 5c)。15:30 阵风锋位于日照港东南方向 22 km 左右,形态为非常完整的弧状窄带回波(图 5d)。此后阵风锋继续向东南方向移动,其形态

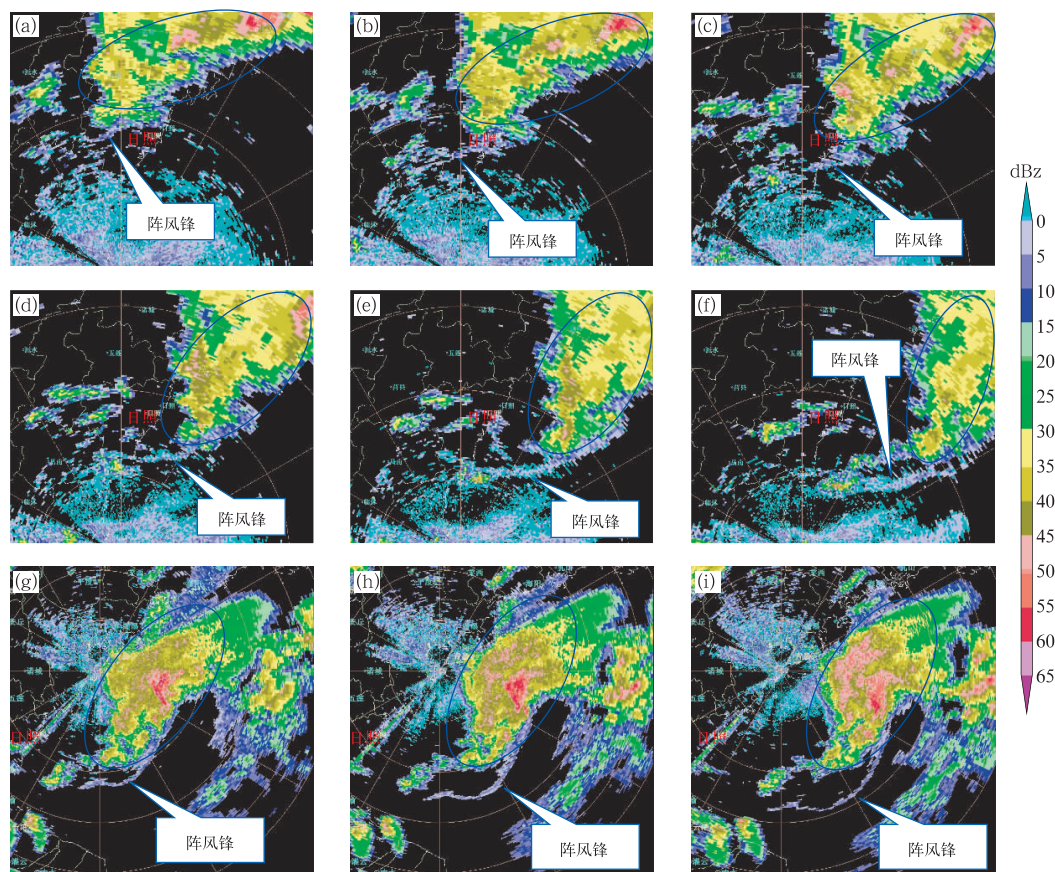


图 5 2021 年 4 月 29 日(a~f)连云港雷达,(g~i)青岛雷达 0.5°仰角反射率因子阵风锋演变
(蓝色圆圈:青岛雷暴)

(a) 14:56, (b) 15:07, (c) 15:19, (d) 15:30, (e) 15:41, (f) 15:52, (g) 16:03, (h) 16:15, (i) 16:26
Fig. 5 Evolutions of gust front by radar reflectivity factor at 0.5° elevation of (a—f) Lianyungang Radar and (g—i) Qingdao Radar at (a) 14:56 BT, (b) 15:07 BT, (c) 15:19 BT, (d) 15:30 BT, (e) 15:41 BT, (f) 15:52 BT, (g) 16:03 BT, (h) 16:15 BT, (i) 16:26 BT 29 April 2021
(blue circle: Qingdao thunderstorm)

特征更加显著,其宽度也较初始阶段时显著增加(图 5e,5f)。该阵风锋移动速度较快,利用 PUP 测距功能估测其移动速度为 $76 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。俞小鼎等(2020)指出,移动速度大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的阵风锋容易造成雷暴大风。本例中的阵风锋移动速度远远大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,产生了 10~13 级雷暴大风。事实上,阵风锋持续时间很长,16 时以后,虽然连云港雷达上看不到阵风锋了,但从青岛雷达上,仍然可以清晰地看到阵风锋(图 5g~5i),该阵风锋一直持续到 16:32,之后可能由于距离雷达较远,观测不到了。

综上所述,事故当天,虽然日照只处于青岛雷暴的边缘,强度中等,但其产生了明显的阵风锋,阵风锋持续时间长达 90 min 以上,并且雷暴和阵风锋的

移动速度很快,达到 $76 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),造成所经之地产生 10~13 级雷暴大风。那么,中等强度的对流风暴如何能产生强度强且持续时间如此之长的阵风锋?

