

杨雪,杨磊,袁潮,等,2025. 基于相控阵雷达的东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋对合并型弓状回波的影响研究[J]. 气象,51(2): 191-206. Yang X, Yang L, Yuan C, et al, 2025. Study on the influence of mesovortex on merged bow echo under the background of Northeast China cold vortex based on phased array radar[J]. Meteor Mon, 51(2): 191-206 (in Chinese).

基于相控阵雷达的东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋 对合并型弓状回波的影响研究*

杨 雪^{1,2,3} 杨 磊^{1,2,3,4,5} 袁 潮^{1,2,4,5} 平 凡^{1,2,5} 曹世腾^{1,2,3,5} 王改利²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

4 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 广东佛山 528315

5 辽宁省盘锦市气象局, 盘锦 124010

提 要: 针对 2023 年 7 月 6 日辽宁雷暴大风过程, 利用 X 波段相控阵雷达等资料, 分析了东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋 (MV) 对合并型弓形回波形成雷暴大风的影响机制。结果表明: 辽宁境内的雷暴大风区位于东北冷涡的东南象限, 该区域受低空切变线和低空急流的共同影响, 具有极端的 850 hPa 与 500 hPa 温度差等有利于雷暴大风发生的环境条件; 夜间近地面相对湿度接近 70%, 不利于形成强冷池, 飚线没有弓状特征, 造成的大风较为分散。随后飚线和孤立风暴合并, 在合并高度处生成浅薄的 MV, 后侧入流急流 (RIJ) 的强度有所减弱; MV 附近产生的微下击暴流导致了较强的冷池效应, 在冷池边缘上升气流与风暴原始上升气流的共同拉伸作用下, MV 的旋转加强且垂直向上伸展。MV 上空形成 Z_{DR} 柱, 表征此处存在强上升气流, 尽管 MV 处风暴出现弓状特征, 但是 MV 下方仍没有出现雷暴大风; 随着 MV 旋转强度减弱后, 风暴内的降水粒子在尺度和浓度上均出现快速减小的现象, 降水蒸发作用导致地面出现更强的冷池, 与此同时, MV 下方的 RIJ 快速发展, 导致 MV 下方强冷池和 RIJ 处集中出现雷暴大风。地面强风并非由 MV 发展增强造成的, 而是 RIJ 向下发展与水凝物蒸发共同作用的结果。

关键词: γ 中尺度涡旋 (MV), 合并型弓状回波, 雷暴大风, 东北冷涡, 相控阵雷达

中图分类号: P412, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.110501

Study on the Influence of Mesovortex on Merged Bow Echo Under the Background of Northeast China Cold Vortex Based on Phased Array Radar

YANG Xue^{1,2,3} YANG Lei^{1,2,3,4,5} YUAN Chao^{1,2,4,5} PING Fan^{1,2,5}

CAO Shiteng^{1,2,3,5} WANG Gaili²

1 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang 110166

4 CMA Tornado Key Laboratory, Foshan, Guangdong 528315

5 Panjin Meteorological Office of Liaoning Province, Panjin 124010

* 中国气象局青年创新团队 (CMA2024QN05)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J013、CXFZ2022J003、CXFZ2022J059)、中国气象局复盘专项 (FPZJ2024026)、辽宁省科技计划联合计划 (2024012199-JH4/4800)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题 (2024LASW-B25)、中国气象局东北冷涡实验室开放基金项目 (2024SYIAEKFD02) 和中国气象科学研究院基本科研业务费项目 (2023Z019) 共同资助

2024 年 9 月 24 日收稿; 2024 年 11 月 22 日收修定稿

第一作者: 杨雪, 主要从事暴雨、强对流预报技术研究. E-mail: yangxue_nuist@163.com

通讯作者: 杨磊, 主要从事强对流和强降水等中尺度气象学研究. E-mail: yanglei_nuist@163.com

Abstract: Focusing on the thunderstorm gale process in Liaoning on 6 July 2023, based on the X-band phased array radar data, this paper analyzes the impact mechanisms of meso- γ scale vortex (MV) on merged bow echo and thunderstorm gales which occurred under the background of Northeast China cold vortex. The results show that the thunderstorm gale area in Liaoning Province was located in the southeast quadrant of the Northeast China cold vortex, influenced by low-level shear lines and low-level jet streams. The beneficial environment condition such as extreme temperature difference between 850 hPa and 500 hPa was conducive to the occurrence of thunderstorm gales. The relative humidity near the ground at night was close to 70%, which was not conducive to the formation of strong cold pools. Therefore, there was no bow-shaped pattern in squall lines and the thunderstorm gales were very scattered at this time. Subsequently, the squall line merged with the isolation storm, with shallow MV generated at the merging height, and the rear-inflow jet (RIJ) was weakened. The micro downburst near MV created a strong cold pool near the ground. Under the joint stretching effect of the rising airflow at the edge of the cold pool and the original rising airflow of the storm, the MV stretched upward and strengthened. The Z_{DR} column formed over the MV, indicating the presence of strong updrafts in this area. Although the storm at the MV showed a bow-shaped pattern during this period, there were no thunderstorm gales below the MV. When the rotation of MV weakened, there was a rapid decrease in the scale and concentration of precipitation particles within the storm. The evaporation of precipitation led to the formation of even stronger and larger cold pools on the ground, and the fast development of RIJ below the MV, leading to the concentration of thunderstorm gales in the strong cold pool and RIJ below the MV. The ground strong winds were not caused by the strengthening of MV development, but rather the result of RIJ's downward development and hydrometeor evaporation.

Key words: meso- γ scale vortex (MV), merged bow echo, thunderstorm gale, Northeast China cold vortex, phased array radar

引言

东北冷涡背景下,大气常具有强天气尺度强迫、接近干绝热温度直减率和中等以上的风垂直切变等环境特征,常给我国中东部地区带来极端致灾的雷暴大风事件(郑永光和宋敏敏,2021;杨磊和郑永光,2023;Tao et al,2023)。这些天气事件常由弓状回波所导致,其在雷达图像中呈现向前凸起的弓状(Fujita,1978;Schenkman and Xue,2016;吴海英等,2023;许长义等,2023;Xu et al,2024a)。因此,需要加深对东北冷涡背景下弓状回波造成极端大风的机理研究。

早期研究发现,弓状回波可以由孤立普通风暴或飚线演变而成,常称其为经典型弓状回波(Fujita,1978;Bluestein and Parker,1993;Burke and Schultz,2004;Klimowski et al,2004)。飚线演变为经典型弓状回波前,需要层状云内存在一个从后向前的后

侧入流急流(rear-inflow jet,RIJ),RIJ 逐渐增强并且下降至近地面,导致弓状出现并造成大风事件(Meng et al,2012;Smull and Houze,1987;Zhang et al,2021),因此 RIJ 是经典型弓状回波发展的关键动力因素(Skamarock et al,1994;Schenkman and Xue,2016)。在弓状回波形成后,其内部可能会出现 γ 中尺度涡旋(meso- γ scale vortex,以下简称 MV),相比于超级单体风暴内深厚持久的中气旋,弓状回波内的 MV 普遍持续时间更短,更为浅薄,形成机制也更复杂(Weisman and Trapp,2003;Trapp and Weisman,2003;Atkins and Laurent,2009a;2009b;Schenkman and Xue,2016;杨磊等,2023)。MV 可以是冷池携带的水平涡管被降水下沉气流扭曲(Trapp and Weisman,2003)或被上升气流拉伸而形成(Atkins and Laurent,2009b),近地面摩擦作用形成的水平涡度也可能是 MV 的重要涡度来源(Xu et al,2015a;2015b)。RIJ 和 MV 可以单独或共同作用形成致灾大风(Atkins and

Laurent, 2009a; Xu et al, 2015b)。

另外,弓状回波也可以由飚线和孤立风暴合并而成(Finley et al, 2001; Klimowski et al, 2003),被称为合并型弓状回波(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023),此类回波得到国外学者的广泛关注(Wolf, 1998; LaPenta et al, 2005; French and Parker, 2012; 2014)。近些年,学者开始研究我国华南地区合并型弓状回波过程,发现合并型弓状回波的占比要高于经典型弓状回波,同时会造成更强的雷暴大风和降水(Zhou et al, 2023)。在合并过程中RIJ会减弱,但上升气流会加强,即使在弱垂直风切变的环境下也会形成MV(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023; Xu et al, 2024b)。MV形成后可以通过促进降水并造成更强的冷池,导致合并风暴出现弓状特征和RIJ的加强(Zhou et al, 2020);也会将原线状风暴扭曲,使其局部变形向前凸起形成弓状(Liu et al, 2023),最终在MV附近出现大风事件,这与经典弓状回波RIJ主导的动力特征具有差异。相比于经典型弓状回波,合并型弓状回波由于具有复杂的合并过程(Zhou et al, 2023),需要更高分辨率的观测资料用于研究MV、RIJ和冷池的精细特征及产生大风的机制,目前我国关于东北冷涡背景下合并型弓形回波事件的研究还比较欠缺。

相控阵天气雷达能在1 min之内完成一个体扫,可更清晰地观测到对流风暴的精细结构(刘黎平等, 2016)。2023年7月6日夜间,在东北冷涡背景下,辽宁出现了由合并型弓状回波造成的雷暴大风过程。本文利用沈阳X波段相控阵雷达资料,研究风暴合并后MV精细特征及其对风暴弓状结构、RIJ和地面冷池的影响,以提升对东北冷涡背景下合并型弓状回波雷暴大风过程形成机制的认识。

