陈宇,杨磊,王瀛,等.2024.东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析[J].暴雨灾害,43(6):693-701. CHEN Yu, YANG Lei, WANG Ying , et al. 2024. Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex [J]. 43(6):693-701 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-231

东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析

陈宇[1],杨磊[1],王瀛[1],金博[2],李萍[3,4],曹世腾[1],杨雪[1],刘硕[4]

(1.辽宁省气象灾害监测预警中心,沈阳 110166;2.沈阳市浑南区气象局,沈阳 110168;3.中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205;4.辽宁省气象台,沈阳 110166)

摘 要: 2022年6月25日傍晚辽宁省出现以雷暴大风为主的强对流天气,全省82个区域自动气象站出现8级以上雷暴大风,其中辽宁省北部的沈阳市马三家站阵风达13级(39.1 m·s^{-1}),致灾严重。利用2022年6月25日17:00—22:00(北京时)辽宁省1 668个区域自动气象站分钟级观测资料及常规探空、双偏振雷达、ERA5再分析等资料,对此次雷暴大风天气成因进行分析研究。结果表明:(1) 此次过程发生在东北冷涡背景下,辽宁处于冷涡西南象限,有利于冷涡西侧干冷空气与低层暖湿空气交汇。(2) 沈阳探空曲线呈低层暖干、中低层暖湿、中高层干冷的"X"型特征,且具有较强的垂直风切变,利于雷暴大风天气发生。(3) 此次过程雷达回波发展演变与经典弓形回波演变模型一致,初期孤立风暴导致局地大风,之后多单体风暴逐渐合并为弓形回波。在负浮力、动量下传和冷池密度流等共同作用下,沈阳城区出现大范围雷暴大风。(4) 弓形回波前沿存在浅薄的低空γ中尺度涡旋,低空涡旋旋转在近地面形成扰动低压导致下沉气流加强,涡旋与后侧入流急流共同作用导致雷暴大风出现。

关键词: 东北冷涡;雷暴大风;弓形回波;γ中尺度涡旋

中图法分类号: P458.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12406/byzh.2023-231

Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex

CHEN Yu[1], YANG Lei[1], WANG Ying[1], JIN Bo[2], LI Ping[3,4], CAO Shiteng[1], YANG Xue[1], LIU Shuo[4]

(1. *Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Warning Center, Shenyang* 110016; 2. *Shenyang Hunnan District Meteorological Bureau, Shenyang* 110168; 3. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205; 4. *Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang* 110016)

Abstract: Strong convective weather dominated by thunderstorm strong winds appeared in Liaoning Province in the evening of 25th June 2022. Eighty-two automatic weather stations across the province recorded thunderstorm strong winds of magnitude 8 or above. Among them, the Ma Sanjia Station in the northern part of Shenyang City, Liaoning Province, recorded wind speeds of 13 on the Beaufort scale (39.1 m·s^{-1}), resulting in severe damage. By utilizing the minute-level observational data from automatic weather stations in Liaoning Province on June 25 from 17:00 BT to 22:00 BT, as well as conventional radiosonde, dual-polarization radar, and data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 reanalysis, an analysis and study were conducted on the formation mechanism of this thunderstorm strong wind event. The results are as follows. (1) Liaoning is located at the southwest quadrant of the northeast cold vortex, where the cold dry air on the western side of the vortex converged with warm moist air in the northern part of Liaoning Province on the evening of the 25th. (2) The Shenyang sounding curve exhibits a low-level warm and dry layer, a mid-low-level moist layer, and a mid-high-level dry and cold layer with an "X" shaped pattern. Additionally, it features strong vertical wind shear, which creates favorable conditions for the occurrence of se-

收稿日期: 2023-10-31;**定稿日期:** 2024-04-15

资助项目: 中国气象局复盘专项(FPZJ2023-030, FPZJ2024-027);中国气象局青年创新团队(CMA2024QN05);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J059, CXFZ2023J013, CXFZ2024J021);中国气象局流域强降水重点开放实验室开放课题(2023BHR-Y21);辽宁省气象局年度基金项目(202301)

第一作者: 陈宇,主要从事天气预报、短临天气预警及其相关方法研究。E-mail: chenyu1018@163.com

通信作者: 王瀛,主要从事短时临近预报预警技术研究。E-mail: lnqxt_wy@sina.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

vere convective weather. (3) The evolution of radar echoes in this process is consistent with the evolution of classic bow echoes; isolated thunderstorms in the initial stage lead to locally strong winds. Subsequently, multiple individual storms gradually merge into a bow echo. The interaction of negative buoyancy, momentum transport, and cold pool density currents collectively results in widespread thunderstorm winds in the Shenyang urban area. (4) Along the leading edge of the bow echo, shallow low-level gamma scale cyclones are present. The rotation of low-level cyclones forms perturbation low pressure near the ground, enhancing the downdraft, while the cyclones interact with the strong inflow jet on the rear side, leading to locally strong thunderstorm winds.

Key words: Northeast cold vortex; thunderstorm wind; bow echo; γ mesoscale vortex

引 言

雷暴大风是指伴随雷暴而出现,风速达到17.2 m·s^{-1}(风力8级)以上的瞬时大风(俞小鼎和郑永光,2020),极易造成严重的人员伤亡和财产损失(孙晓磊,2023)。其形成机制复杂,可由风暴的强下沉气流造成,也与冷池密度流、高空动量下传和上升气流的抽吸等作用有关(王秀明等,2012)。弓形回波是造成雷暴大风的主要风暴类型(俞小鼎等,2020;Lovell et al.,2022)。由于弓形回波具有突发性强、强度大、天气变化剧烈等特点,因此,与弓形回波相关的雷暴大风(Ma et al.,2021a)一直是强对流天气研究的重点和难点。

针对弓形回波大风的形成机制,Fujita(1978)首先提出弓形回波发展演变的概念模型,并进一步指出弓形回波形态演变与其不同阶段、不同位置上的雷暴大风存在密切关系,致灾雷暴大风主要出现在弓形回波的中间部分和左侧部分(王秀明等,2012)。大范围或普通雷暴大风发生的雷达特征通常表现为后侧入流急流、中层径向辐合和低仰角径向速度大(孙继松,2023)。弓形回波前沿常存在低空的γ中尺度涡旋(称为中涡旋),当γ中尺度涡旋与弓形回波后侧的入流急流线性叠加,可产生更极端的雷暴大风(孙继松,2023)。强冷池密度流在弓形回波大风的产生中具有重要作用,是极端大风产生的重要原因(王秀明等,2012;Zhou et al.,2022)。最近的模拟研究发现,弓形回波中的γ中尺度涡旋是造成小范围强风的主要系统(Schenkman and Xue,2016);Ribeiro (2022)对γ中尺度涡旋的形成机理以及地面强风的原因进行了研究,为弓形回波致灾大风的短临预报预警提供了依据。