3.3 密度流

从 14 时地面 2 m 气温(图 6a)的分布可见,受日变化影响,山东境内有两个温度脊,一个在潍坊北部,另一个在鲁东南的临沂、日照一带,二者之间在潍坊中部到青岛西部为对流降水造成的中心气温为 18°C 的冷池。冷池中心与鲁东南 24°C 暖区之间形成温度锋区。同时次 1 h 变温(图 6d)可见,对流区域 1 h 负变温中心高达 -3.6°C ,而鲁东南一带 1 h 正变温中心最大值为 1.7°C 。可见,受日变化影响,

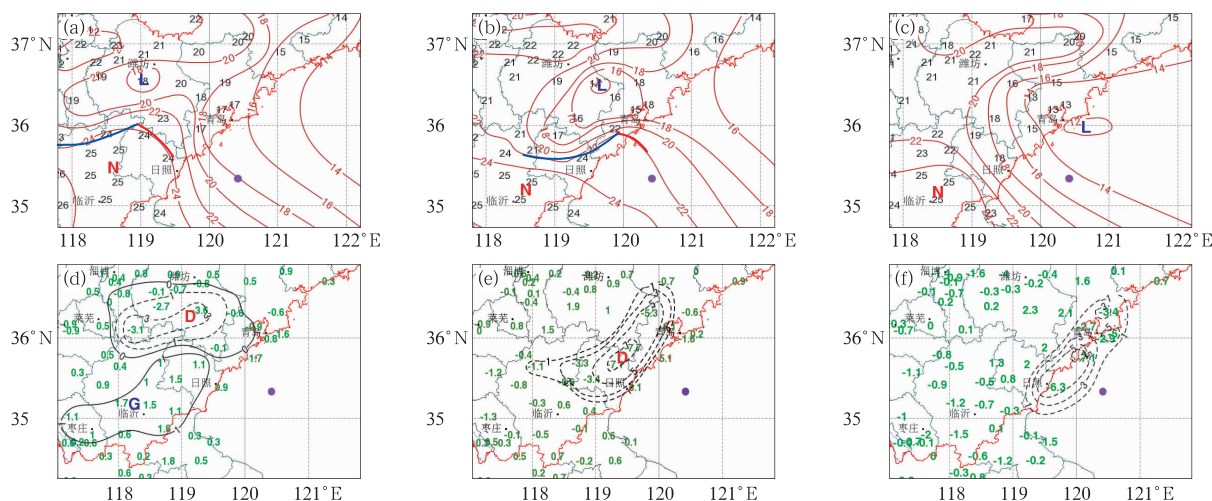


图 6 2021 年 4 月 29 日(a,d)14 时,(b,e)15 时,(c,f)16 时(a~c)地面 2 m 气温和(d~f)1 h 变温(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(蓝色粗实线:冷锋;红色粗实线:暖锋;红色细实线:等温线;黑色等值线:1 h 变温,
实线为正变温,虚线为负变温)

Fig. 6 (a—c) 2 m height temperature and (d—f) 1 h variable of temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) at

(a, d) 14:00 BT, (b, e) 15:00 BT, (c, f) 16:00 BT 29 April 2021

(blue thick solid line: the cold front; red thick solid line: warm front; red thin solid line: isotherm;
black contour: 1 h variable of temperature, solid line: positive, dashed line: negative)

在近地面气温处于上升的时间,冷池中心气温不但没有上升,反而 1 h 气温下降 3.6°C ,造成冷池与鲁东南暖脊(冷池的下游方向)之间空气密度差异显著增大,产生较大的密度流。

15 时,冷池中心向东南方向移到潍坊东南部到日照、青岛一带,中心最低气温只有 14°C (图 6b),1 h 负变温中心诸城站高达 -7.7°C (图 6e)。在日变化为正变温的时刻,出现这么大的负变温,导致冷池与其下游之间密度差快速增大,密度流强度增大。

16 时,冷池中心从青岛入海(图 6c),但从 1 h 变温可见,负变温中心移至黄岛和日照,黄岛站 1 h 变温为 -7.1°C ,而上一时次负变温中心诸城站本时次为正变温 2°C 。由此说明 15—16 时剧烈的负变温完全是由小尺度对流产生的冷池造成的,冷池所到之处剧烈降温,离开之处气温上升。

由此可见,在潍坊境内对流形成的地面冷池与日照暖温度脊之间形成强烈的温度梯度,产生较大的密度流,进而造成地面出现 10~13 级雷暴大风。由于初始对流形成的冷池在潍坊的中部,冷池在向南移动的过程中覆盖日照市全境,却只影响青岛市的南部沿海地区。其次,青岛受海洋影响较大,其沿海地区日最高气温明显低于日照,故青岛境内的锋区梯度比日照弱。因此青岛市 10 级以上雷暴大风的强度比日照弱,范围比日照小。

那么,如此之强的密度流是如何产生的?

3.4 蒸发降温

从前面的分析可知,诸城站 2 m 气温的降温幅度最大,1 h 降温高达 7.7°C 。从该站的时间-高度剖面(图 7a)可见,08—12 时该站上空 975~850 hPa 为位势不稳定层结,且低层的假相当位温 θ_{se} 随时间逐渐增大,说明低层大气的能量在逐渐增大。但低层相对湿度较小,饱和层位于 550~350 hPa。该站上空从 11 时开始有上升运动(图 7b),之后上升运动逐渐增强,直到 14 时,上升运动达到最强,最大上升速度为 $-2.5 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$;并且该站上空的水汽条件在本时次 700 hPa 有一个饱和层,而该层正好是 θ_{se} 暖脊的顶端(图 7a)。从雷达回波可见,上游雷达回波刚好此刻移至该站上空,导致该站 15 时、16 时先后出现 0.2 mm、0.4 mm 降水。

从上述分析发现,14 时之前尽管诸城站上空有垂直上升运动和不稳定层结,但由于水汽不饱和,故无法产生降水,直到上游降水回波移至本站上空时,才产生了弱降水。诸城出现降水的 14—16 时(图 7a 黑框区),900 hPa(图 7a 中黑色直线)以下相对湿度小于 60%。从该站相对湿度的时间演变可见,在降水未发生时刻 08—11 时,900~700 hPa 相对湿度低于 30%,12 时以后相对湿度逐渐增大,2 h 以后开始出现降水。这说明 900~700 hPa 大气本身非常干燥,本地湿度增大一方面由于天气尺度上