1 资料与方法

使用质量控制后的时间分辨率为5 min的自动气象站资料,分析强对流实况和地面气象条件,强对流区域自动气象站的平均距离为6 km。此外,选取沈阳发生强对流前(2023年7月7日01:00)(北京时,下同)的自动气象站资料订正ERA5再分析资料近地面层相关温湿量,分析雷暴大风发生前环境参量。为了区分本次过程与以往东北冷涡雷暴大风

过程环境特征差异,基于杨磊和郑永光(2023)收集的2017—2021年雷暴大风样本,提取其中发生在7月1—15日东北冷涡东南象限的雷暴大风样本(合计1190站次),统计该期间雷暴大风环境参量的平均值和方差,计算本次过程物理量和统计结果的标准化距平绝对值,以分析导致本次过程的极端因素。

本文使用的雷达资料包括:营口SA多普勒天气雷达资料,时间分辨率为6 min;沈阳X波段相控阵雷达资料,该雷达采取先在每个方位做RHI扫描,然后再合成体扫的观测模式,时间延迟极低,1 min即可完成水平方向 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 和垂直方向 $0.9^{\circ}\sim 36^{\circ}$ (间隔 0.9° ,共40层)全方位扫描,径向分辨率为30 m。较短的雷达波长使得X波段雷达的衰减比S波段雷达明显,需要进行额外的衰减订正(张羽等, 2023),在强对流过程中进行衰减订正尤为必要。通过采用自适应约束订正方法对降雨衰减进行订正(Bringi et al, 1991),并利用自适应高斯频域滤波器对地物杂波进行抑制(Siggia and Passarelli, 2004),可获得较好的X波段相控阵雷达观测数据。需要说明的是,本次过程中对流风暴与相控阵雷达最远距离仅为20 km,并朝着相控阵雷达移动,因此风暴移动方向前侧的衰减影响较小,能够更加真实表征风暴观测特征。

参考弓状回波及其相关MV研究总结的概念模型(Schenkman and Xue, 2016),根据风暴所处雷达探测范围的方位以及径向速度图上小尺度不连续风场特征,利用每个时刻、每个仰角径向速度图判断是否存在MV及其所处位置、旋转方向,提取MV正、负速度区域内退速度模糊后的最大速度,计算MV的旋转速度。同时计算每个时刻、每个仰角内MV正、负最大速度直线上(平均距离约为5 km)各个像素点上雷达参量的平均值,以便研究MV旋转处风暴的雷达特征,并统计每个时刻MV厚度、最大旋转速度(高度)等信息。由于对MV旋转速度的强度等级并没有统一标准,所以本文与杨磊等(2023)研究类似,参考中气旋强度标准(Yu et al, 2012)来判断其等级。根据每个时刻MV最大旋转速度所在位置,将自动气象站资料插值到5 km分辨率网格点上,计算MV所在位置、半径为20 km范围内冷池(1 h降温 $< -1^{\circ}\text{C}$)的面积、平均温度、最低温度及冷池上空偏振参量特征值,以便探讨冷

池上空微物理特征变化及其对雷暴大风的影响。

2 强对流实况及影响系统

2.1 雷暴大风实况

2023 年 7 月 6 日夜间,辽宁自西向东出现雷暴大风过程(图 1a),集中时段为 7 日 00:00—04:00,8—9 级和 10 级及以上雷暴大风分别出现 162 站次和 10 站次,最大风速为 $27.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到 10 级。杨磊和郑永光(2023)发现东北冷涡背景下 1 h 内雷暴大风站数主要集中在 10 站次以下,而本次过程在 7 日 00:00—04:00 连续 4 h 的雷暴大风站次均超过 10 站次,其中 7 日 01:00—02:00、02:00—03:00 雷暴大风站次分别高达 59 站次和 51 站次,也体现出本次雷暴大风出现站次多的特点。

从 7 日 01:00—03:00 内逐 5 min 雷暴大风站次的时间演变还可以看到(图 1b),逐 5 min 雷暴大风站次存在两个阶段。第一阶段主要集中在 01:10—01:55,5 min 内雷暴大风站次最多为 6 站次,出现在渤海北部沿海陆地(图 1a)。在 01:55 后快速减小,至 02:30 之间存在峰谷。第二阶段在 02:30 后(图 1b),于 02:40—02:45 出现峰值,5 min 内雷暴大风站次最多为 7 站次,并且集中出现在沈阳市南部(图 1a)。因此本次雷暴大风过程集中出现在以上两个阶段,文中重点讨论雷暴大风站次再次

增多期间风暴的结构特征以及如此集中的原因。

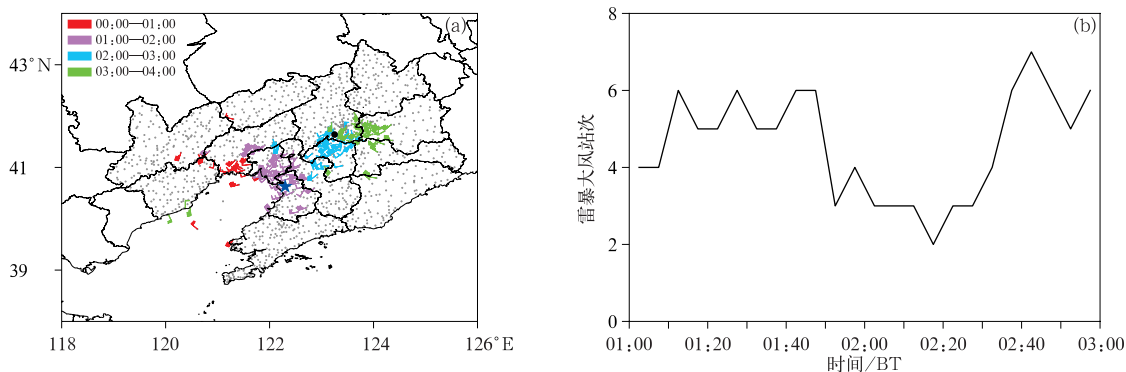
2.2 天气形势

7 月 6 日 500 hPa 天气形势显示(图 2),东北冷涡中心刚刚进入内蒙古,最外围环流圈位势高度为 564 dagpm,辽宁位于东北冷涡的东南象限,为大尺度上升运动区。另外,在内蒙古东南部和辽宁交界处,存在冷中心,温度为 -12°C (图略)。

850 hPa,东北冷涡底部存在明显的切变线,主要影响华北地区,而辽宁位于切变线东侧暖湿气流中,探空观测和 ERA5 再分析资料均显示大气低层风速达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2)。低空急流不仅有利于输送渤海水汽至辽宁中部,还有利于加强低层垂直风切变。

2.3 水汽、不稳定和风垂直切变

大气层结方面,沈阳受低空急流输送暖空气影响,850 hPa 气温为 21°C 。而地面温度在夜间降温明显,仅为 25°C ,与 850 hPa 的温度差仅为 4°C ,近地面为稳定的温度层结。但是 850 hPa 与 500 hPa 存在明显的“上冷下暖”的温度层结,温度差达到 33.5°C (表 1),垂直减温率极大,标准化距平绝对值达到 2.6。通常标准化距平绝对值达到 2.5 即可视为非常强的异常(孙军等,2012),所以本次过程具有较以往过程更强的静力不稳定条件,是引起本次过程极端性的主要因子。已有研究也证实强静力不稳



注:图 a 中灰点为自动站气象站,蓝色五角星为营口 SA 雷达位置,黑点为沈阳相控阵雷达位置。

图 1 2023 年 7 月 7 日(a)00:00—04:00 辽宁雷暴大风分布(风羽),

(b)01:00—03:00 逐 5 min 雷暴大风站次时间演变

Fig. 1 (a) Distribution of thunderstorm gales (barb) in Liaoning Province from 00:00 BT to 04:00 BT and (b) time series of 5 min thunderstorm gale number from 01:00 BT to 03:00 BT 7 July 2023

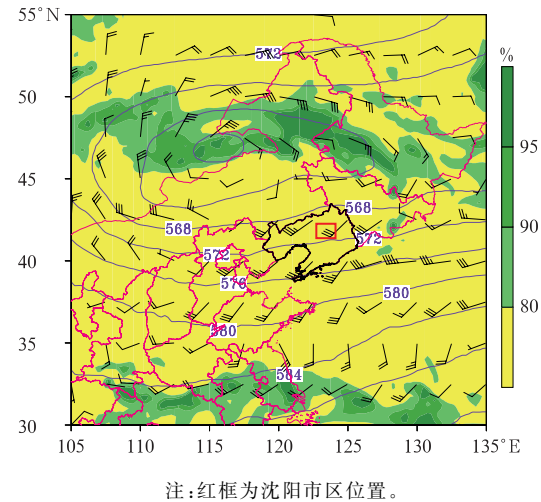


图 2 2023 年 7 月 6 日 20:00 500 hPa 位势高度
(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场
(风羽)和相对湿度(填色)

Fig. 2 Geopotential height (solid line,
unit: dagpm) at 500 hPa, relative humidity
(colored) and wind (barb)
at 850 hPa at 20:00 BT 6 July 2023

表 1 本次过程 2023 年 7 月 7 日 01:00 环境参数和东北冷涡雷暴大风形成环境条件统计值对比
Table 1 Comparison between environment conditions in Shenyang at 01:00 BT 7 July 2023 and statistic
results of environment conditions for the formation of Northeast China cold vortex thunderstorm gales