辽宁省位于中国东北地区南部,东北冷涡是导致辽宁雷暴大风的主要影响系统(杨磊等,2023)。东北冷涡背景下具有较强的天气尺度强迫和有利于强对流天气发生的环境条件(乔娜等,2021);冷涡背景下中层干冷气流叠加在低层西南暖湿气流之上,因此有利于强对流天气的发生(许长义,2023);中层较强干空气和逆温层以下接近干绝热的温度递减率有利于吉林极端雷暴大风产生(王婷婷,2023)。辽宁省冷涡雷暴大风主要集中分布在辽宁中部平原,春秋季雷暴大风对应不同层温差、垂直风切变强和风暴承载层风速较大等特征;盛夏雷暴大风发生对应水汽条件充沛,中层干空气侵入和热对流特征明显(曹世腾等,2023)。

2022年6月25日在东北冷涡背景下,东北地区尤其是辽宁北部出现了以雷暴大风为主的强对流天气,出现了罕见的风速达39.1 m·s^{-1} (13级)的雷暴大风,造成多处农作物倒伏甚至绝收。因此,利用区域自动气象站分钟级观测数据以及常规探空、双偏振雷达、ERA5再分析等资料,分析此次东北冷涡背景下雷暴大风发生发展的大尺度环境条件,及弓形回波不同发展阶段风暴环境和结构演变特征,重点揭示沈阳马三家站极端大风的成因机制。以期为东北冷涡背景下雷暴大风天气预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

使用资料包括: (1) 2022年6月25日辽宁省1 668个区域自动气象站逐分钟级自动气象站资料及常规探空,包括气温、气压、相对湿度、风向风速等气象要素; (2) 沈阳站SC雷达和营口站双偏振雷达(距离沈阳站约140 km)资料。沈阳雷达在此期间采用VCP21体扫模式,产品分辨率250 m,天线高度293 m。营口雷达在此期间的体积扫描模式为VCP21,扫描仰角为0.5°、1.5°、2.5°、3.3°、4.4°、6.1°、9.9°、14.6°和19.5°,共9个仰角,体扫周期约6 min。雷达天线高度171 m,产品分辨率为250 m,15 km范围内的方位角波束宽度为250 m,0.5°仰角雷达波束。所使用的双偏振雷达产品包括水平极化反射率因子(ZH)、多普勒径向速度(V)、速度谱宽(SW)、差分反射率(ZDR)、相关系数(CC)及比差分相移(KDP)。使用Gibson-Ridge Analyst第2版(GR2 Analyst2.0)雷达产品显示系统对包括双偏振参量的雷达数据产品进行分析;(3) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析资料(ERA5),水平分辨率为0.25×0.25°,时间分辨率为1 h,垂直方向上共有37层,具有位势高度、气温、风向风速、相对湿度、比湿、散度、垂直速度等气象要素。

1.2 研究方法

首先,利用常规天气图及ERA5再分析资料分析

天气尺度环流背景，探讨雷暴大风发生发展的大尺度环境条件；其次，利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、自动气象站观测资料，分析雷达回波、垂直风场、冷池密度流特征，得出弓形回波不同发展阶段风暴环境和结构特征，重点揭示沈阳市马三家站13级雷暴大风形成原因；最后，通过自动气象站逐分钟气象资料，分析局地雷暴大风形成前后气象要素演变。

2 强对流天气实况

2022年6月25日18:00—22:00 (北京时，下同)，辽宁省北部出现雷暴大风、冰雹和短时强降水等强对流天气(图1a)。全省共有76个自动气象站出现短时强降水；沈阳地区及辽宁北部局部出现冰雹；全省82个自动气象站出现8级以上雷暴大风，其中13个站出现10级雷暴大风，3个站出现11级雷暴大风，1个站出现13级雷暴大风(图1b)。6月25日20:00之前，雷暴大风影响范围较小，且影响站点分布较分散，而20:00之后，雷暴大风影响范围迅速增大。此次过程特点之一是大风强度较强，20:00—21:00有9个自动气象站阵风达10级，20:27沈阳马三家街道站出现13级雷暴大风(风速39.1 m·s^{-1}) (杨磊和郑永光，2023)，较为罕见。

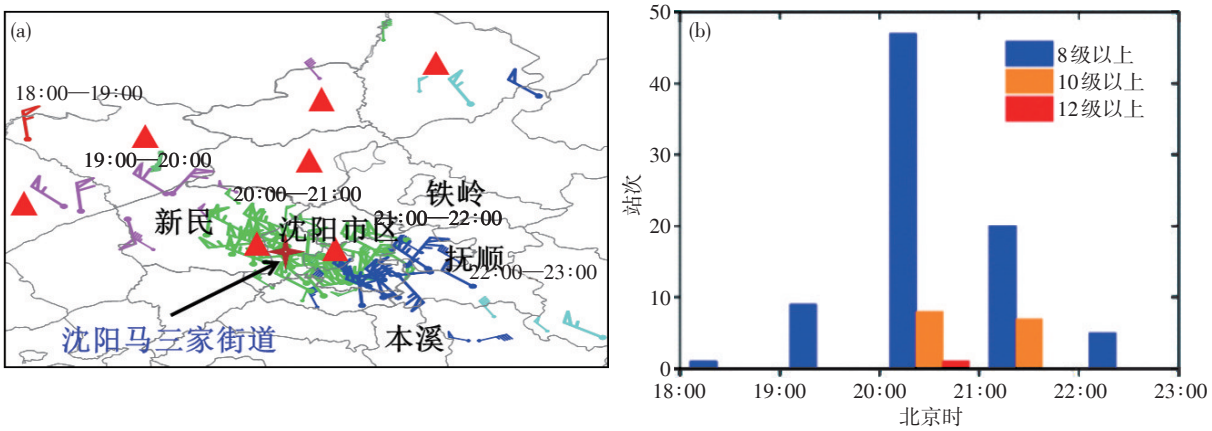


图1 2022年6月25日18:00—22:00辽宁省北部雷暴大风风场和冰雹位置分布图(a,雷暴大风风矢用不同颜色表示，风向杆颜色表示雷暴大风出现时段,红色代表18:00—19:00，紫色代表19:00—20:00,绿色代表20:00—21:00，蓝色代表21:00—22:00，淡蓝色代表22:00—23:00；红色实心三角为冰雹落区)、2022年6月25日18:00—23:00辽宁省8级以上大风逐小时站次演变图(b)