升运动造成的,另一方向是外地降水回波移入造成的。研究表明,水凝物重力向下的拖曳作用在下沉气流的启动中起了重要作用,但在随后的演化中,降水蒸发对下沉气流的加速作用远大于凝结物拖曳的加速作用(俞小鼎等,2020)。当700 hPa以上产生的降水粒子在下降过程中,受到干燥的环境大气影响,不断蒸发,在增加了700 hPa以下环境大气相对湿度的同时,也使环境空气的气温急剧下降,形成与周边环境大气温差较大的冷池。从诸城站气温的垂直分布(图7b)可见,13时880 hPa(图7b中黑色直线)以下气温开始下降,15时达到最低,冷池厚度为

120 hPa,持续时间为2 h。一般情况下天气尺度系统造成的降温持续时间更长,2 h的时间尺度应该是小尺度天气系统造成的降温。但冷池的垂直厚度高达120 hPa(超过1 km),足以说明冷池的强度较强。因此,由于对流层中低层大气干燥,高空水凝物降落过程中蒸发冷却,在近地面层形成一个水平尺度为100 km、垂直尺度为1 km的冷池。强烈的冷池从空中重直向下直冲地面,一方面产生很大的下落加速度造成下击暴流,另一方面在近地面产生强大的密度流。

从日照到青岛(图8a中棕色线)做15时垂直剖

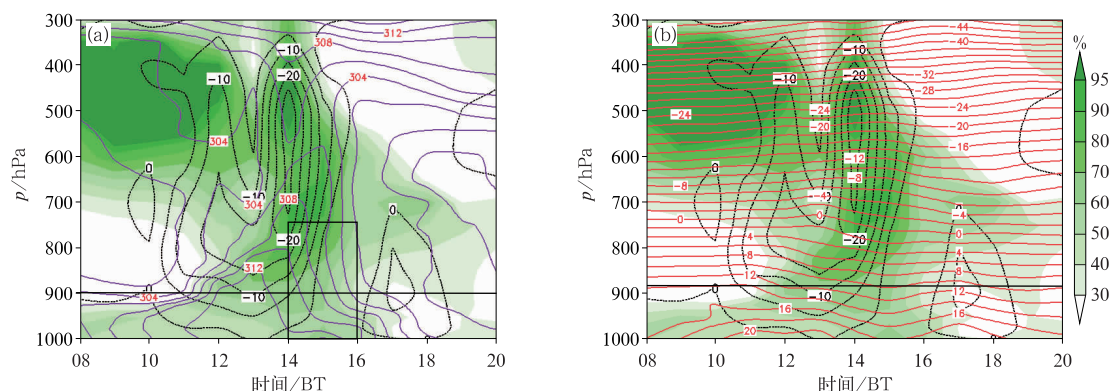


图7 2021年4月29日08—20时诸城站及气象要素的(a)假相当位温(紫色实线,单位:K), (b)气温(红色实线,单位:℃)时间-高度剖面(黑色虚线:垂直速度,单位: 10^{-3} hPa·s $^{-1}$; 填色:相对湿度)

Fig. 7 Time-height cross-section of (a) pseudo-equivalent potential temperature (purple solid line, unit: K), (b) air temperature (red solid line, unit: °C) and meteorological elements in Zhucheng Station from 08:00 BT to 20:00 BT 29 April 2021 (black dotted line: vertical velocity, unit: 10^{-3} hPa·s $^{-1}$; colored: relative humidity)

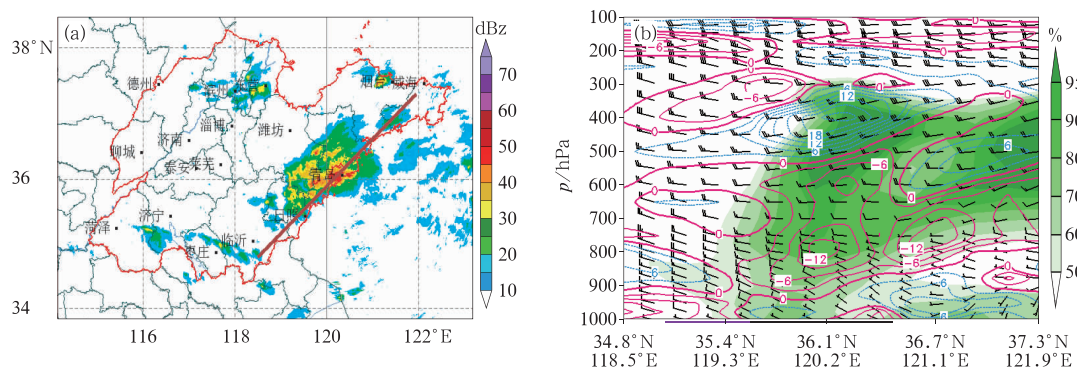


图8 2021年4月29日15时(a)组合反射率因子及(b)沿日照和青岛的剖面

(图8a中填色:组合反射率因子,棕色实线:图8b剖面位置。图8b中填色:相对湿度;等值线:散度,单位: 10^{-5} s $^{-1}$, 粉色等值线:辐合,蓝色等值线:辐散;风羽:水平风;紫色长方形:日照市,黑色长方形:青岛市)

Fig. 8 (a) Radar reflectivity and (b) vertical cross-section along Rizhao and Qingdao at 15:00 BT 29 April 2021 (in Fig. 8a, colored: reflectivity, brown line: the section position in Fig. 8b. in Fig. 8b, colored: relative humidity; contour: divergence, unit: 10^{-5} s $^{-1}$, pink: convergence, blue: divergence; barb: horizontal wind; purple rectangle: Rizhao City, black rectangle: Qingdao City)

面图(图 8b),青岛市上空 300 hPa 以下相对湿度大于 70%,其中 750~350 hPa 大于 90%,并且 950~550 hPa 为辐合,550 hPa 以上为辐散,形成低层辐合高层辐散的垂直结构,有利于青岛雷暴的发展(图 8a)。而日照市低层辐合较弱,整个对流层相对湿度小于 70%,并且整层为西北风,不利于雷暴发展,故当地雷暴较弱(图 8a)。但是,由于日照上空整个对流层均较干,降水粒子在下落过程中的蒸发作用大于青岛,增大了日照市冷池的强度。

3.5 多尺度系统叠加

对比图 1a 和图 2 可知,对流风暴主要位于潍坊、青岛和日照一带,对流风暴产生了 7~12 级雷暴大风,但在非对流区仍有 6~9 级大风。那么,什么原因造成了非对流区的大风? 对流区与非对流区的大风有何关系?