物理量	本次过程沈阳环境 参数平均值	东北冷涡东南象限雷暴大风 统计值(杨磊和郑永光,2023)	
		平均值	标准差
925 hPa 比湿/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	14.2	13.0	2.4
大气可降水量/mm	39.3	41.8	7.3
850~700 hPa 最大相对湿度/%	52.2	75.2	10.7
500~400 hPa 最低相对湿度/%	68.2	48.8	22.7
LCL 至地面最低相对湿度/%	69.1	66.0	15.3
CAPE/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2020.3	1777.8	849.1
DCAPE/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1446.3	1007.8	303.9
850 hPa 与 500 hPa 温度差/ $^{\circ}\text{C}$	33.5	28.7	1.8
地面与 850 hPa 温度差/ $^{\circ}\text{C}$	3.6	6.8	1.9
0~6 km 风矢量差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	18.7	16.5	5.8
0~1 km 风矢量差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	13.3	7.5	4.3

and Klemp, 1982; Trapp and Weisman, 2003; Atkins and Laurent, 2009a; 2009b)。

综合以上分析,本次过程近地面尽管存在稳定温度层结和不太干的相对湿度,这些不利条件在以往夜间雷暴大风过程中也出现过(Adams-Selin and Johnson, 2010; 2013; 曲晓波等, 2010; 孙敏等, 2023),但是具有强垂直风切变、超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 CAPE 和 DCAPE,尤其是具有极端的 850 hPa 与 500 hPa 温度差,有利于形成长生命史的风暴并造

定是形成区域性雷暴大风天气的最重要的参数(Doswell III and Evans, 2003; Coniglio et al, 2012)。这种层结下,对流有效位能(CAPE)为 $2020 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,下沉对流有效位能(DCAPE)达到 $1446 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,当这两个参量均超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,非常有利于雷暴大风天气的出现(杨磊和郑永光, 2023)。

水汽方面,尽管 850~700 hPa 最大相对湿度仅为 52.2%,但是在低空急流输送水汽的作用下 925 hPa 比湿略高于气候态上同月雷暴大风发生时需要的的水汽条件(杨磊和郑永光, 2023)。另外,500~400 hPa 最低相对湿度和 LCL 至地面最低相对湿度均较高(表 1)。由于低的相对湿度更有利于降水蒸发,会在近地面形成更强的冷池,下文分析也发现,本次过程较高的相对湿度导致冷池并没有以往过程那么强。

垂直风切变方面,0~6 km 和 0~1 km 风矢量达到了强垂直风切变的标准(表 1),有利于风暴的维持发展,进而延长强对流天气的时间;另一方面也会形成强上升运动,通过扭转项形成 MV(Weisman

成雷暴大风事件。

3 对流风暴和 MV 演变特征

3.1 飑线登陆渤海湾产生初期雷暴大风

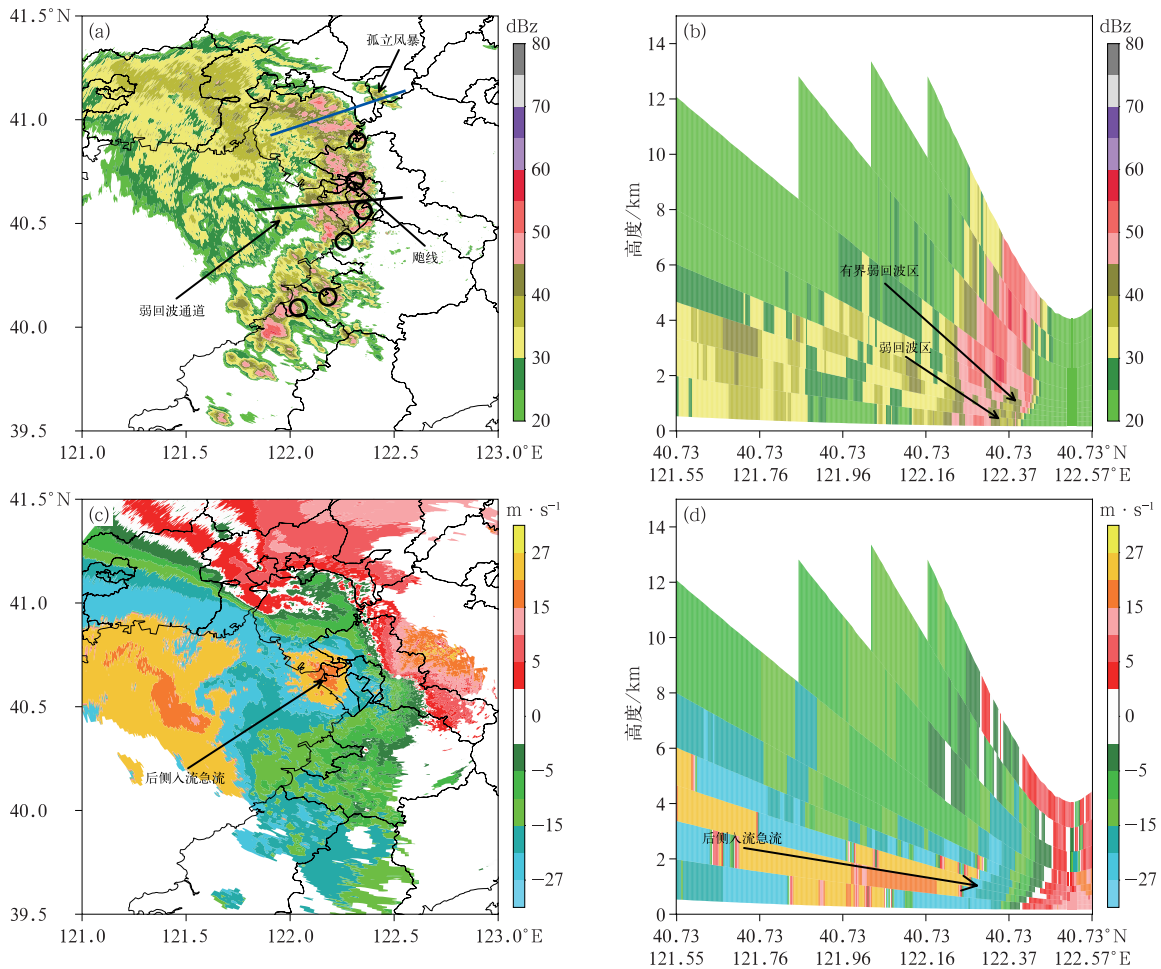
7 月 6 日夜,华北地区触发的风暴在强静力不稳定和垂直风切变的环境下,发展为飑线(图略)。7 日 01:23(图 3a),该飑线经过渤海后,向辽宁中部

地区移动,40 dBz 以上回波尺度达到 180 km,尽管其南端存在断裂,但是整个风暴是准连续的,达到俞小鼎等(2020)对飚线定义的标准。该飚线逐渐向东北方向移动,和以往常见的向南移动的雷暴大风过程存在不同(蒋超等,2024;Xu et al,2024a),这与本次过程中辽宁位于东北冷涡东南象限,引导气流为西南风有关。

在飚线的前沿,入流一侧存在反射率因子梯度大值区(图 3a),垂直结构上,风暴移动方向前侧,低空存在弱回波区,中层存在有界的弱回波区(图 3b),以上特征说明风暴移动前侧存在强上升气流。而在风暴移动方向的后侧存在弱回波通道(图 3a),径向速度图上表明存在 RIJ(图 3c,3d),低仰角出现速度

模糊,最大速度达到 $-37.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,距地面高度 370 m,有利于地面出现雷暴大风。实况在 01:20—01:25,飚线产生 6 站次雷暴大风。但是从大风的分布上来看,雷暴大风分布较为分散,这是因为飚线中镶嵌着多个尺度更小的下击暴流,这些下击暴流是造成大风的直接原因(孙继松,2023;王秀明等,2023)。随后飚线向东北方向移动,大风站次逐渐减少。

在飚线登陆渤海湾的初期,地面气温 1 h 最大降温仅 $4 \sim 5^\circ\text{C}$ (图略),显著低于以往白天雷暴大风过程(Xu et al,2024a),这与上文提到的 500~400 hPa 最低相对湿度和近地面相对湿度较高有关。由于强的冷池更有利于出现弓状回波特征(Atkins



注:图 a 中黑圈为 γ 中尺度涡旋,简称 MV,下同。

图 3 2023 年 7 月 7 日 01:23 营口 SA 雷达 0.5° 仰角 (a) 反射率因子及 (b) 沿图 3a 中黑线的反射率因子垂直剖面, (c) 径向速度及 (d) 沿图 3a 中黑线的径向速度垂直剖面

Fig. 3 (a) Radar reflectivity and (b) its vertical profile along the black line in Fig. 3a,

(c) radial velocity and (d) its vertical profile along the black line in Fig. 3a

at 0.5° elevation of Yingkou SA Radar at 01:23 BT 7 July 2023

and Laurent, 2009a; 2009b), 此时飑线没有出现弓状特征。

3.2 合并型弓状回波导致大风再次增多

3.2.1 风暴合并后出现 MV

7月7日01:23, 在飑线的北端、移动方向的前侧存在着孤立风暴(图4a, 4b)。01:29—01:40, 飑线和孤立风暴在2~4 km处快速合并(图4c~4f)。从01:40雷达图像可见(图4e), 合并风暴尽管没有出现弓状结构, 但在风暴合并处出现两个逆时针旋转的MV(图4g)。其中南侧的MV旋转速度较弱, 持续时间也较短, 而北侧MV的旋转更强, 初始旋转速度为 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 尺度为8.6 km, 顶高为3.3 km, 底高为1.8 km, 厚度仅为1.5 km, 极其浅薄。MV初生阶段的旋转强度和垂直厚度均未达到中气旋的标准(Yu et al, 2012)。