Fig. 1 (a) Real-time observation of thunderstorm strong winds and hail from 18:00 BT to 22:00 BT on the 25 June 2022 (the color of the wind vane indicates the time of occurrence of thunderstorm strong winds, red represents 18:00 BT-19:00 BT, purple represents 19:00 BT-20:00 BT, green represents 20:00 BT-21:00 BT hours, blue represents 21:00 BT-22:00 BT, light blue represents 22:00 BT-23:00 BT and (b) the number of occurrences of strong winds per hour

3 环流背景和风暴系统演变

3.1 环流背景

2022年6月25日17:00，东北冷涡东移至鄂霍次克海以南，辽宁位于冷涡中心的西南象限，高空冷涡携带冷空气南下，傍晚前在辽宁北部与暖湿气流交汇(图2a)，因此辽宁北部的天气尺度强迫较南部更强。沈阳温湿廓线具有“X型”特征(图2b)，即边界层(900 hPa)为暖干气团，呈干绝热特征，中低层(850—650 hPa)为湿层，中高层(650—400 hPa)为干冷气团(伍志方等，2017)。可降水量(PWV)达到40 mm，地面与500 hPa温度差高达36 ℃，对流有效位能(CAPE)达到1 000 J·kg^{-1}，0～6 km和0～1 km风矢量差分别为28 m·s^{-1}和10 m·s^{-1}，以上条件满足东北冷涡西南象限产生雷暴大风的环境指标(杨磊和郑永光，2023)。25日白天辽宁虽然也具有以上有利的环境条件，但并出现明显的天气尺度强迫和触发条件。另外辽宁南部地区850 hPa的相对湿度(RH)仅60%，而我国东部强对流往往发生在RH超过80%的环境中(Tian et al.，2015)，这可能是白天时段和辽宁南部没有出现强对流天气的原因。由于东北冷涡西南象限的水汽条件较东南象限弱，所以相较于冷涡东南象限，西南象限强对流需要更关注冷涡造成的天气尺度强迫作用和触发机制(杨磊和郑永光，2023)。

3.2 风暴系统演变

根据风暴环境演变和沈阳雷达0.5°仰角反射率因子回波形态特征，将本过程分为三个阶段(图3a)：(1) 多单体风暴阶段(17:00—19:40)；(2)弓形回波阶段(19:40—21:00)；(3) 逗点回波阶段(21:00—22:00)。多单体风暴阶段：首先内蒙东南部出现强度为30 dBz的普通单体风暴(选取①17:35沈阳雷达0.5°仰角反射率因子，下同)；随着风暴逐渐发展，在内蒙和辽宁交界处出现

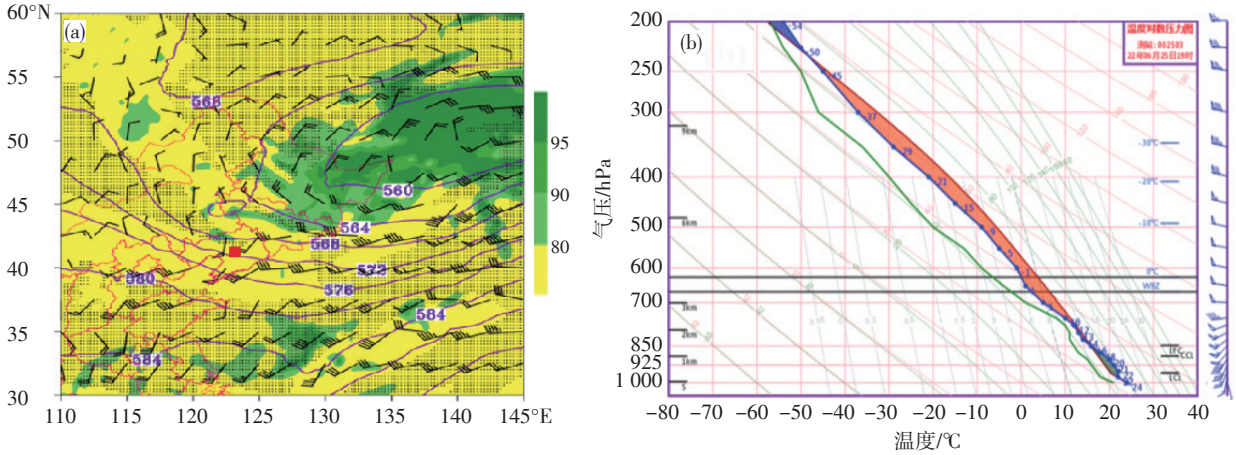


图2 2022年6月25日17:00 500 hPa位势高度场(实线,单位: dagpm)、相对湿度RH(填色为850 hPa相对湿度,小黑点区域代表500 hPa相对湿度低于40%,单位:%)和850 hPa风场(矢量,单位:m·s^{-1})叠加图(a,红色方块代表沈阳所在位置)以及19:00沈阳站T–log$p$图(b)

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), and relative humidity (RH) (Shaded represents 850 hPa relative humidity, black dot area represents RH below 40% at 500 hPa, unit: %) (The red rectangle is the location of Shenyang station), and T–log$p$ chart of Shenyang at 19:00 BT

多单体风暴(代表时刻②18:29);19:00开始多单体风暴中出现具有类似超级单体风暴的形态特征,但并未监测到中气旋,由于风暴尺度较小且孤立,仅产生分散的强度为8~9级的雷暴大风(代表时刻③19:29)。弓状回波阶段:多单体风暴快速移动并靠近沈阳,在3.7 km处出现云桥,在20 min内快速合并为弓形回波,其长轴尺度约70 km,最强达到66 dBz;弓状回波的前沿反射率因子梯度大值区向移动方向的前侧倾斜(图略),表征风暴移动前方的低空存在强上升气流,有利于风暴维持;20时弓形回波内开始出现高回波质心快速下降的现象,产生下击暴流,导致沈阳城区出现大范围雷暴大风(代表时刻④20:23),有9个自动气象站阵风达到10级,20:27沈阳马三家街道出现13级(39.1 m·s^{-1})雷暴大风。逗点回波阶段:21:00之后弓形回波演变为逗点回波并继续导致雷暴大风(代表时刻⑤21:13)(图3b),有5个自动气象站阵风达到10级,22:00后逗点回波逐渐减弱消亡。