3.5.1 气旋的演变趋势

由于海上没有地面观测资料,故气旋分析主要根据 ERA5 逐小时再分析资料。29 日 08 时(图略)从内蒙古东部经河北省东北部、天津到河北省南部为一条东北—西南向的低压带,低压带内分别在内蒙古、天津和河北省南部各有一个闭合低中心。河北省南部的闭合低中心与本次大风有直接关系,故称其为气旋中心。气旋中心随时间逐渐向东南方向移动(图 9a),14 时气旋中心入海。之后气旋逐渐向偏东方向移动。气旋后部从河北省到山东省中西部地区为强大的冷高压。对比图 1a 和图 9a 可知,非

对流区域的大风是气旋及其后部的冷高压造成的系统性大风。

从气旋中心气压随时间演变可知(图 9b),其中中心气压从 08 时开始随时间逐渐降低,其中 12—13 时 1 h 气压下降幅度最大,1 h 变压高达 -1.4 hPa。之后中心气压继续下降,15 时中心气压达到最低 997.4 hPa,之后气压逐渐上升。山东省 14 时 3 h 变压的气候值为 $-2.0 \sim -1.0$ hPa(肖安和许爱华, 2018),故 1 h 变压的气候平均值为 $-0.7 \sim -0.3$ hPa。对比之下可知,“4·29”气旋在入海过程中 1 h 变压是气候平均值的 2.0~4.7 倍,增强速度非常快。可见气旋在入海过程中强度持续增强,入海后在 14—15 时强度达到最强,气旋后部在非对流区和对流区均产生了大风。

3.5.2 冷池小高压与大尺度气旋的叠加效应

29 日上午,山东省内陆地区气温逐渐上升,13 时形成了由鲁西南菏泽向东北方向伸展到潍坊的暖温度脊(图 10a),暖脊的顶端在潍坊南部为地面气旋中心。河北境内为冷高压中心。对流单体出现在地面辐合线后部北风区、暖脊顶端偏冷区一侧、气压梯度较大区域偏低压一侧。

14 时(图 10b),随着雷暴的发展,在潍坊市安丘形成一个 18°C 冷中心。此时鲁东南从临沂到日照一带由于日变化正处于气温上升期,因此在安丘与诸城之间(两站间距为 52 km)出现 5°C 的温度梯度,形成 $9.6^{\circ}\text{C} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ 的温度锋区,造成两站之间气压梯度增大。同时可以发现,此时的地面气旋

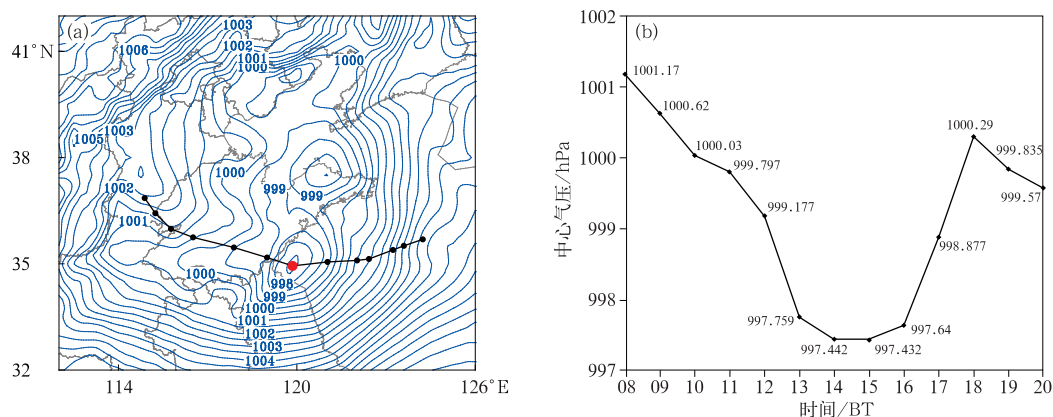


图 9 2021 年 4 月 29 日(a)14 时海平面气压(圆点:08—20 时逐小时气旋中心位置,红色圆点:14 时气旋中心位置), (b)08—20 时气旋中心气压演变

Fig. 9 (a) Sea level pressure at 14:00 BT (dot: position of cyclone center from 08:00 BT to 20:00 BT, red dot: the first position after entering sea at 14:00 BT), (b) evolving tendency of cyclone central pressure from 08:00 BT to 20:00 BT 29 April 2021