MV生成于风暴合并期间, 生成位置也位于合并处。风暴合并常会造成更强的上升气流, 在强上升气流扭曲作用下, 将此区域的水平涡度扭曲形成MV的初始涡旋(Lee et al, 2006; French and Parker, 2012), 这和华南合并型弓形回波过程MV形成特征相似(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023)。在以往风暴合并过程中, 也出现过在风暴合并高度处生成MV的现象(易笑园等, 2012; Zeng and Wang, 2022; 杨磊等, 2023), 以上研究均说明风暴合并对MV的形成起到重要作用。另外, 在MV生成的初始阶段, MV附近没有出现大风, 合并风暴内RIJ呈现出明显的减弱趋势(图4h), 此阶段5 min雷暴大风站次出现减少的现象(图1b)。

3.2.2 相控阵雷达观测到的MV精细特征

随着合并风暴向东北方向移动, MV始终位于其北端(图略)。7日02:00后, 合并风暴进入位于沈阳西南侧的辽中区, 上文提到的位置偏北、旋转更强的MV(图4g)开始被沈阳相控阵雷达监测到。该MV位于反射率因子 $>35 \text{ dBz}$ 回波的北侧(图5a)。从相控阵雷达观测到的MV的分钟级演变特征可见(图5b, 5c), 02:00—02:10期间, MV主要位于2~6 km高度。随后MV存在两次加强的特征, 其中在02:10开始出现第一次旋转加强且向上垂直伸展的特征, 02:15发展最强盛, 顶高达到9.2 km, 底高为2.8 km, 厚度达到6.4 km, 其中低层3~5 km范围内旋转速度更强, 达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 满足中等强度中气旋的标准(Yu et al, 2012)。

而第二次加强发生在02:47后, 厚度最厚仅为4.6 km, 最强旋转速度为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 加强特征较第一次弱。

本次MV生成的高度约在2~3 km, 形成初期较为浅薄, 强烈旋转的位置位于MV的低层, 这与以往位于经典弓状回波头部、形成于低空且旋转中心常位于低层的MV一致(Trapp and Weisman, 2003; Atkins et al, 2009a; 2009b), 但是本次MV垂直伸展厚度要显著高于上述经典型弓形回波MV, 另外本次MV的底高要高于华南合并型弓形回波过程(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023), 这也可能是MV旋转加强后地面没有立刻出现大风的原因。

MV在第一次加强后, 合并风暴出现以下特征: 合并风暴回波顶高最高的位置出现在MV上方(图略), 同时出现回波顶高升高的特征(图5c), MV加强前, 回波顶高仅为12 km, MV加强后, 回波顶高在02:20开始升高, 02:22快速升高到13 km以上, 该回波顶高一直维持到02:34, 随后出现降低的现象。在风暴顶升高的同时, 02:22, 合并风暴内 $>35 \text{ dBz}$ 的回波出现弓状特征(图5d), MV位于弓状的头部。对比MV加强后最低仰角径向速度图还可以发现, 02:15, MV下方也存在RIJ, 最大速度仅为 $-16 \sim -14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5e), 而02:40, 径向速度图上出现速度模糊, MV下方最大径向速度达到 $-24 \sim -22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5f), 因此MV第一次加强25 min后、第二次加强前, 其下方的RIJ出现显著加强的特征。

分析MV的精细结构和逐分钟大风的演变发现(图5c, 5g): 一是随着MV向东北方向移动, 大风站点逐渐靠近MV的移动路径(图5g); 二是在MV第一次加强期间, 以及MV处风暴出现更强的风暴顶和弓状特征时, 大风站次均没有增加; 在MV下方出现更强的RIJ特征后, 在MV和RIJ共同影响区域内, 雷暴大风分钟站次才开始显著增加, 其中在02:42和02:45均达到3站次。

综上, MV首次加强发生在合并风暴演变为弓状回波并导致雷暴大风发生前, 对雷暴大风再次增加有指示意义, 因此有必要分析首次加强的原因。在02:04—02:10(图6a, 6c, 6d), 距离MV南侧约17 km处, $>50 \text{ dBz}$ 的回波顶高从7 km快速下降到5 km处; 径向速度图上(图6e, 6f), 在强回波下降区域, $>21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流出速度区域存在增加的现象, 以上雷达特征说明此处出现下击暴流(王秀明

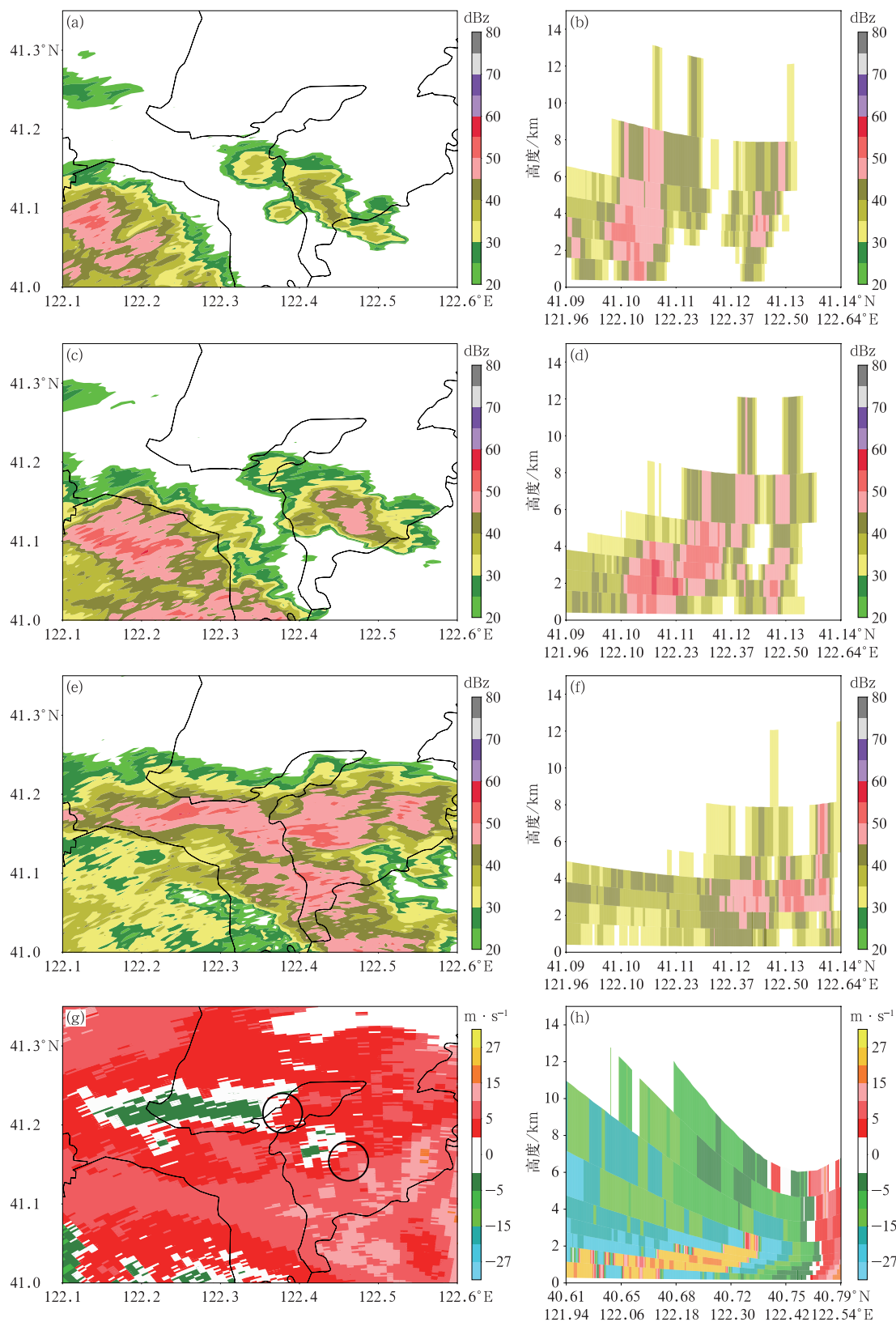
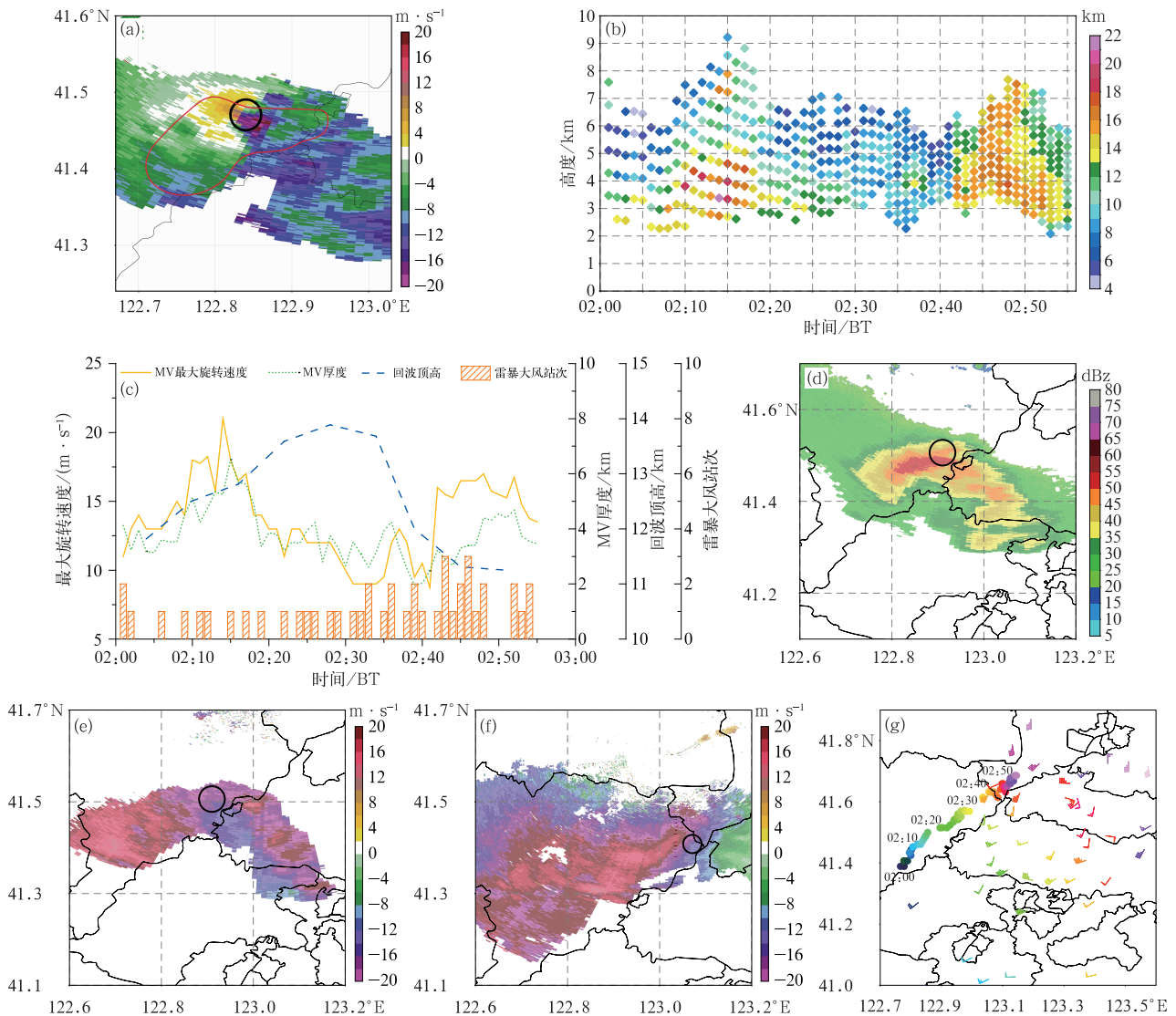