本次风暴的演变以及雷暴大风站点的分布与弓形回波经典模型一致(Fujita and Wakimoto, 1981)。我国近年来也多次出现了由弓形回波导致的极端强对流天气(俞小鼎和郑永光,2020;孙继松,2023)。目前经典风暴演变模型仍然是极端强对流预报预警的重要理论基础。

4 雷暴大风形成原因

4.1 负浮力的作用

沈阳T–log$p$(图2b)显示沈阳城区上空500 hPa存在干层,相对湿度仅36%,抬升凝结高度至地面的相对湿度也仅为60%,以上环境条件有利于水凝物迅速

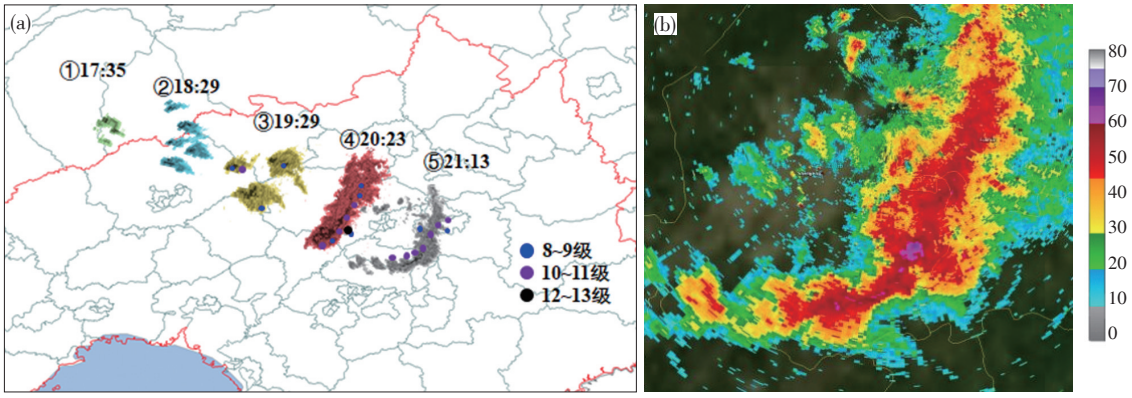


图3 2022年6月25日17:35—21:13期间5个不同时段沈阳雷达0.5°仰角反射率因子在30 dBz以上强度的雷达回波(单位: dBz)与相应10 min大风站点(彩色圆点)叠加图(a)、21:13沈阳雷达0.5°仰角反射率因子(b, 填色, 单位: dBz)

Fig. 3 The typical distribution of (a) reflectivity factor (color-filled, unit: dBz) at a 0.5° elevation angle for the Shenyang radar, along with the locations of corresponding 10-minute severe wind stations from 17:35 BT to 21:13 BT on 25 June 2022 (shown as colorful dots), (b) the reflectivity factor (unit: dBz) at a 0.5° elevation angle for the Shenyang radar at 21:13 BT on 25 June 2022

蒸发造成下沉气流降温，从而产生向下的负浮力，导致下沉气流加速(杨磊和郑永光，2023)。下沉对流有效位能(DCAPE)可用来估算负浮力做功造成地面大风的大小(Markowski et al.，2010)。沈阳发生强对流天气前的DCAPE达到1 000 J·kg^{-1}，估算得到由对流造成的地面水平风速约为22 m·s^{-1}，风力8级。由此可见仅由负浮力导致的下沉运动还不足以导致多站点出现10级上雷暴大风。

沈阳城区位于营口双偏振雷达东南方向约140 km，营口雷达监测到弓形回波南端内嵌着超级单体风暴(图4a)，0.5°仰角存在钩状回波，此仰角最强反射率高达70 dBz，表征存在冰雹；高层强回波位于低层弱回波区(Weak Echo Region，WER)之上(图略)，径向速度图显示存在强度达到中等强度的中气旋(图4b、e)。从双偏振量特征来看，0.5°仰角距地2.5 km，温度约10 ℃，差分反射率因子(Z_{DR})的垂直剖面(图4f)上，在WER附近存在Z_{DR}柱，Z_{DR}大于1 dB的伸展高度可达5 km，位于0 ℃以上，表征此区域存在强上升气流(刁秀广等，2021)；Z_{DR}柱后侧出现了Z_{DR}的低值区即Z_{DR}槽，强度接近0 dB，其形成是由冰相粒子在融化层中强烈融化导致(曹舒娅