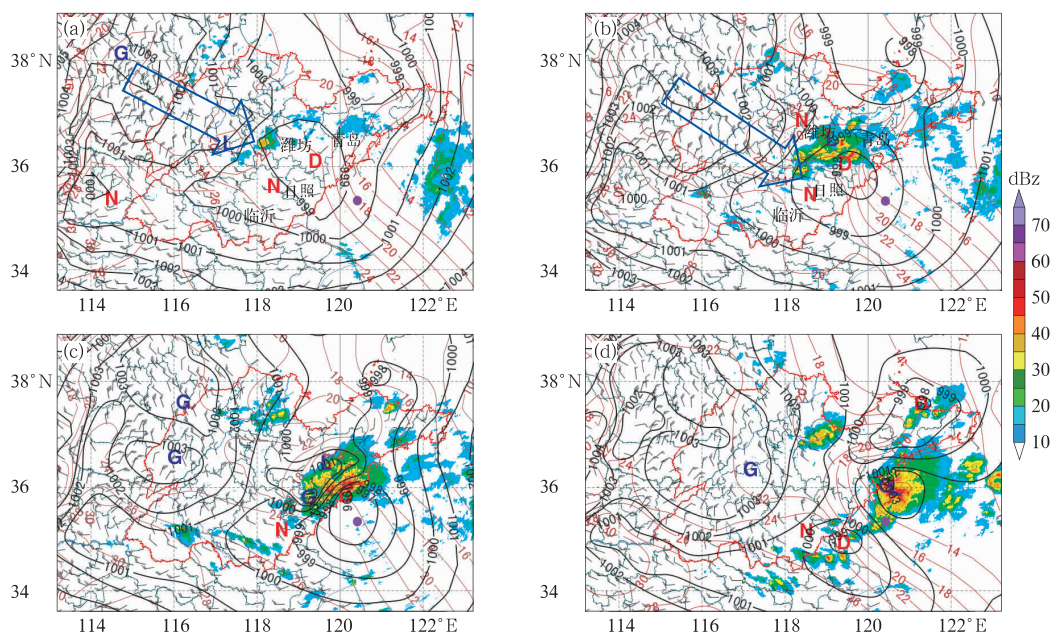


图 10 2021 年 4 月 29 日 (a) 13 时, (b) 14 时, (c) 15 时, (d) 16 时地面 2 m 气温 (红色细实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、海平面气压 (黑色粗实线, 单位: hPa)、10 m 风 (风羽) 和组合反射率因子 (填色) (L: 冷中心, N: 暖中心)

Fig. 10 The 2 m height temperature (red thin line, unit: $^{\circ}\text{C}$), sea level pressure (black thick line, unit: hPa), 10 m height wind (barb) and radar reflectivity factor (colored) at (a) 13:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 15:00 BT, (d) 16:00 BT 29 April 2021 (L: cold center, N: warm center)

中心移至潍坊、青岛和日照交界处, 气旋中心正好位于诸城附近。对比图 10a 和 10b 可见, 来自河北的冷高压自西北向东南直冲日照而来。因此天气尺度高低压之间的气压梯度大值区以及小尺度的冷池小高压与环境气温之间形成的锋区正好叠加在一起, 造成冷池前沿气压梯度快速增大。从 1 h 变压 (图 11a) 可见此时在潍坊西部到淄博南部为 1.5 hPa 的正变压中心, 而黄岛 (位于青岛西南部沿海, 紧临日照东北部沿海) 为 -1 hPa 的负变压中心, 形成由正变压中心指向负变压中心的变压风 (西北风)。

15 时 (图 10c), 地面冷池向东南方向移动, 范围扩大, 16 $^{\circ}\text{C}$ 的闭合冷中心东西横跨近 100 km。冷池中心 14.3 $^{\circ}\text{C}$ 位于高密, 该站 1 h 降温幅度高达 -5.3 $^{\circ}\text{C}$, 其西南侧的诸城站 1 h 降温幅度高达 -7.7 $^{\circ}\text{C}$ 。与冷池中心相配合形成了一个中心为 1002.3 hPa 的小高压。此时入海气旋的中心位于青岛市的黄岛, 中心气压为 996 hPa, 与冷池小高压中心五莲之间的气压梯度高达 8.4 hPa $\cdot$ 100 km $^{-1}$ 。从

图 10c 还可以看到, 大尺度的冷高压中心位于河北与山东交界处, 高压中心为 1003 hPa。对照图 10a ~ 10b 可见, 大尺度高压前沿 1001 hPa 等值线的移动速度小于 100 km $\cdot$ h $^{-1}$ 。大尺度天气系统造成的 1 h 变压小于 1 hPa (图 11b), 而冷池小高压造成正变压中心位于潍坊南部到日照东北部, 日照市的五莲站 1 h 变压高达 3.9 hPa, 远远大于大尺度天气系统的变压幅度。同时由于受气旋影响, 黄岛站 1 h 变压为 -1.8 hPa, 两站之间的变压梯度高达 7.6 hPa $\cdot$ 100 km $^{-1}$, 形成强烈的变压风。此时气旋中心已入海, 但由于海上没有测站, 无法知道气旋中心准确的气压值, 实际的变压梯度可能大于 7.6 hPa $\cdot$ 100 km $^{-1}$ 。2018 年 3 月 3 日受飚线影响, 浙江、安徽和江西出现大范围雷暴大风, 最大风 63.9 m $\cdot$ s $^{-1}$ (17 级) 出现在江西鄱阳湖珠湖联圩, 地面最强 1 h 变温高达 -15 ~ -10 $^{\circ}\text{C}$, 形成最强超过 5 hPa 的 1 h 正变压 (沈杭锋等, 2019)。“4 $\cdot$ 29” 强对流的尺度和强度均小于该过程, 但 1 h 变温和变压分别高达 -7.7 $^{\circ}\text{C}$ 、-3.9 hPa, 加之下游气旋产

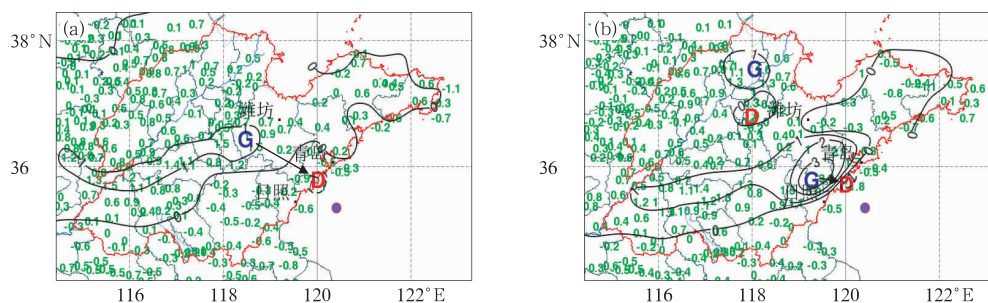


图 11 2021 年 4 月 29 日(a)14 时,(b)15 时海平面气压 1 h 变压

(箭头:变压风方向)

