

平凡,杨磊,袁亮,等,2026. 基于 X 波段相控阵雷达的辽宁抚顺短时暴雨过程中多涡旋观测特征研究[J]. 气象,52(1):56-69.
Ping F, Yang L, Yuan L, et al, 2026. Observation characteristics of multi-vortices during short-time rainstorm in Fushun of Liaoning Province based on X-band phased array radar[J]. Meteor Mon, 52(1):56-69(in Chinese).

基于 X 波段相控阵雷达的辽宁抚顺短时暴雨过程中多涡旋观测特征研究^{*}

平 凡^{1,2,3,4,5} 杨 磊^{1,2,4,6} 袁 亮³ 曹世腾^{1,2,4,6} 杨 雪^{1,2,4,6} 袁 潮^{4,5}
郭益嘉⁴ 王改利² 孙 丽⁴

1 全国暴雨研究中心,武汉 430000

2 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室,北京 100081

3 成都信息工程大学大气科学学院,成都 610225

4 中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110166

5 辽宁省盘锦市气象局,盘锦 124010

6 辽宁省气象灾害监测预警中心,沈阳 110166

提 要: 2023 年 8 月 4 日夜间,受罕见的伴有 16 个 γ 中尺度涡旋(简称为 MV)的降水系统影响,辽宁抚顺发生了局地短时暴雨天气。文章利用 X 波段相控阵雷达等多源资料,研究了此次过程中多 MV 的形成原因,归纳了产生强降水 MV 的观测特征。此次过程中,抚顺受高空槽和低空切变线影响,具有充沛水汽、较低抬升凝结高度等有利于短时暴雨发生的环境条件。在强垂直风切变的背景下,当辐合线和等温线的夹角加大时,X 波段相控阵雷达监测到辐合线上出现 16 个 MV,MV 的持续时间、厚度和顶高的平均值分别为 17 min、1.7 km 和 3.5 km,为低空浅薄的 MV。风暴在出现 MV 后,出现强降水(5 min 降水量超过 10 mm)多达 49 次,强降水与 MV 的平均距离仅为 6.2 km。其中第 1 个和第 4 个生成的 MV 共产生 44 次强降水,占所有强降水的 89%,属于强降水 MV。相比于其他 MV,这两个强降水 MV 具有更长的生命史和移动路径,旋转强度更强,厚度也更厚。强降水 MV 均生成于边界层急流显著增强、0~1 km 风矢量差超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和地面气温高达 28°C 的阶段;在生成初期,其低空旋转速度更强,旋转强度达到中等强度中气旋标准,强降水 MV 上空的风暴发展旺盛,此时附近没有出现强降水;当强降水 MV 旋转速度减弱时,风暴强度快速下降,其附近立刻出现强降水。另外,存在多个较弱 MV 与强降水 MV 合并的现象,这有利于强降水 MV 的维持。因而,MV 位置和旋转强度的演变是提前预判强降水的关键。

关键词: 低空 γ 中尺度涡旋,短时暴雨,X 波段相控阵雷达,观测分析,环境背景

中图分类号: P458,P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.072201

Observation Characteristics of Multi-Vortices During Short-Time Rainstorm in Fushun of Liaoning Province Based on X-Band Phased Array Radar

PING Fan^{1,2,3,4,5} YANG Lei^{1,2,4,6} YUAN Liang³ CAO Shiteng^{1,2,4,6} YANG Xue^{1,2,4,6}
YUAN Chao^{4,5} GUO Yijia⁴ WANG Gaili² SUN Li⁴

* 全国暴雨研究开放基金(BYKJ2024M03)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J059,CXFZ2023J013)、中国气象局青年创新团队(CMA2024QN05)、中国气象局复盘专项(FPZJ2024030,FPZJ2024026)、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(2024SYIAEKFZD02)、辽宁省科技计划联合计划(2024-MSLH-232)、中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2023Z019)和辽宁省气象局核心攻关项目(HXGGZ202402)共同资助

2024 年 10 月 9 日收稿; 2025 年 9 月 14 日收修定稿

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

通讯作者:杨磊,主要从事暴雨、强对流预报技术研究. E-mail: yanglei_nuist@163.com

- 1 Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430000
2 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
4 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166
5 Panjin Meteorological Office of Liaoning Province, Panjin 124010
6 Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang 110166