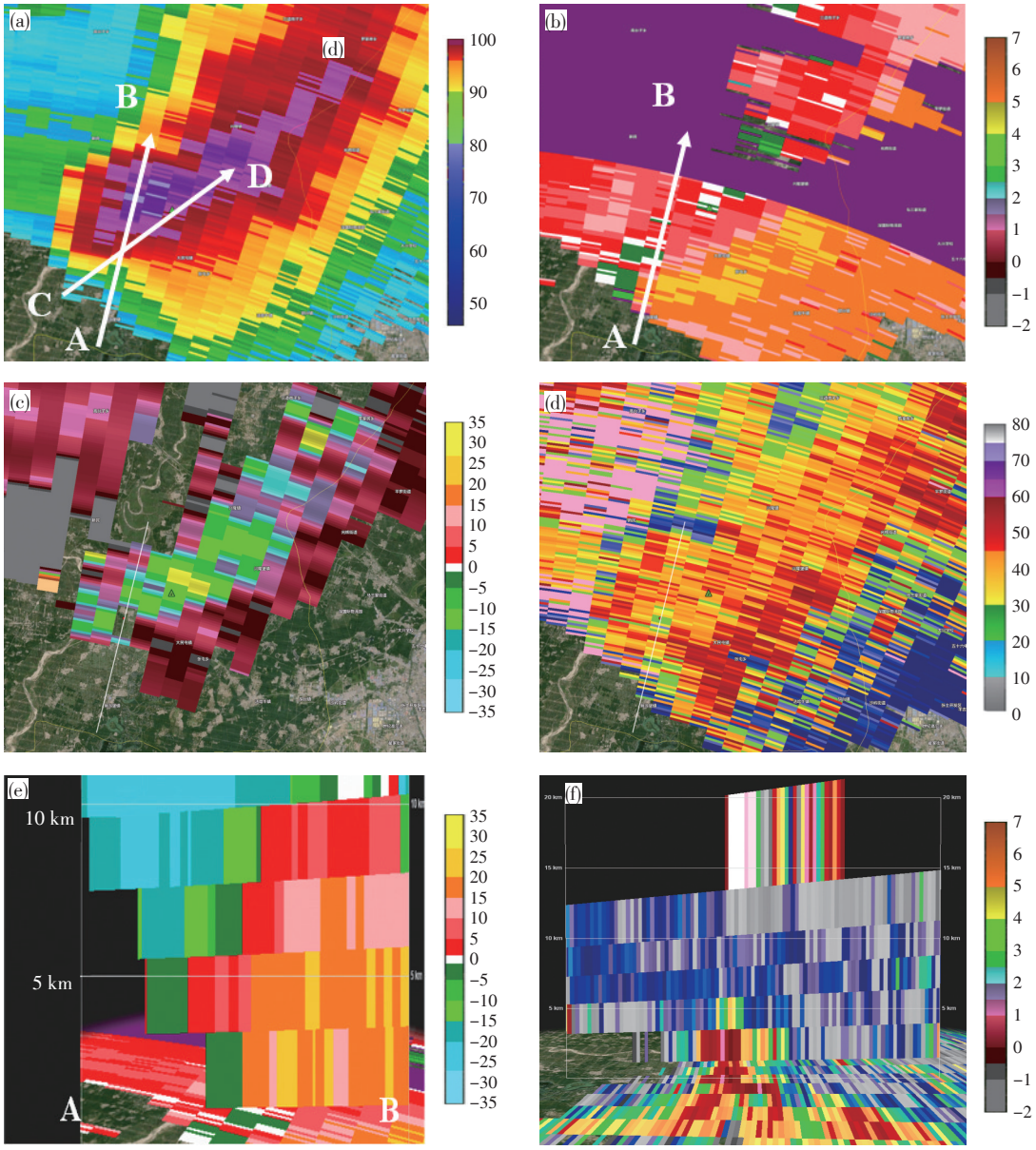


图4 2022年6月25日20∶14营口双偏振雷达0.5°仰角基本反射率因子(a，单位：dBz)、径向速度(b，单位：m·s^{-1})、差分传播相位移KDP(单位：°·km^{-1}) (c)，相关系数CC(d)以及沿图a中AB的径向速度剖面(e，单位：m·s^{-1})、沿CD的差分反射率因子ZDR的剖面(f，单位：dB)

Fig. 4 The Yinkou dual-polarizaion radar at 0.5° elevation angle (a) the basic reflectivity factor (unit: dBz), (b) radial velocity (unit: m·s^{-1}), (c) differential propagation phase shift KDP (unit:°·km^{-1}), (d) correlation coefficient CC, (e) the radial velocity profile along AB in fig. b (unit: m·s^{-1}), and (f) the profile of differential reflectivity factor ZDR along CD (unit: dB) from 20∶14 BT on 25 June 2022

等, 2021)。在高达65 dBz的强回波区域,差分传播相位移KDP在2~4°·km^{-1} (图4c),表征伴有大量的降水,观测到5 min降水量为6 mm;下个体扫KDP增加到5.2 °·km^{-1},5 min降水量为11 mm。更强的降水需要大粒子的增多,更多的大粒子的拖曳作用更有利于形成下沉气流强度(孙继松,2023)。CC接近0.93 (图4d),实际业务中发现营口雷达监测到冰雹时,CC比国内常用阈值低,因此在强回波区域存在正在融化的冰雹。在强干空气夹卷作用下,强烈的蒸发冷却、融化冷却和大雨滴拖曳,有利于形成强下沉气流,这支下沉气流是地面极端大风的主要强迫源。

4.2 动量下传的作用

下沉气流夹卷区的环境水平风越强,动量下传对地面大风的贡献越大,可用风暴承载层平均风(mean wind speed of storm bearing layer,SSBL)表示动量下传的潜势大小(俞小鼎和郑永光,2020)。ERA5再分析资料计算的SSBL达到20 m·s^{-1},超过冷涡雷暴大风发生时SSBL的75%分位点(杨磊和郑永光,2023),证明本次过程环境条件非常有利于通过动量下传作用加强雷暴大风强度。

在弓状回波导致的下击暴流阶段,速度剖面图上对应2~6 km处存在逐渐向下伸展的后侧入流急流(Rear Inflow Jet,RIJ) (图5),随后0.5°仰角出现后侧入流槽口(Rear Inflow Notch,RIN),径向速度图上出现速度模糊(图5a),朝向雷达速度达到31 m·s^{-1},强烈的RIJ有助于中层气流加速进入对流系统,使得系统中心的单体移动速度最大,进而形成“弓”形结构。另一方面,RIJ会将较大动能的气流带入下沉气流,通过动量输送增强地面大风。20:23,RIJ的最大径向速度达到40.5 m·s^{-1},低层径向速度大值区到33 m·s^{-1},进而通过动量下传作用导致近地面出现雷暴大风。RIJ在上文介绍的负浮力作用中也起到干冷空气输送带的作用,引导干空气进入风暴,增大了水成物的蒸发冷却降温,进而加剧下沉运动。

4.3 冷池密度流的作用

对比单体风暴和弓形回波阶段地面1 h内气象要素的变化量(图6)可见,两个阶段的相同点是气压场均呈“低-高-低”的结构分布,存在雷暴前低压、雷暴高压和尾流低压。不同点是单体风暴影响时,地面冷池降温