Fig. 11 The 1 h variable of sea level pressure at (a) 14:00 BT and (b) 15:00 BT 29 April 2021

(arrow: direction of alobaric wind)

生的负变压,造成强烈的变压梯度。可见,对流产生的冷池小高压与大尺度气旋之间的气压梯度剧烈增大,形成强烈的自西北指向东南的密度流,增强了雷暴大风的强度,造成在日照及其沿海一带出现 10~13 级雷暴大风。

由于青岛南部沿海处于气旋东北象限,仍处于减压阶段,而日照处于气旋后部的西北象限,大尺度的增压与小尺度的冷池小高压增压在日照境内叠加,造成日照境内的密度流大于青岛。

16 时(图 10d),冷池小高压入海,原入海气旋被小高压冲击断裂为两部分,一部分位于日照沿海(仍称其为入海气旋),与入海小高压之间形成强气压梯度。黄岛与日照之间温度梯度为 $5.0^{\circ}\text{C} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ 。此时气压梯度的方向由原来在陆地上的西北—东南向转为东北—西南向,意味着密度流的方向将发生改变。也就是说,随着小高压由陆地进入海洋,风的方向将逐渐由西北风转为偏北或东北风。而此时位于近海的渔船如果正好处于大风的转向阶段,渔船的不稳定性增大,大大增大了渔船翻扣的可能性。

综上所述,气旋入海过程中强度逐渐增强,进入日照海域时强度达到最强。由于对流产生的地面冷池造成气温剧烈下降,在地面形成冷池小高压,冷池小高压刚好处于大尺度气旋后部的日照境内。一方面气旋在入海过程中强度增强,气压快速下降,另一方面冷池造成气压剧烈上升,故小尺度冷池高压与大尺度气旋造成的减压刚好无缝衔接,造成二者之间的气压梯度迅速增大,产生强烈的密度流。由于气旋本体能产生 6~9 级大风,再叠加冷池密度流,造成日照境内及沿海产生 10~13 级雷暴大风。另外,冷池小高压入海后气压梯度方向转变造成风

向发生旋转,增加了渔船翻扣的风险。青岛发生对流时正处于气旋的减压阶段,故青岛市的密度流比日照弱。

3.6 高空动量下传

对流风暴后部的中层入流加强下沉气流,是形成地面大风的重要原因(梁建宇和孙建华,2012)。对流系统内的下沉气流可以将水平动量从高层带到低层,在近地面产生较强的辐散气流(张琳娜等,2018;张哲等,2018)。从图 3a 可见 08 时 500 hPa 冷涡后部强盛的西北气流从 50°N 以北地区一直向南直冲到长江下游以北地区,最大风速轴中心风速高达 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且最大风速轴直接向着山东中部移动。在这种强盛西北气流引导下,青岛雷暴及其南侧阵风锋的移动速度较快,移速高达 $76 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),导致地面产生强度较大的大风。对流层西北风风速较大,下沉气流中的降水粒子随着雷暴一起移动,同时还拖曳着一些带着同样动量的周边环境的空气,下落到地面时会把西北风的动量带到地面附近,增大下沉气流的强度。当水平速度的分量存在 $\partial u / \partial z > 0$,且垂直速度 $\omega > 0$,即产生动量下传(朱男男和刘彬贤,2015)。利用 ERA5 再分析资料计算 $\partial u / \partial p < 0$ 与 $\omega > 0$ 的叠加区域即为动量下传区。本次过程中日照境内最大风出现在叩官站,沿叩官站做时间-高度剖面图(图 12a)发现,13—17 时,该站上空 300 hPa 以下 $\partial u / \partial p$ 均为负值,因此动量下传主要取决于下沉运动。14 时,该站上空为气旋造成的上升运动区,但在近地面已开始出现弱的下沉运动。15 时,该站上空下沉运动增强,800 hPa 以下以及 450~300 hPa 均处于下沉运动

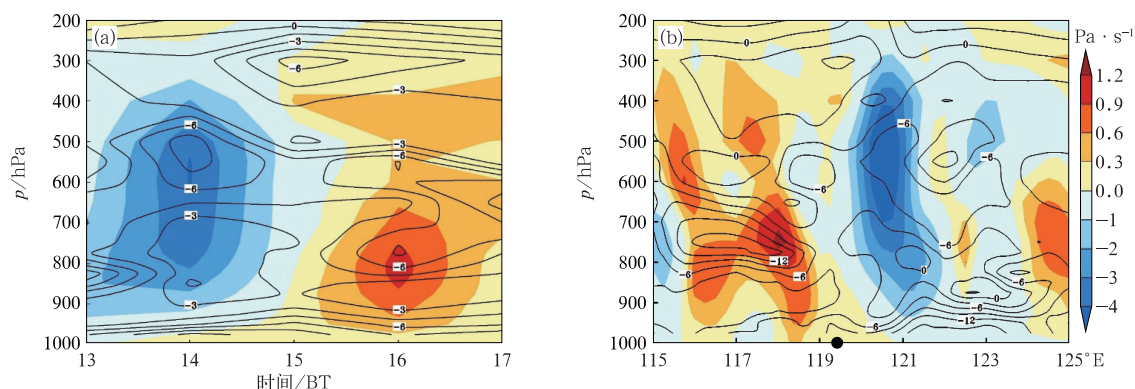


图12 2021年4月29日(a)叩官站13—17时的时间-高度剖面,(b)15时沿叩官站纬向剖面

(填色:垂直速度,正值:下沉运动,负值:上升运动;

等值线: $\partial u/\partial p$,单位: $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$;图12b中,黑色圆点:叩官站)

Fig. 12 (a) Time-altitude cross-section from 13:00 to 17:00 BT at Kouguan Station and