图 4 2023 年 7 月 7 日营口 SA 雷达 2.4° 仰角 (a,b)01:23, (c,d)01:29, (e,f)01:40 (a,c,e) 反射率因子及 (b,d,f) 沿图 3a 中蓝线的反射率因子垂直剖面, (g)01:40 径向速度及 (h)01:46 沿图 3a 中黑线的径向速度垂直剖面

Fig. 4 (a, c, e) The radar reflectivity and (b, d, f) its vertical profile along the blue line in Fig. 3a at (a, b) 01:23 BT, (c, d) 01:29 BT and (e, f) 01:40 BT, and (g) radial velocity at 01:40 BT and (h) its vertical profile along the black line in Fig. 3a at 01:46 BT at 2.4° elevation of Yingkou SA Radar on 7 July 2023



注:图 a 中红线为反射率因子 35 dBz 等值线;图 g 中 MV 和雷暴大风颜色相同时表示发生时刻一致。

图 5 2023 年 7 月 7 日沈阳相控阵雷达(a)02:15 时 5.4°仰角径向速度,(b)02:00—02:55 MV 旋转速度高度-时间演变,(c)02:00—02:55 逐分钟 MV 最大旋转速度、MV 厚度、MV 处回波顶高和 8 级以上雷暴大风出现站次时间演变,(d)02:22 时 8.1°仰角反射率因子,(e)02:15 和(f)02:40 时 0.9°仰角径向速度,(g)02:00—03:00 MV (彩点)和雷暴大风(风羽)分布

Fig. 5 (a) The radial velocity at 5.4° elevation at 02:15 BT, (b) time-height evolution of MV rotation velocity from 02:00 BT to 02:55 BT, (c) time evolution of MV maximum rotation speed, MV thickness, echo top at MV, and number of thunderstorm gale above scale 8 from 02:00 BT to 02:55 BT, (d) radar reflectivity at 8.1° elevation at 02:22 BT, (e, f) radial velocity at 0.9° elevation at (e) 02:15 BT and (f) 02:40 BT, (g) distribution of MV (colored dot) and thunderstorm gales (barb) from 02:00 BT to 03:00 BT of Shenyang Phased Array Radar on 7 July 2023

等,2023)。下击暴流在地面形成较之前更强的冷池,1 h 变温最大达到 -5°C (图 6b),MV 恰好位于该冷池移动方向前侧的北边界。

02:10 的相控阵雷达资料显示(图 7a,7b),在风暴移动前侧存在 CC 低值区,CC 值仅为 0.7,CC 低

值区向上伸展到 5 km 附近,并向合并风暴的后侧倾斜。其中近地面 CC 低值区位于冷池边缘,该区域的出现表征更强冷池前侧形成强上升气流,将近地层的树叶、杂草、昆虫等碎屑卷入到空中,进而形成 CC 低值区(Kumjian and Ryzhkov,2008)。而在

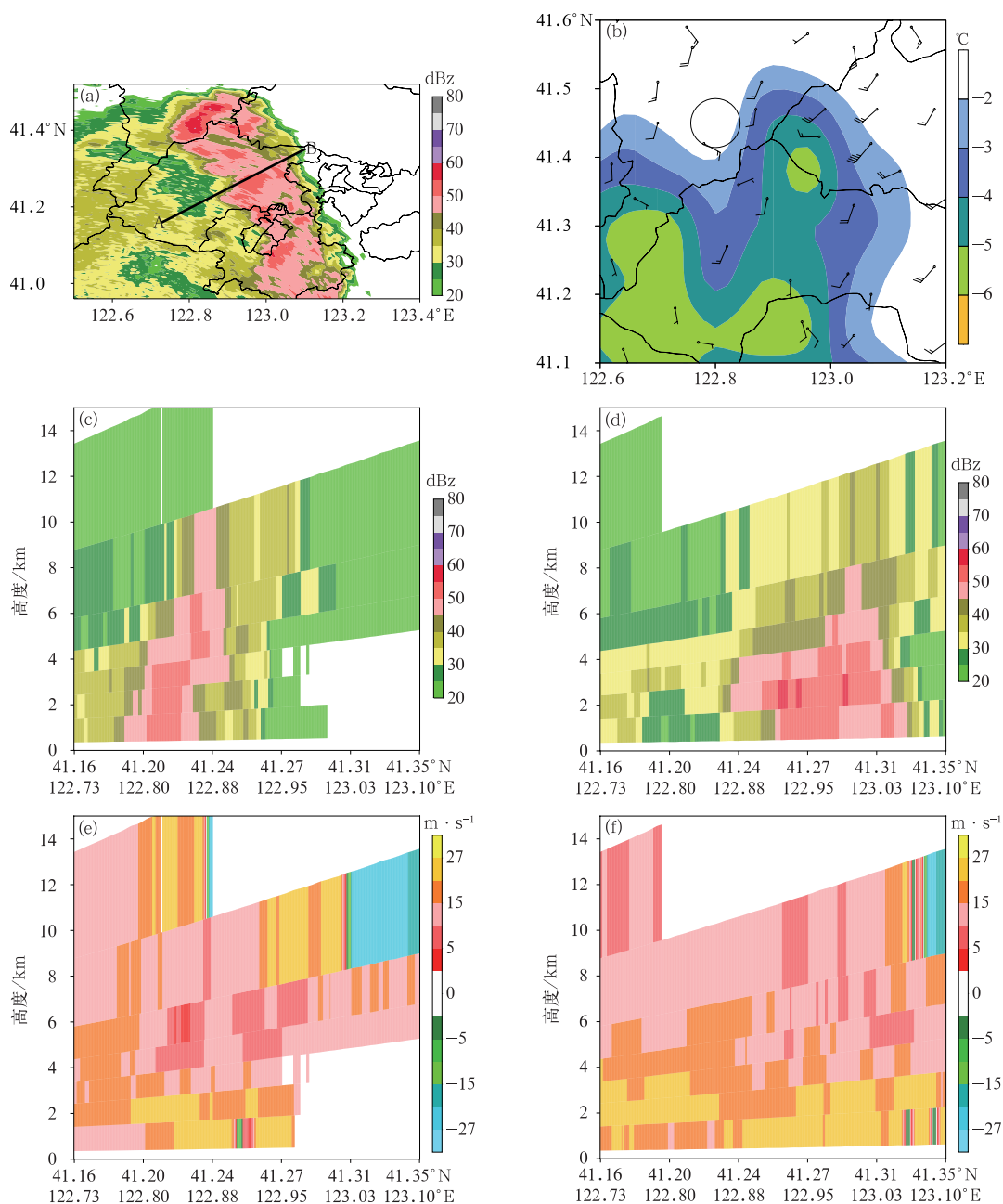


图 6 2023 年 7 月 7 日营口 SA 雷达 0.5°仰角(a)02:10 反射率因子,(b)02:15 地面

1 h 变温(填色)和风场(风羽),(c,e)02:04 及(d,f)02:10 沿图 6a 中

黑线的(c,d)反射率因子和(e,f)径向速度垂直剖面

Fig. 6 (a) Radar reflectivity at 02:10 BT, (b) 1 h temperature variation (colored) and wind (barb) at surface at 02:15 BT, and vertical profiles of (c, d) radar reflectivity and (e, f) radial velocity at (c, e) 02:04 BT and (d, f) 02:10 BT along the black line in Fig. 6a at 0.5° elevation of Yingkou SA Radar on 7 July 2023