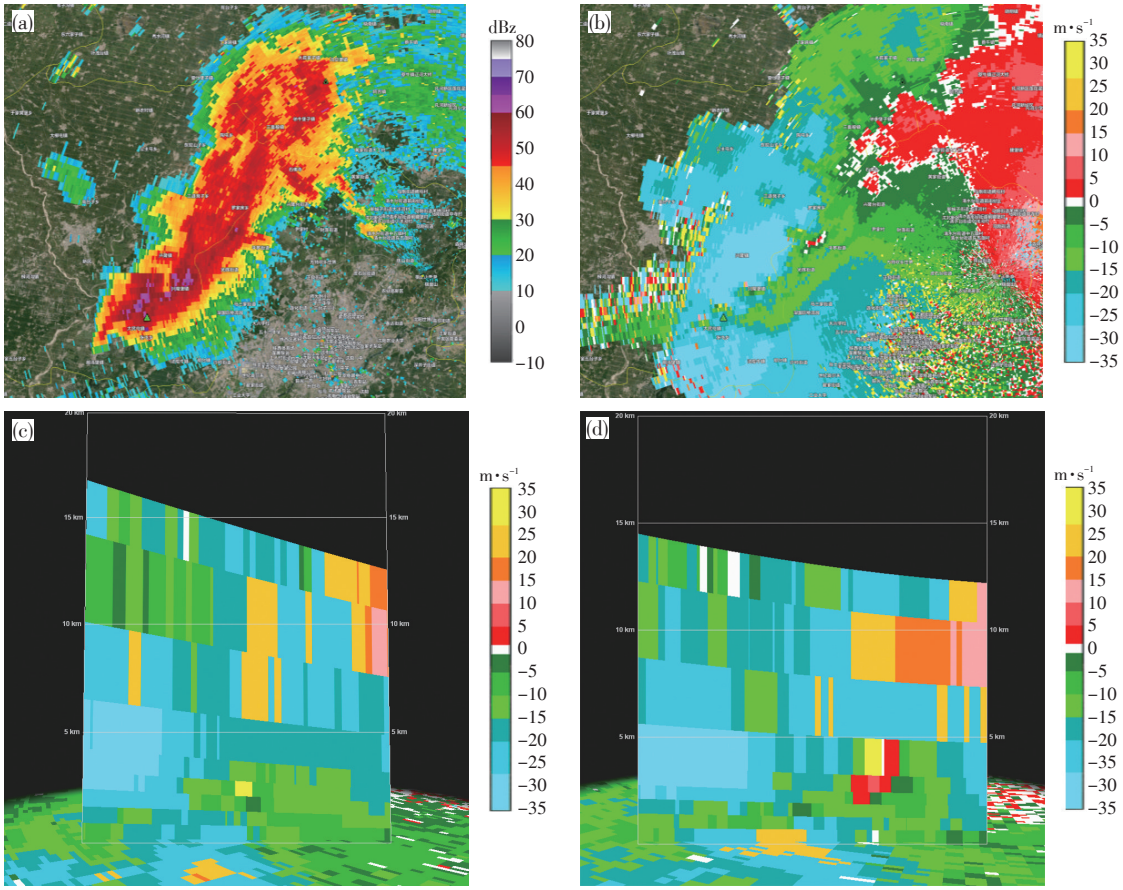


图5 2022年6月25日20:18沈阳雷达0.5°仰角反射率因子(a)、4.3°径向速度场(b)、沿图b中AB直线的径向速度垂直剖面20:18(c)、20:23 (d)

Fig. 5 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation angle from 20:18 BT on 25 June 2022, (b) radial velocity at a 4.3° angle, the vertical cross-section of the radial velocity along the AB line in the fig. b at (c) 20:18 BT and (d) 20:23 BT from Shenyang radar

达到-6 ℃，气压升高仅2 hPa，冷池中心和雷暴高压中心位置没有重合；而在弓形回波阶段，雷暴前变压更低，达到-1.5 hPa，这可能与风暴前侧高层的补偿下沉气流引起的绝热增温有关。虽然冷池降温中心在两个阶段均为-6 ℃，但弓形回波阶段的冷池面积明显更大，气压增幅更强，达到2.5 hPa。在弓形回波阶段，冷池内外的气压差约为3 hPa，变压梯度指向东南方向，表明冷池密度流为西北方向，冷池和雷暴高压的中心几乎重合，这种“低-高-低”的地面气压场分布以及多种要素变化中心重合的特征也是弓形回波致灾大风的标志之一。

6月25日20:00弓形回波在地面形成强的冷池(图6b)，C逐渐加强至与0—3 km垂直风切变(SHR3)相当(表1)，表明冷池出流较强。冷池出流形成了由北指向南的水平涡度，在风暴前侧上升气流扭曲作用下形成初始涡旋。在环境强垂直风切变作用下，风暴内垂直运动更加强盛，因此初始涡旋在强上升气流的拉伸下迅速加强，这与数值模拟的结论一致(Schenkman et al.，2016)。

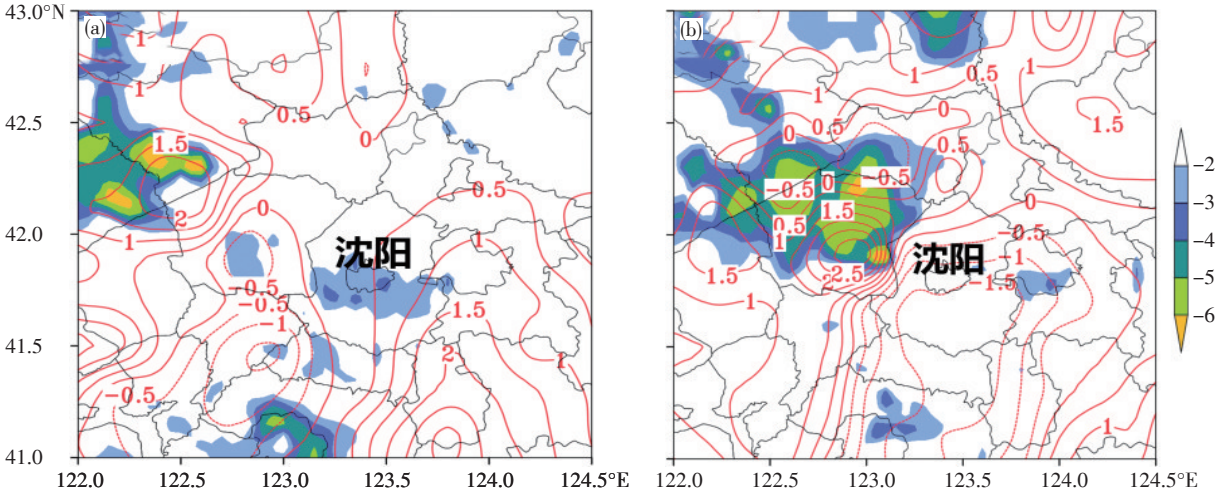


图6　2022年6月25日19:30 (a)和20:20 (b)小时变温(填色，单位：℃)和变压场(红色实线，单位：hPa)

Fig. 6 (a) Hourly temperature variation (color-filled, unit: ℃) and (b) pressure variation (red solid lines, unit: hPa) during the time intervals from 19:30 BT to 20:20 BT on 25 June 2022