Abstract: Affected by a rare precipitation system with 16 mesovortices (referred to as MV), a local short-time rainstorm process occurred in Fushun of Liaoning Province on the night of 4 August 2023. In this paper, the formation mechanism of MV and the observation characteristics of MV that produced heavy precipitation are analyzed based on multi-source data such as X-band phased array radar. The results show that Fushun was influenced by the high-level trough and low-level shear line and had the abundant water vapor and low lifting condensation height, which were favorable environmental conditions for short-time rainstorm. When the angle between the convergence line and the isotherm line increased under the strong vertical wind shear, a total of 16 MV were detected by X-band phased array radar. The average duration, thickness and top height of the MV were 17 min, 1.7 km and 3.5 km, respectively. These vortices are low-level shallow MV. There were up to 49 times of heavy precipitation with the rainfall amount reaching 10 mm within 5 min, and the average distance between the heavy precipitation stations and MV was only 6.2 km. There were 44 times of heavy precipitation caused by the first and fourth MV, accounting for 89% of all heavy precipitation. Compared to other MV, the two MV that produced heavy precipitation had a longer lifetime and moving distance, with stronger rotation intensity and greater thickness. The two MV were both generated during the stage where the boundary layer jet was significantly enhanced, the 0–1 km wind vector difference exceeded $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the surface temperature was higher than 28°C . In the early stage of the MV, the low-level rotation was even stronger reaching the standard of moderate intensity mesoscale cyclones, with vigorous storm developing above. There was no heavy precipitation near the MV at this time. Subsequently, the rotational speed of the MV diminished, and the storm height rapidly decreased. At this moment, heavy precipitation occurred immediately near the MV. In addition, there was a phenomenon of several weaker MV merging with MV that produced heavy precipitation, which was beneficial for the MV sustainment. In conclusion, the evolution of the position and rotational intensity of MV was crucial for the forecasting of heavy precipitation.

Key words: low-level meso- γ scale vortex (mesovortex), short-time rainstorm, X-band phased-array radar, observational analysis, environmental background

引 言

近年来,短时暴雨频发,例如 2012 年 7 月 21 日北京、2017 年 5 月 7 日广州、2021 年 7 月 20 日郑州均出现了突破历史极值甚至致灾的短时暴雨事件(俞小鼎,2012;Luo et al,2016;Huang et al,2019;Yin et al,2020;2022)。短时暴雨与对流活动及小尺度动力过程有关,局地突发性特征明显,无论精准预报还是提前预警难度均很大,亟需学者们对此类

暴雨的形成机理开展研究(Nielsen and Schumacher, 2018;2020;Li et al,2021;Wang et al,2021)。

已有研究发现,短时暴雨常与 γ 中尺度涡旋环流有关(Orlanski,1975;Funk et al,1999)。早期学者们关注的是超级单体风暴内深厚持久中气旋导致的短时暴雨(Browning,1964;Moller et al,1994;俞小鼎等,2008;Kumjian and Ryzhkov,2012)。而近期研究发现,准线状对流系统导致的短时暴雨中,常存在生命史不足 1 h、位于大气低层的 γ 中尺度涡旋(Weisman and Trapp,2003;Trapp and Weisman,

2003; Atkins and Laurent, 2009a; 2009b; Schenkman and Xue, 2016; 杨磊等, 2023), 又被称为中涡旋 (mesovortex, MV)。尽管 MV 和中气旋均属于 γ 中尺度, 但是两者的三维结构、形成过程和对短时暴雨的影响机制存在差异(戴建华等, 2021; 黎立页等, 2023; 植江玲等, 2024)。在三维结构方面, 中气旋通常出现在 2~6 km 高度, 并会有适当的向上和向下扩展, 更为深厚 (Davies-Jones, 1984; 俞小鼎等, 2020; 郑永光等, 2020), MV 则更浅薄并常出现在近地面 2~3 km 以下, 最大速度中心也位于低层 (Lilly, 1986a; 1986b; Atkins and Laurent, 2009a; 2009b; Tang et al, 2020)。在形成机制方面, 通常是沿着风暴流入方向的水平涡度分量在低层入流转为上升气流时被扭曲为初始垂直涡度, 随后在上升气流的垂直拉伸作用下旋转进一步加强, 进而形成中气旋 (Davies-Jones, 1984; Rotunno and Klemp, 1985; 俞小鼎等, 2008)。而 MV 的形成机制更加复杂, 可能是正在发展的风暴前侧的准线状冷池出流或者成熟的线状风暴后侧下沉气流形成的水平涡管被降水下沉气流扭曲而形成 (Trapp and Weisman, 2003; 孙继松, 2023), 也可能是冷池出流凸起部位的水平涡管被上升气流拉伸而形成 (Atkins and Laurent, 2009b)。另外, 短时暴雨形成时释放潜热, 会加强低层的辐合, 有利于近地面生成 MV, 随后在低层上升气流的拉伸作用下快速发展 (Yin et al, 2020; Zhang et al, 2022; Zeng and Wang, 2022; 孙继松, 2025)。相比于深厚持久的中气旋, 气象雷达对于位于大气低层、更为浅薄、形成机制更复杂的 MV 的观测能力有限, 需要综合分析更高分辨率的多源资料, 才能研究其精细特征和形成条件。