2~5 km 处,径向速度剖面(图 7c)显示此区域存在风场辐合特征,表征风暴移动前侧存在上升气流,此区域也常存在 CC 低值区。因此,风暴移动前侧近地面到 5 km 的低值区是由冷池边缘的上升气流和

风暴内原本存在上升气流的共同作用导致,在上升气流的拉伸作用下 MV 得以垂直发展(图 5b,5c)。

3.2.3 MV 对雷暴大风的影响机制

MV 第一次加强后,02:16 的相控阵雷达监测到

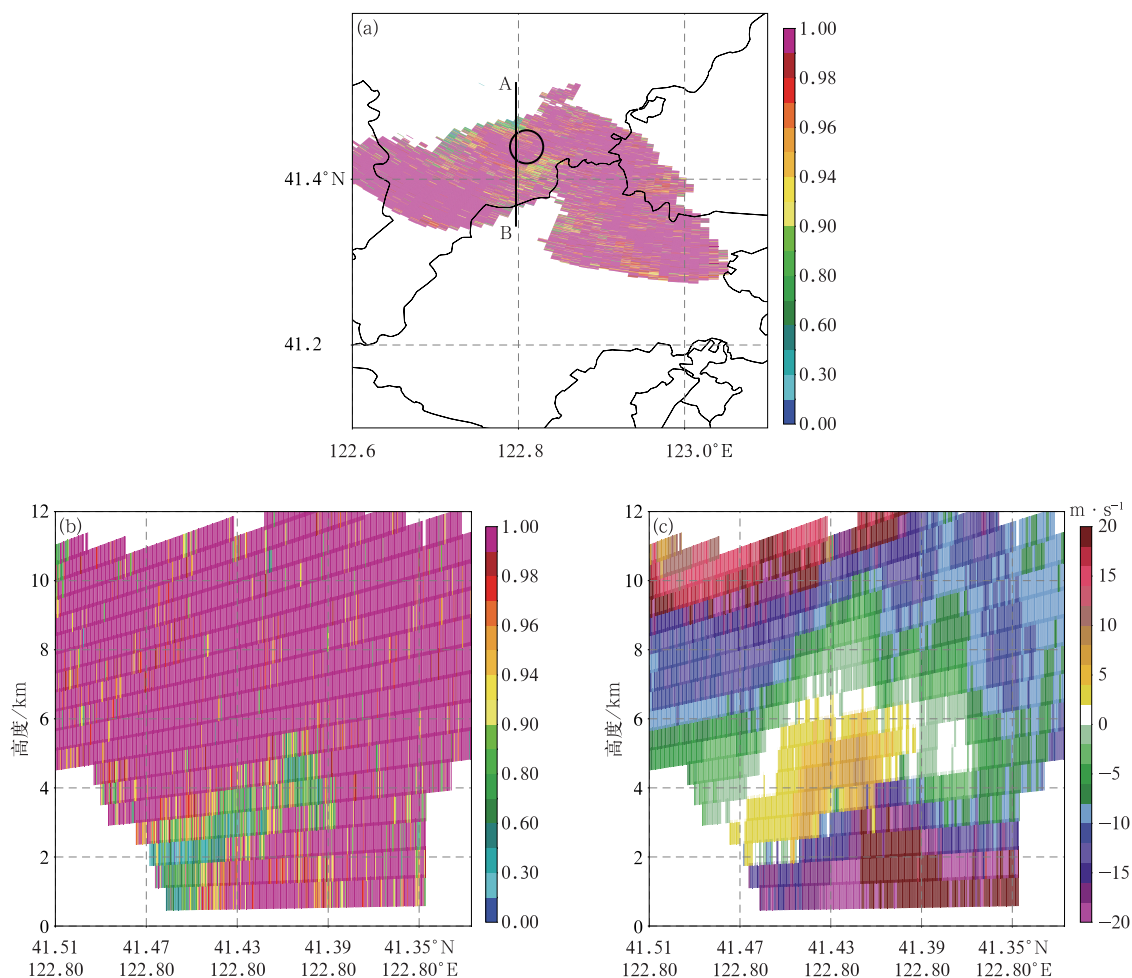


图7 2023年7月7日02:11沈阳相控阵雷达0.9°仰角(a)CC分布,

(b)CC和(c)径向速度沿图7a中黑线的垂直剖面

Fig. 7 (a) Distribution of CC, (b, c) vertical profiles of (b) CC and (c) radial velocity along the black line in Fig. 7a at 0.9° elevation of Shenyang Phased Array Radar at 02:11 BT 7 July 2023

MV处出现 Z_{DR} 加强的特征,达到2~3 dB(图8a), $Z_{DR}>1$ dB的伸展高度可达5 km(图8b),发展高度超过0℃层(图略),满足 Z_{DR} 柱的标准,表征风暴在此区域存在强的上升气流(Illingworth et al, 1987; Bringi et al, 1991)。这证实旋转加强的MV形成更强上升运动,将暖湿气流输送到风暴中,进而导致风暴加强,所以上文发现MV旋转加强后,合并风暴的回波顶高最高处出现在MV上空并逐渐升高的现象(图5c)。MV处的风暴发展更加旺盛,具有更长的生命史,进而延长雷暴大风的持续时间。

图8c给出MV处 Z_{DR} 垂直廓线的演变。在MV旋转最强的02:15时,其上空也没有出现 Z_{DR} 加强的现象,而是在4 min(即02:19)后,MV处才出现 Z_{DR} 增加的现象。 Z_{DR} 在02:22伸展高度最高,

达到5.5 km,随后MV处 Z_{DR} 柱出现降低的现象。结合MV旋转特征发现,在MV伸展高度达到最高(02:15)的7 min后,MV处的 Z_{DR} 柱伸展高度最高。

从MV附近冷池特征的演变来看(图9a),在MV第一次旋转加强(02:10—02:15)和MV处 Z_{DR} 加强(02:20—02:25)期间,冷池特征均较弱,面积<200 km²,平均温度和最低温度反而出现升高的现象。在 Z_{DR} 特征减弱后,冷池出现迅速加强,首先在02:25—02:35,面积从170 km²迅速增加到426 km²,随后继续扩大,而最低温度和平均温度在02:30出现迅速降低的现象,分别在02:40和02:45达到最低值,为-6.5℃和-5.0℃。强的冷池有利于RIJ的形成,上文提到在02:40后MV移动方向的后侧出现RIJ(图5f)。而冷池的形成与风暴内微物理过

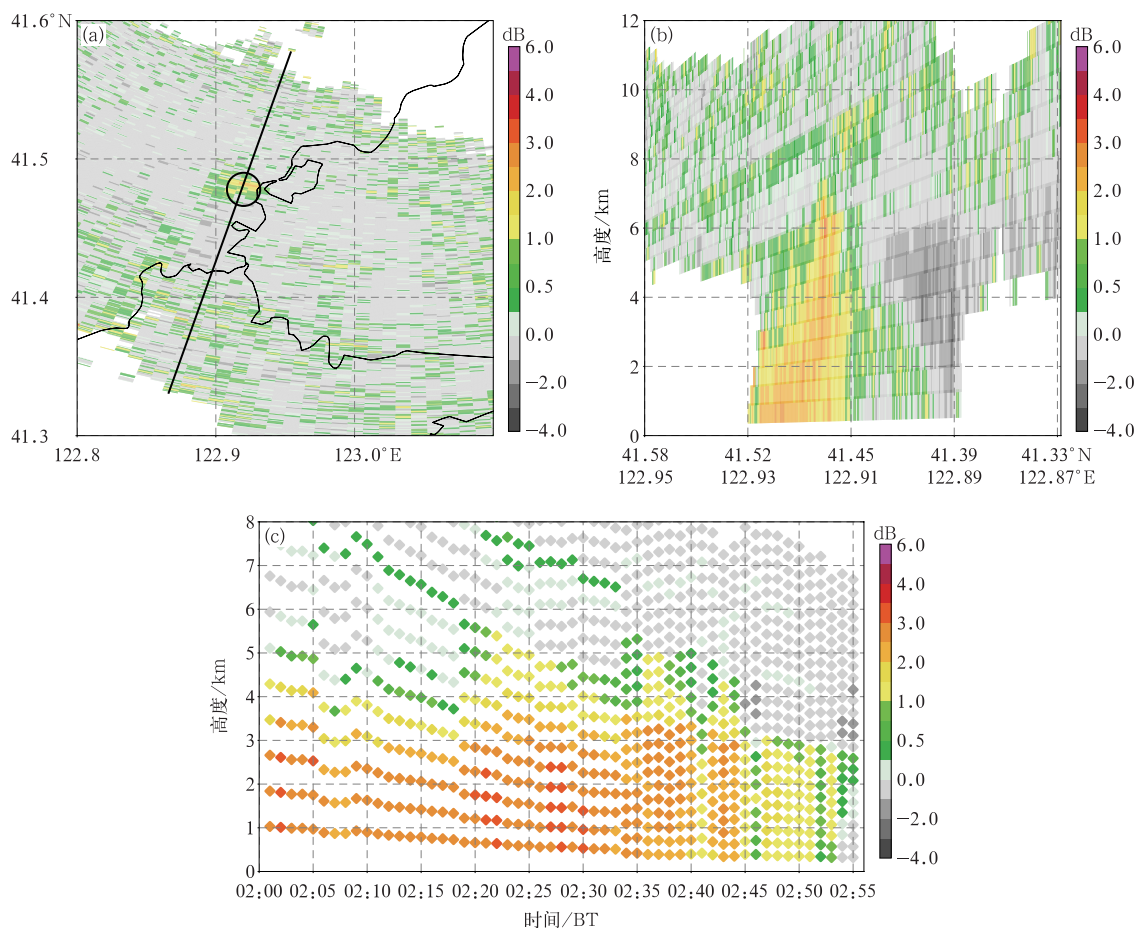


图 8 2023 年 7 月 7 日沈阳相控阵雷达(a,b)02:16 时 9.9°仰角(a)差分反射率因子及
(b)沿图 8a 中黑线的差分反射率因子垂直剖面,
(c)02:00—02:55 MV 处差分反射率因子平均值的时间演变