冷池传播速度(C)是水平方向密度流的传播速度，当C和垂直风切变强度相当时，最有利于风暴的维持，冷池传播速度(C)采用Weisman等(2004)的方法计算。利用自动气象站数据，在冷池中心和冷池前沿(东侧)各取3～4个站点，估计冷池内外气压差并计算C，并用ERA5逐小时资料计算冷池最近格点的0—3 km垂直风切变(SHR3)。可以看到，在单体风暴阶段，地面冷池相对较弱，C仅为18.3 m·s^{-1}，弱于SHR3，雷暴系统具有向冷区倾斜的层云结构，此阶段风切变占主导地位。20:00后，C开始逐渐增加，尤其在20:20，冷池内外气压变化为3 hPa，且C和SHR3的强度相当，比值约为1，因此，风暴可以更好地维持(孙继松，2023)。21:00后，地面冷池加强(图略)，冷池传播速度加大至28.8 m·s^{-1}，开始大于SHR3，冷池出流占主导，弓形回波强度逐渐减弱。

表1 2022年6月25日19:30—21:00冷池密度流传播速度和垂直风切变

Table 1 Density current propagation velocity in the cold pool and vertical wind shear from 19:30 BT to 21:00 BT on 25 June 2022

时间	Δp /hPa	2 m 气温/℃	$\bar{\rho}$ /(kg·m^{-3})	C /(m·s^{-1})	SHR3 /(m·s^{-1})	C /SHR3
19:30	2	24.0	1.188	18.3	22.7	0.81
20:20	3	22.3	1.196	22.4	22.7	0.99
21:00	4	21.0	1.204	28.8	20.2	1.44

注：Δp为冷池内外气压变化，$\bar{\rho}$为地面空气的平均密度，C为冷池传播速度，SHR3为0—3 km垂直风切变。

5 局地雷暴大风形成机理

上文分析了辽宁北部大范围雷暴大风的形成原因，下面通过逐分钟气象要素演变分析沈阳马三家站出现13级雷暴大风的形成机理。从6月25日20:18开始，在风暴移动方向前侧的反射率因子梯度区内，距地面约3 km处出现低空的γ中尺度涡旋(图5d)，垂直厚度为2 km，尺度仅10 km，旋转速度达到16.5 m·s^{-1}，达到弱中气旋标准，这种出现在弓状回波前沿的涡旋被称为中涡旋(MV)。相比于中气旋，MV要更浅薄并常出现在近地面2~3 km以下。MV由于在低空形成扰动低压，会在风暴内的低空形成垂直向下的气压梯度力，可单独导致雷暴大风，也可和RIJ共同作用导致更极端的雷暴大风(Schenkman et al.，2016)。6月25日20:00后，从马三家自动气象站(图7)可见，受雷暴前低压影响，气压缓慢下降。20:20开始各气象要素出现突

变现象，气压在20:20—20:25陡升3 hPa，雷暴高压前沿已经影响到该站点。20:25，气压停止上升并波动下降，2 min内下降约0.5 hPa，此时MV恰好位于马三家上空。这表明了MV出现会导致低空气压降低，进而通过加强下沉气流导致MV附近发生更强的雷暴大风。20:18，RIJ最强处与MV的距离为14 km；20:23，RIJ最强处与MV的距离缩小至7.8 km。因此，逐渐下降的RIJ和MV逐渐靠近，在MV导致气压降低的时刻，MV下方的马三家站出现39.1 m·s^{-1}的雷暴大风。

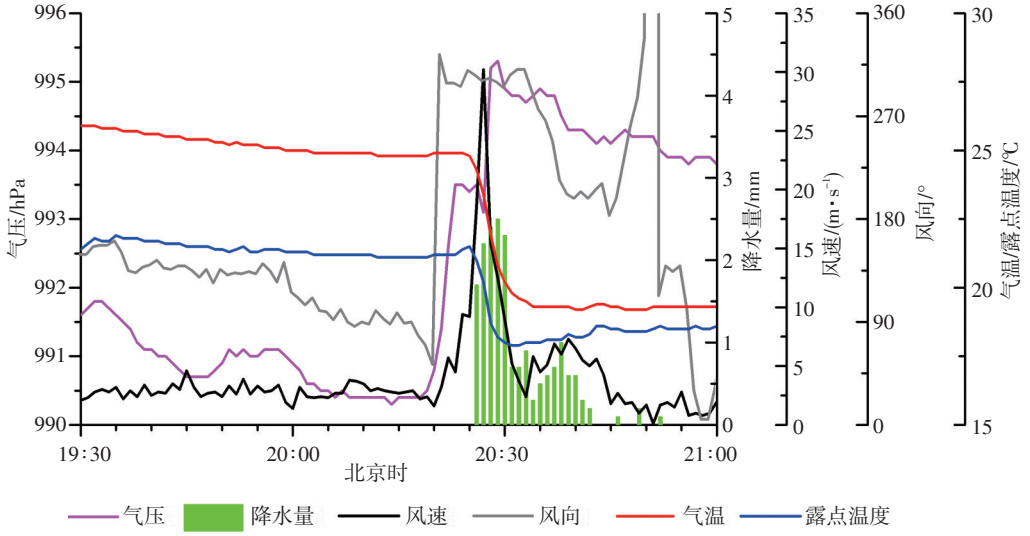


图7 2022年6月25日19:30—21:00马三家自动气象站逐分钟气象要素演变

Fig. 7 The evolution of meteorological elements at Ma San Jia automatic station on per minute basis from 19:30 BT to 21:00 BT on 25 June 2022

综上表明，沈阳马三家站出现13级雷暴大风，除了受负浮力、动量下传、冷池密度流影响外，在弓形回波前沿存在浅薄的低空γ中尺度涡旋，表明了低空涡旋旋转可加强下沉气流，并与后侧入流急流共同作用导致局地极端大风。

6 结论与讨论

利用多源观测资料和ERA5再分析资料，对2022年6月25日辽宁省一次雷暴大风过程的形成机理进行分析，探讨东北冷涡背景下弓形回波的风暴环境演变特征及地面大风的成因，归纳出对辽宁省雷暴大风预报预警有指导意义的着眼点，得到以下主要结论：

(1) 此次雷暴大风发生在东北冷涡背景下，辽宁省位于冷涡西南象限，冷涡西侧中层干冷空气和低层暖湿气流傍晚开始在辽宁北部交汇。沈阳具有“X”型探空曲线特征，具有强垂直风切变等有利条件。

(2) 对流过程和经典弓形回波演变模型一致，初期为孤立风暴导致的分散局地大风，之后多单体风暴逐渐合并为弓形回波，在负浮力、动量下传和冷池密度流等共同作用下，弓形回波内出现高回波质心快速下降的现象，随后产生下击暴流，沈阳市区出现大范围雷暴大风。