(b) zonal cross-section along Kouguan Station at 15:00 BT 29 April 2021

(colored: vertical velocity, positive value: descending motion, negative value: ascending motion;

contour: $\partial u/\partial p$, unit: $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$; in Fig. 12b, black dot: Kouguan Station)

控制,800~450 hPa 虽然为上升运动,但上升运动强度明显减弱。因此,从15:00开始该站上空上升与下沉运动并存,下沉运动逐渐增强,上升运动逐渐减弱,说明动量下传开始起作用。15:00以后下沉运动强度增强,16:00达到最强,且下沉运动扩展到整个对流层,最大下沉运动中心($0.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)位于800 hPa,与 $-7.5 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 的 $\partial u/\partial p$ 大值中心重合,说明此时动量下传强度达到最强。从雷暴大风出现的时间分析,叩官站最大风速($33.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)出现时间为14:55,次大风速($24.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)出现时间为15:05。16:00动量下传作用最强时,叩官站的风力已明显减弱,那么动量下传对叩官大风起作用了吗?沿着叩官站做15:00纬向剖面图可见(图12b),虽然此刻该站上空下沉运动较弱,但其上游(西侧)下沉运动贯穿整个对流层,并且除了600~500 hPa较薄的一层外,整个对流层均处于 $\partial u/\partial p < 0$ 的状态。与 $\partial u/\partial p < 0$ 的大值中心相对应的也是下沉运动的大值中心,最大下沉速度 $0.9 \sim 1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $-12 \times 10^{-4} \sim -6 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 的 $\partial u/\partial p$ 大值中心在800~700 hPa重合,说明此处动量下传作用最强。大于 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉运动区随着高度下降自西向东倾斜,说明粒子从高空下落过程中,会随着西风自西向东移动,从而将高空动量向其下游地区的近地面传递,实现高空动量下传。高空动量到达近地面后,又随着冷池密度流继续向下游地区推进,造成叩官

站12级雷暴大风。因此,动量下传在此次日照及其沿海10级以上雷暴大风过程中起到一定的促进作用。

4 结 论

通过对“4·29”山东近海10级以上雷暴大风的分析发现,快速移动的阵风锋、强烈的密度流、蒸发降温、多尺度天气系统叠加、高空动量下传等多种因素共同导致了此次10~13级雷暴大风事件。

东北冷涡后部强盛的西北气流携带干冷空气叠加在低层暖温度脊之上,强烈的位势不稳定层结和垂直风切变等条件有利于山东省产生强对流天气。阵风锋持续时间超过90 min,移动速度为 $76 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),造成所经之地产生10~13级雷暴大风。

对流层中低层大气干燥,高层水凝物下落过程中蒸发降温,增大了环境空气温度直减率,一方面增大了粒子下落加速度,形成下击暴流,另一方面地面冷池降温剧烈,冷池厚度高达120 hPa,与鲁东南环境大气暖温度脊之间产生强的密度流,增大了雷暴大风的强度。另外,在高空强劲的西北风引导气流作用下,一方面青岛雷暴和阵风锋平流速度较快,另一方面高空动量下传,增大了下沉气流的角动量。

气旋入海过程中强度增强,小尺度冷池造成的加压与大尺度气旋造成的减压无缝衔接,二者之间

的气压梯度增大,形成自西北指向东南的变压风,与密度流叠加,造成地面大风强度增强。冷池小高压入海后气压梯度方向转变造成风向发生旋转,增加了渔船翻扣的风险。

本例中造成山东近海 10 级以上雷暴大风的青岛雷暴主体位于青岛境内,雷暴主体在青岛境内和近海产生了 8~11 级雷暴大风,而处于风暴边缘的日照及其近海却出现了 8~13 级雷暴大风,且日照市 10 级以上雷暴大风的站数远远多于青岛市。首先,在潍坊境内形成的小尺度冷池向南移动过程中,覆盖日照全境而只影响到青岛的南部沿海地区。其次,青岛受海洋影响大,沿海地区日最高气温远远低于日照,冷池与日照境内的暖温度脊之间的温度梯度远远大于青岛。第三,日照上空空气干燥,蒸发作用导致的冷却程度大于青岛,导致日照境内的冷池强度大于青岛。第四,日照境内小尺度的冷池加压与大尺度气旋后部的增压叠加,与气旋的减压区形成强烈的变压风。而青岛发生对流时受气旋影响处于减压阶段,故锋区梯度和密度流强度均比日照弱。以上四种因素综合作用,导致青岛的雷暴大风范围比日照小,强度比日照弱。在日常业务中,预报员主要的关注对象是对流风暴所经地区,对于雷暴边缘或弱雷暴影响区域,容易漏报或预报量级偏小。通过本例的分析发现,雷暴边缘地区产生的大风强度大于雷暴主体区域,多尺度系统叠加和蒸发等起到重要作用。因此,加强对此类案例的分析总结,能加强预报员对于此类雷暴大风的认识,提高雷暴大风的预报能力。