Fig. 8 (a) Z_{DR} and (b) its vertical profile along the black line in Fig. 8a at 02:16 BT at 9.9° elevation, (c) time evolution of Z_{DR} average at MV from 02:00 BT to 02:55 BT of Shenyang Phased Array Radar on 7 July 2023

程有关,从冷池偏振参量特征来看(图 9b,9c),在 MV 形成强上升气流的时段后,冷池上空 Z_{DR} 和 K_{DP} 分别在 02:30 和 02:35 出现迅速增大,达到 1~4 dB 和 $2.5 \sim 5.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,意味着上空出现数量更多、尺度更大的降水粒子。但是在 02:40 均出现迅速减小,5 min 内 Z_{DR} 和 K_{DP} 分别减小到 0.25~1.00 dB 和 $0 \sim 1 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,说明冷池上方水凝物的数量和尺度均在快速减小,水凝物的升华、融化和蒸发会吸收大气中的热量,进而导致其后冷池加强,并促进 RIJ 的形成(Mahoney and Lackmann, 2011; Adams-Selin and Johnson, 2013; Zhou et al, 2020)。

本次过程 MV 的底高高于经典弓状回波内的 MV(Schenkman and Xue, 2016)和华南合并型弓状回波过程(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023),不会直

接造成地面出现大风,但会通过影响风暴内部动力和微物理过程,导致形成强的冷池和 RIJ,使其下方出现更多的雷暴大风。总结形成过程的概念模型(图 10):风暴合并初期(图 10a),夜间近地面相对湿度并没有白天那么低,所以地面冷池较弱,风暴没有出现弓形特征;尽管合并过程形成 MV,但是 RIJ 出现减弱的现象,造成的大风站次逐渐减少。MV 旋转加强后(图 10b),形成更强的上升运动,导致风暴内出现数量更多、尺度更大的降水粒子,MV 处的风暴出现弓状特征;当上升气流减弱后,这些降水粒子在下落过程中通过蒸发作用导致地面冷池强度加强、面积扩大,MV 下方的 RIJ 也迅速加强,最终在 MV 的后侧、加强冷池和 RIJ 的区域集中出现更多站次的雷暴大风。

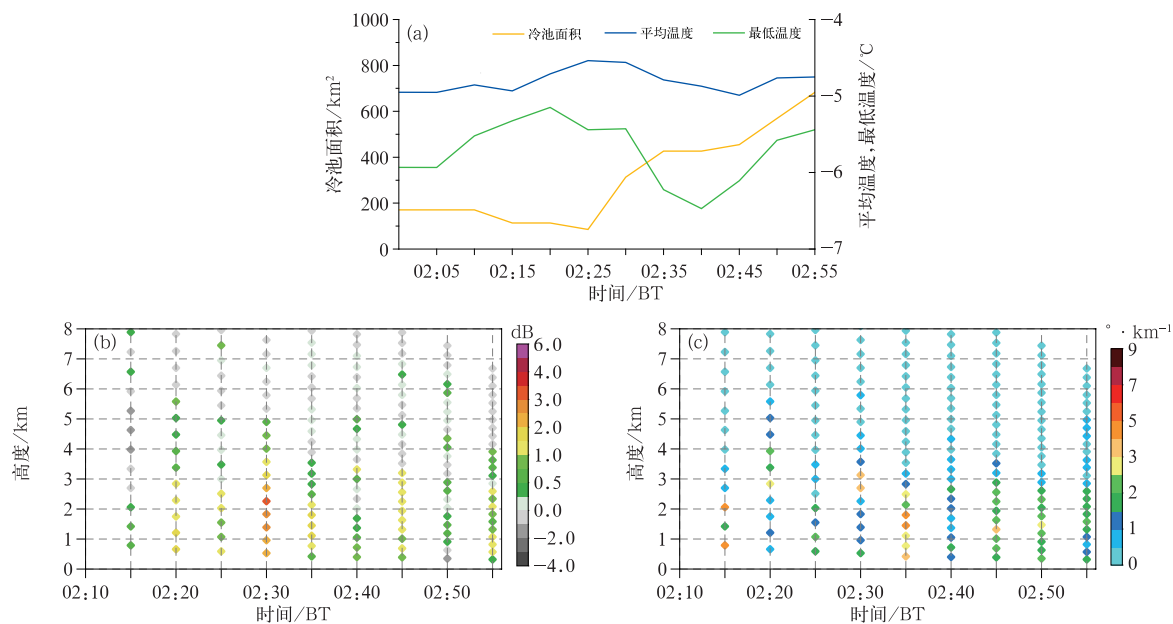


图 9 2023 年 7 月 7 日 (a)02:00—02:55 冷池特征时间演变, (b,c)02:10—02:55 冷池上空
(b)差分反射率因子和 (c)差分传播相移率时间演变

Fig. 9 Time evolutions of (a) the characteristics of cold pool from 02:00 BT to 02:55 BT, (b) Z_{DR} and
(c) K_{DP} above cold pool from 02:10 BT to 02:55 BT 7 July 2023

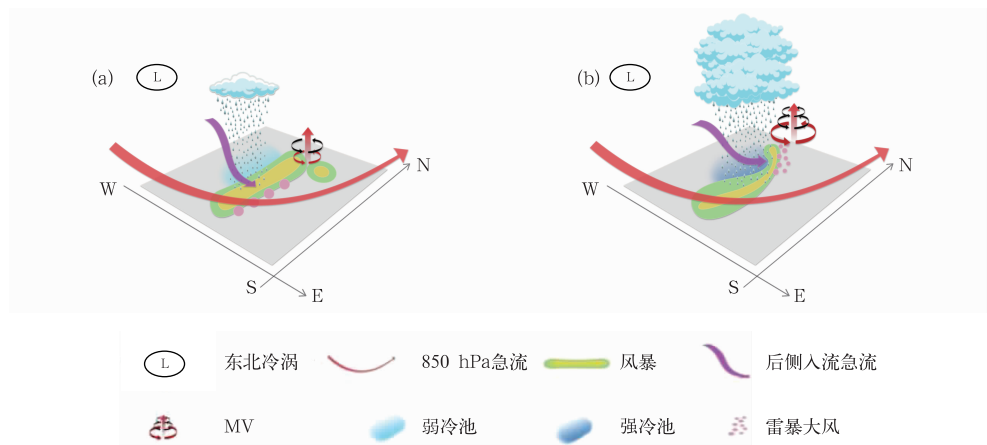


图 10 MV 对合并型弓形回波和雷暴大风影响机制示意
(a)MV 形成初期, (b)MV 加强期间

Fig. 10 Schematic diagram of the impact mechanism of MV on merged
bow echoes and thunderstorm gaies
(a) early stage of MV formation, (b) MV enhancement period

4 结论与讨论

本次针对东北冷涡背景下 MV 对合并型弓状回波过程的影响机制进行分析,得到以下结论:

(1)辽宁位于东北冷涡东南象限,受低空切变线和低空急流影响,具有极端的 850 hPa 与 500 hPa 温度差等有利条件,因此辽宁出现了雷暴大风天气。

但是夜间近地面相对湿度接近 70%,所以飊线初期并没有形成强冷池,也没有弓状特征,造成的大风较为分散。

(2)飊线和其前侧的孤立风暴合并,在合并的位置生成 MV。相控阵雷达监测到 MV 的底高始终高于 2 km,出现两次旋转加强且向上垂直发展的现象,由于 MV 底高较高,也没有出现向下发展的现象,所以并不能直接造成地面出现雷暴大风。

(3) MV 形成初期,其附近 17 km 处的下击暴流在近地面形成强冷池,在强冷池边缘形成的上升气流和风暴原始存在的上升气流共同拉伸作用,导致 MV 首次加强。此时合并风暴的风暴顶在 MV 上空最强,并存在升高的现象,尽管此时 MV 处的风暴出现弓状特征,但是并没有出现雷暴大风增加的现象。

(4) MV 旋转加强后,其上空形成 Z_{DR} 柱,意味着强烈旋转的 MV 产生强上升运动,导致 MV 处的风暴顶升高并维持,进而延长产生大风的时间。当 Z_{DR} 柱减弱后,风暴内降水粒子出现尺度和大小迅速减小的现象,蒸发作用导致 MV 移动方向后侧形成更强的冷池,RIJ 同时快速加强,最终导致 MV 下方强冷池和 RIJ 处集中出现雷暴大风。