(3) 弓形回波前沿存在浅薄的低空γ中尺度涡旋，该涡旋位于马三家站上方时，该站气压变化从陡升转为急剧下降，表明了低空涡旋旋转可加强下沉气流，并与后侧入流急流共同作用导致局地极端大风。

以上分析表明，局地极端雷暴大风是多尺度叠加效应的综合结果，东北冷涡背景下的强对流天气的精准预报仍是难点，并且冷涡西南象限强对流的预报更需要综合考虑天气尺度强迫和有利环境条件。局地极端天气的监测和预报预警水平亟需提升，今后可通过加强超级单体、弓形回波等经典理论的应用，并加强分钟级观测资料的分析，继续开展中小尺度涡旋对强对流天气的影响机制研究。

参考文献(References)：

曹舒娅,孙伟,韦芬芬,等.2021.双偏振雷达在江苏“7.6”降雹过程中的应用分析[J].大气科学学报,44(4):549-557. Cao S Y, Sun W, Wei F F, et al. 2021. Study of “7.6” hail event in Jiangsu based on Dual-Polarization weather radar observations [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,44(4):549-557 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201116001

曹世腾,杨磊,陈宇,等.2023. 2017—2021年辽宁省冷涡型雷暴大风时空分布及环境参数特征[J].气象与环境学报,39(4):65-73. Cao S T, Yang L, Chen Y, et al. 2023. Characteristics of spatio-temporal distribution and environmental parameters of Cold Vortex thunderstorm gales in Liaoning Province from 2017 to 2021 [J]. Journal of Meteorology and Environment,39(4):65-73 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2023.04.009

刁秀广,杨传凤,张骞,等. 2021.二次长寿命超级单体风暴参数与ZDR柱演变特征分析[J].高原气象,40(3):580-589. Diao X G, Yang C F, Zhang Q, et al. 2021. Analysis on the evolution characteristics of storm parameters and ZDR column for two long life supercells [J]. Plateau

Meteorology,40(3):580–589 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00034

乔娜,钱鹏,周勋,等.2021.东北冷涡背景下中尺度低涡的演变成因及其对MCS的影响分析[J].暴雨灾害,40(5):474–483. Qiao N, Qian P, Zhou Q, et al. 2021. Analysis of the evolution reason of the mesoscale vortex and its influence on MCS under the background of the northeast cold vortex [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):474–483 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.05.004

孙继松.2023.与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J].气象,49(1):1–11. Sun J S. 2023. The pattern structure and the rmodynamic and dynamic processes of se–verestorms associated with linear convective gales [J]. Meteorological Monthly,49(1):1–11 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.111802

孙晓磊,王科,左涛,等.2023.引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J].暴雨灾害,42(3):312–323. Sun X L, Wang K, Zuo T, et al. 2023. Analysis of supercell and meso–scale con–vec–tive system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):312–323 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–093

王婷婷,朱文剑,姚凯,等.2023. 2021年吉林中部一次极端雷暴大风的中尺度成因分析[J].气象,49(10):1215–1226. Wang T T, Zhu W J, Yao K,et al. 2023. Mesoscale analysis of an extreme thunderstorm gale in central jilin province in 2021 [J]. Meteorological Monthly,49(10):1215–1226 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2023.083102

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. 2021. Study on the formation and evolution of “6.3” damage wind [J]. Plateau Meteorology,31(2):504–514 (in Chinese). doi:1000–0534(2012)02–0504–11

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 wind–storm and their impacts on storm structures [J]. Acta Meteorologica Si–nica,71(5):839–852 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.073

伍志方,蔡景就,林良勋,等. 2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,44(4):485–499. Wu Z F, Cai L J, Lin L X, et al. 2018. Analysis of mesoscalesystems and predictability of the tor–rential rain process in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly,44(4):485–499 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2018.04.002

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):40–57. Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, et al. 2023. Case analysis of damaging high winds generated by bow echoes in the presence of a cold vortex over the North China Plain [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(1):40–57 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220024

杨磊,郑永光.2023.东北地区雷暴大风观测特征及其与东北冷涡的关系研究[J].气象学报,81(3):416–429. Yang L, Zheng Y G. 2023. Observa–tional characteristics of thunderstorm gusts in northeast China and their association with the Northeast China Cold Vortex [J]. Acta.Meteo–rologica Sinica,81(3):416–429 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220126

俞小鼎, 郑永光.2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,78(3):391–418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe con–vective weather research and operational service in China [J]. Acta Me–teorologica Sinica,78(3):391–418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035

Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX [J]. Monthly Weather Review,133(8):2275–2296. doi:10.1175/MWR2973.1

Fujita T T, Wakimoto R M. 1981. Five scales of airflow associated with a se–ries of dow–nbursts on16 July 1980 [J]. Monthly Weather Review,109(7):1438–1456. doi:10.1175/1520–0493(1981)109<1438:FSOAAW>2.0.CO;2

Lovell L T, Parker M D. 2022. Simulated QLCS vortices in a high–shear, low CAPE environment [J]. Weather Forecasting,37(6):989–1012. doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.01.019

Ma R Y, Sun J H, Yang X L. 2021a. A7–yr climatology of the initiation, de–cay, and morphology of severe convective storms during the warm sea–son over North China [J]. Monthly Weather Review,149(8):2599–2612. doi:10.1175/MWR–D–20–0087.1

Tian F, Zheng Y, Zhang T, et al. 2015. Statistical characteristics of environ–mental parameters for warm season short–duration heavy rain fall over central and eastern China [J]. Jornal of Meteorological Research,29(3):370–384. doi:10.1007/s13351–014–4119–y

Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale meteorology in midlati–tudes [M]. Chichester:Wiley–Blackwell:245–265. doi:10.1002/9780470682104

Schenkman A, Xue M. 2016. Bow–echomesovortices: A review [J]. Atmo–spheric Research,170:1–13. doi:10.1175/2008MWR2650.1

Weisman M L, Rotunno R. 2004. "A theory for strong long–lived squall lines" revisited [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,61(4):361–382. doi:10.1175/1520–0469(2004)061<0361:ATFSLS>2.0.CO;2

Zhao K, Lee W C. 2022. Evaluation and modification of microphysics schemes on the cold pool evolution for a simulated bow echo in south–east China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,127(2):e2021JD035262. doi:10.1029/2021JD035262

（责任编辑　何明琼）