参考文献

- 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).
- 高晓梅,马守强,王世杰,等,2018. 山东两次强对流天气雷达特征及环境场对比[J]. 气象科技,46(6):1188-1200. Gao X M, Ma S Q, Wang S J, et al, 2018. Comparative analysis of radar features and environmental backgrounds of two severe convective weather events in Shandong[J]. Meteor Sci Technol, 46(6):1188-1200(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J]. 气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4):483-495(in Chinese).
- 康岚,刘炜桦,肖递祥,等,2018. 四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J]. 气象,44(11):1414-1423. Kang L, Liu W H, Xiao D X, et al, 2018. Analysis on formation reason and forecast of an extreme gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 44(11):1414-1423(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).
- 马鸿青,张江涛,李彦,等,2019. 河北保定“7.9”致灾雷暴大风环境场与风暴特征[J]. 干旱气象,37(4):613-621. Ma H Q, Zhang J T, Li Y, et al, 2019. Environmental field and storm features of a destructive thunderstorm gale in Baoding of Hebei Province on 9 July 2017[J]. J Arid Meteor, 37(4):613-621(in Chinese).
- 梅婵娟,张灿,许可,等,2020. 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,40(2):131-139. Mei C J, Zhang C, Xu K, et al, 2020. Observational analysis of downburst by a pulse storm in autumn in Shandong Peninsula[J]. J Mar Meteor, 40(2):131-139(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).
- 孙虎林,罗亚丽,张人禾,等,2011. 2009 年 6 月 3—4 日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析[J]. 大气科学,35(1):105-120. Sun H L, Luo Y L, Zhang R H, et al, 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3—4 June 2009[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1):105-120(in Chinese).
- 万夫敬,江敦敦,赵传湖,2018. 2017 年 8 月 6 日山东罕见雷暴大风成因分析[J]. 海洋气象学报,38(2):60-66. Wan F J, Jiang D S, Zhao C H, 2018. Analysis of an unusual thunderstorm gale in Shandong on 6 August 2017[J]. J Mar Meteor, 38(2):60-66(in Chinese).
- 万夫敬,孙继松,孙敏,等,2021. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. 气象学报,79(5):717-731. Wan F J, Sun J S, Sun M, et al, 2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):717-731(in Chinese).
- 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等,2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报,27(3):342-351. Wang F X, Yu X D, Pei Y J, et al, 2016. Radar echo characteristics of thunderstorm

- gales and forecast key points in Hebei Province[J]. J Appl Meteor Sci, 27(3):342-351(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 等, 2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象, 31(2):504-514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al, 2012. Study on the formation and evolution of ‘6.3’ damage wind[J]. Plateau Meteor, 31(2):504-514(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).
- 王亚男, 刘一玮, 易笑园, 2020. 渤海西部雷雨大风统计特征及对流参数指标分析[J]. 气象, 46(3):325-335. Wang Y N, Liu Y W, Yi X Y, 2020. Statistical characteristics and convection indexes of thunderstorm and gale over western Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 46(3):325-335(in Chinese).
- 王艳兰, 王娟, 伍静, 等, 2021. 桂林市 2019 年“3.21”极端大风与“4.24”致灾冰雹过程特征对比分析[J]. 热带气象学报, 37(2):175-185. Wang Y L, Wang J, Wu J, et al, 2021. Comparative analysis of characteristics of “3.21” extreme gale and “4.24” hailstorm in Guilin in 2019[J]. J Trop Meteor, 37(2):175-185(in Chinese).
- 吴福浪, 虞本颖, 钱峰, 等, 2021. 宁波机场一次脉冲风暴天气过程分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 32(2):52-55. Wu F L, Yu B Y, Qian F, et al, 2021. Analysis on a pulse storm weather process at Ningbo Airport[J]. J Civ Aviat Flight Univ China, 32(2):52-55(in Chinese).
- 肖安, 许爱华, 2018. 三小时负变压异常指数及对强对流天气的预报意义[J]. 气象学报, 76(1):78-91. Xiao A, Xu A H, 2018. Three hours negative pressure anomaly index and its significance in severe convective weather forecast[J]. Acta Meteor Sin, 76(1):78-91(in Chinese).
- 杨波, 孙继松, 刘鑫华, 2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. 气象学报, 77(3):427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):427-441(in Chinese).
- 杨璐, 陈明轩, 孟金平, 等, 2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 44(6):802-813. Yang L, Chen M X, Meng J P, et al, 2018. Radar statistical characteristics and warning lead analysis of thunderstorm gales in different life periods in Beijing[J]. Meteor Mon, 44(6):802-813(in Chinese).
- 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7):769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社:298-299, 295. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting [M]. Beijing:China Meteorological Press:298-299, 295(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京:气象出版社:155. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Application [M]. Beijing:China Meteorological Press:155(in Chinese).
- 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等, 2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 42(1):178-191. Zhang L N, Ran L K, Li N, et al, 2018. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):178-191(in Chinese).
- 张琴, 张晓, 孟伟, 等, 2018. 山东连续两次强对流天气的环境条件和多普勒雷达特征[J]. 干旱气象, 36(3):465-474. Zhang Q, Zhang X, Meng W, et al, 2018. Environmental conditions and Doppler radar characteristic of two consecutive severe convection weather in Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 36(3):465-474(in Chinese).
- 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等, 2016. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing county, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 张哲, 周玉淑, 高守亭, 2018. 一次辽东湾飊线过程的观测与数值模拟分析[J]. 大气科学, 42(5):1157-1174. Zhang Z, Zhou Y S, Gao S T, 2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China [J]. Chin J Atmos Sci, 42(5):1157-1174(in Chinese).
- 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 等, 2016. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象, 42(11):1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 42(11):1289-1303(in Chinese).
- 周康辉, 郑永光, 王婷波, 等, 2017. 基于模糊逻辑的雷暴大风和非雷暴大风区分方法[J]. 气象, 43(7):781-791. Zhou K H, Zheng Y G, Wang T B, et al, 2017. Fuzzy logic algorithm of thunderstorm gale identification using multisource data[J]. Meteor Mon, 43(7):781-791(in Chinese).
- 朱男男, 刘彬贤, 2015. 一次引发黄渤海大风的爆发性气旋过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 31(6):59-67. Zhu N N, Liu B X, 2015. Diagnostic analysis of outbreak cyclone induced strong wind over Yellow and Bohai Seas[J]. J Meteor Environ, 31(6):59-67(in Chinese).
- 朱义青, 高安春, 2021. 山东一次飊线过程的闪电特征和大风形成机制分析[J]. 气象科学, 41(2):191-199. Zhu Y Q, Gao A C, 2021. Analysis of lightning characteristics and formation mechanism of strong wind in a squall line in Shandong[J]. J Meteor Sci, 41(2):191-199(in Chinese).
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 7(4):588-612.

(本文责编:王婷波)