本次过程, MV 主要通过影响风暴的热动力和微物理过程,进而造成更强的雷暴大风。本文仅对东北冷涡背景下合并型弓状回波的个例进行研究,东北冷涡背景下常会生成多个风暴,也常发生风暴合并的现象,风暴合并有利于风暴加强并出现不同类型 γ 中尺度涡旋,因此今后需要加强东北冷涡背景下风暴合并过程 γ 中尺度涡旋观测特征的统计研究,并加强利用相控阵雷达和自动气象站等资料研究不同类型 γ 中尺度涡旋及环境条件相互作用对大风的影响机制,同时研发 γ 中尺度涡旋和冷池观测特征的客观识别分析技术,以便提升对极端天气的预警能力。

参考文献

- 蒋超,陈传雷,张凯,等,2024. 辽宁地区飑线特征和形成条件[J]. 气象,50(7):791-803. Jiang C, Chen C L, Zhang K, et al, 2024. Squall line characteristics and formation conditions in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 50(7):791-803(in Chinese).
- 刘黎平,胡志群,吴翀,2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应用[J]. 气象科技进展,6(3):28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):28-33(in Chinese).
- 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等,2010. 2009 年 6 月淮河中下游三次飑线过程的对比分析[J]. 气象,36(7):151-159. Qu X B, Wang J J, Yang X X, et al, 2010. Contrast analysis of three squall lines in middle and lower reaches of the Huaihe River in June 2009[J]. Meteor Mon, 36(7):151-159(in Chinese).
- 孙继松,2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热力学过程[J]. 气象,49(1):1-11. Sun J S, 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteor Mon, 49(1):1-11(in Chinese).
- 孙军,谌芸,杨舒楠,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象,38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙敏,赵畅,吴君靖,等,2023. 一次夜间 β 中尺度弓形回波形成机理研究[J]. 气象,49(10):1187-1202. Sun M, Zhao C, Wu J J, et al, 2023. Study on the formation mechanism of a nocturnal meso- β scale bow echo[J]. Meteor Mon, 49(10):1187-1202(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,费海燕,等,2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. 气象,49(2):129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon, 49(2):129-145(in Chinese).
- 吴海英,孙继松,慕瑞琪,等,2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报,81(2):205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2):205-217(in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 81(1):40-57(in Chinese).
- 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. Observational characteristics of thunderstorm gusts in Northeast China and their association with the Northeast China cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 81(3):416-429(in Chinese).
- 杨磊,郑永光,袁子鹏,等,2023. 2019 年 8 月 16 日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J]. 气象学报,81(1):19-39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al, 2023. The low-level meso- γ -scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing mechanisms[J]. Acta Meteor Sin, 81(1):19-39(in Chinese).
- 易笑园,张义军,沈永海,等,2012. 一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析[J]. 气象学报,70(5):974-985. Yi X Y, Zhang Y J, Shen Y H, et al, 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process[J]. Acta Meteor Sin, 70(5):974-985(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,120. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press, 120(in Chinese).
- 张羽,陈炳洪,曾琳,等,2023. 基于 X 波段双偏振相控阵雷达的超级单体风暴观测分析[J]. 热带气象学报,39(2):218-229. Zhang Y, Chen B H, Zeng L, et al, 2023. X-band dual-polarization

- phased-array radar observations of a supercell[J]. *J Trop Meteor*, 39(2):218-229(in Chinese).
- 郑永光, 宋敏敏, 2021. 冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J]. *热带气象学报*, 37(5/6):710-720. Zheng Y G, Song M M, 2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective high winds and hail in China[J]. *J Trop Meteor*, 37(5/6):710-720(in Chinese).
- Adams-Selin R D, Johnson R H, 2010. Mesoscale surface pressure and temperature features associated with bow echoes[J]. *Mon Wea Rev*, 138(1):212-227.
- Adams-Selin R D, Johnson R H, 2013. Examination of gravity waves associated with the 13 March 2003 bow echo[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11):3735-3756.
- Atkins N T, Laurent M S, 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging potential[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5):1497-1513.
- Atkins N T, Laurent M S, 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5):1514-1532.
- Bluestein H B, Parker S S, 1993. Modes of isolated, severe convective storm formation along the dryline[J]. *Mon Wea Rev*, 121(5):1354-1372.
- Bringi V N, Burrows D A, Menon S M, 1991. Multiparameter radar and aircraft study of raindrop spectral evolution in warm-based clouds[J]. *J Appl Meteor*, 30(6):853-880.
- Burke P C, Schultz D M, 2004. A 4-Yr climatology of cold-season bow echoes over the continental United States[J]. *Wea Forecasting*, 19(6):1061-1074.
- Coniglio M C, Corfidi S F, Kain J S, 2012. Views on applying RKW theory: An illustration using the 8 May 2009 derecho-producing convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 140(3):1023-1043.
- Doswell III C A, Evans J S, 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences[J]. *Atmos Res*, 67/68:117-133.
- Finley C A, Cotton W R, Pielke Sr R A, 2001. Numerical simulation of tornadogenesis in a high-precipitation supercell. Part I: storm evolution and transition into a bow echo[J]. *J Atmos Sci*, 58(13):1597-1629.
- French A J, Parker M D, 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms[J]. *Wea Forecasting*, 27(2):255-278.
- French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. *Mon Wea Rev*, 142(12):4791-4822.
- Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago: Satellite and Mesometeorology Research Project, University of Chicago.
- Illingworth A J, Goddard J W F, Cherry S M, 1987. Polarization radar studies of precipitation development in convective storms[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113(476):469-489.
- Klimowski B A, Bunkers M J, Hjelmfelt M R, et al, 2003. Severe convective windstorms over the northern High Plains of the United States[J]. *Wea Forecasting*, 18(3):502-519.
- Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J, 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes[J]. *Wea Forecast*, 19(4):727-734.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 47(7):1940-1961.
- LaPenta K D, Bosart L F, Galarneau T J, et al, 2005. A multiscale examination of the 31 May 1998 Mechanicville, New York, Tornado[J]. *Wea Forecasting*, 20(4):494-516.
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: cell mergers and associated tornado incidence[J]. *Wea Forecasting*, 21(4):449-464.
- Liu Q Q, Xu X, Zhao K, et al, 2023. A merger-formation bow echo caused by low-level mesovortex in South China[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 128(8):e2022JD037954.
- Mahoney K M, Lackmann G M, 2011. The sensitivity of momentum transport and severe surface winds to environmental moisture in idealized simulations of a mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 139(5):1352-1369.
- Meng Z Y, Zhang F Q, Markowski P, et al, 2012. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China[J]. *J Atmos Sci*, 69(4):1182-1207.
- Schenkman A D, Xue M, 2016. Bow-echo mesovortices: a review[J]. *Atmos Res*, 170:1-13.
- Siggia A D, Passarelli Jr R E, 2004. Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation[C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Radar in Meteorology. Visby: ERAD: 67-73.
- Skamarock W C, Weisman M L, Klemp J B, 1994. Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 51(17):2563-2584.
- Smull B F, Houze Jr R A, 1987. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation[J]. *Mon Wea Rev*, 115(12):2869-2889.
- Tao W, Zheng L L, Hao Y, et al, 2023. An extreme gale event in East China under the Arctic potential vorticity anomaly through the Northeast China cold vortex[J]. *Adv Atmos Sci*, 40(12):2169-2182.
- Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: their genesis and implications[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11):2804-2823.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy[J]. *Mon Wea Rev*, 110(6):504-520.
- Weisman M L, Trapp R J, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: overview and dependence on environmental shear [J]. *Mon Wea Rev*, 131(11):2779-2803.
- Wolf P L, 1998. WSR-88D radar depiction of supercell-bow echo interaction: unexpected evolution of a large, tornadic, "comma-shaped" supercell over eastern Oklahoma[J]. *Wea Forecasting*,

- 13(2):492-504.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015a. The Genesis of mesovortices within a real-data simulation of a bow echo system[J]. *J Atmos Sci*, 72(5):1963-1986.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015b. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the Central United States; analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation[J]. *Mon Wea Rev*, 143(6):2266-2290.
- Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, 2024a. Evolution characteristics and mechanism of meso- γ -scale vortex in an atypical bow echo in the North China Plain[J]. *Atmos Res*, 311:107657.
- Xu X, Ju Y Y, Liu Q Q, et al, 2024b. Dynamics of two episodes of high winds produced by an unusually long-lived quasi-linear convective system in South China[J]. *J Atmos Sci*, 81(8):1449-1473.
- Yu X D, Wang X, Zhao J, et al, 2012. Investigation of supercells in China; environmental and storm characteristics[C]//Preprints, 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville:AMS.
- Zeng Z L, Wang D H, 2022. On the local rain-rate extreme associated with a mesovortex over South China; observational structures, characteristics, and evolution[J]. *Mon Wea Rev*, 150(5):1075-1096.
- Zhang L N, Sun J Z, Ying Z M, et al, 2021. Initiation and development of a squall line crossing Hangzhou Bay[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 126(1):e2020JD032504.
- Zhou A, Zhao K, Lee W C, et al, 2020. VDRAS and polarimetric radar investigation of a bow echo formation after a squall line merged with a preline convective cell[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 125(7):e2019JD031719.
- Zhou A, Zhao K, Xu X, et al, 2023. A climatological study on the two types of bow echoes over South China[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 128(18):e2023JD038720.

(本文责编:王婷波)