短时暴雨的发生需要较长的降水时间和降水强度, 而降水强度与上升运动、云底水汽、降水效率有关 (Doswell et al, 1996)。如果 MV 的位置与上升气流重合或部分重合, 会产生明显的垂直螺旋度, 使得风暴比无 MV 时具有更长的生命期 (Lilly, 1986a; 1986b)。另外, 强烈旋转的 MV 不仅会形成强的上升气流, 将低层充沛水汽输送到风暴中, 进而加强降水强度, 同时也有助于在降水核心区形成更多且较大的降水粒子, 通过促进碰并增长, 增强降水效率 (Nielsen and Schumacher, 2018; 2020; Wang et al, 2021)。所以短时暴雨常与 MV 有关, 但是近期研究发现并不是所有 MV 都会产生强降水 (Zeng and Wang, 2022; 杨磊等, 2023)。然而, 由于目前缺

少关于产生强降水 MV(简称 RMV)和未产生强降水 MV(简称 NMV)观测特征的对比研究, RMV 的精细特征对短时暴雨的影响机制存在不明, 所以短时暴雨事件的提前预警难度极大。

X 波段相控阵天气雷达能在 1 min 左右完成一个体扫, 尽管其较短的波长使得降水时反射率和双偏振参量的衰减明显 (Bringi et al, 2001; Siggia and Passarelli, 2004; 张羽等, 2023; 张哲等, 2024), 但是速度资料准确性仍然较高, 因此可观测到短时暴雨过程中 MV 的精细特征 (刘黎平等, 2016; 苏永彦和刘黎平, 2022; 梅雨菲等, 2023; 曾琳等, 2023)。2023 年 8 月 4 日, 辽宁抚顺发生短时暴雨事件, 并且此次过程发生在沈阳新建 X 波段相控阵雷达 20 km 范围内。本文基于 X 波段相控阵雷达等多源资料, 分析本次过程多 MV 的精细结构和形成机制, 对比 RMV 与 NMV 观测特征的异同点, 从而加深对伴有 MV 的短时暴雨机理的认识和理解。

1 资料与方法

本文使用经质量控制后的时间分辨率为 5 min 的自动气象站资料, 分析降水实况和地面气象条件。利用 ERA5 再分析资料(时、空分辨率分别为 1 h、 0.25°), 分析本次过程的主要影响系统和环境条件。基于沈阳站的风廓线雷达资料分析风垂直廓线, 定量计算 1 km 以下最大风速和 0~1 km 风矢量差。使用的雷达资料包括: 辽省内及其周边的三维反射率资料, 时间分辨率为 6 min; 沈阳 SC 多普勒天气雷达, 时间分辨率为 6 min; 沈阳 X 波段相控阵雷达, 时间分辨率为 1 min。

参考 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, 根据每个时刻、每个仰角径向速度图, 判断是否存在 MV 以及 MV 所处的位置及旋转方向, 提取 MV 正、负速度区域内退速度模糊后的最大速度, 计算此雷达图像上 MV 的旋转速度。同时计算每个时刻、每个仰角内 MV 正、负最大速度直线上雷达参量的平均值, 以便研究 MV 旋转处风暴的雷达特征, 也计算每个时刻 MV 厚度、最大旋转速度(及高度)等信息。

根据生成的先后, 将 MV 依次定义为 MV_1 、 MV_2 、 \dots 、 MV_i (i 为 MV 生成的序号)。定义 5 min

降水量超过 10 mm 的降水为强降水。根据强降水发生时间,计算强降水站点与每个 MV 的距离,筛选出与每个强降水站点距离最近的 MV。已有研究证实,当强降水附近存在多个 MV 时,受最近 MV 的影响最大(Zeng and Wang, 2022; 杨磊等,2023)。因此本文认为强降水是由距离最近的 MV 导致的,进而统计每个 MV 产生强降水的次数。

2 降水实况及影响系统

2.1 降水实况

2023 年 8 月 4 日 19:00—23:00(北京时,下同),抚顺地区出现短时暴雨天气。期间,抚顺市区、抚顺县自动气象站观测的累计降水量有 29 个站达到 50~99.9 mm,14 个站超过 100 mm(图 1a),其中最大累计降水量出现在抚顺市东洲区老虎台街道(131 mm),降水核心区域主要集中在 15 km × 10 km 的范围内。

从逐 5 min 降水量的时间演变(图 1b)可以看到,短时暴雨可以分为两个阶段:第一阶段降水出现在 19:30—20:40,出现强降水 3 次,降水较弱;第二阶段降水特征更强,集中出现在 20:45—21:40,其中在 20:55—21:00 就出现 6 次强降水,东洲区老虎台街道最大 5 min 降水量达到 12 mm。因此,本次过程第二阶段强降水的次数和强度均较第一阶段更

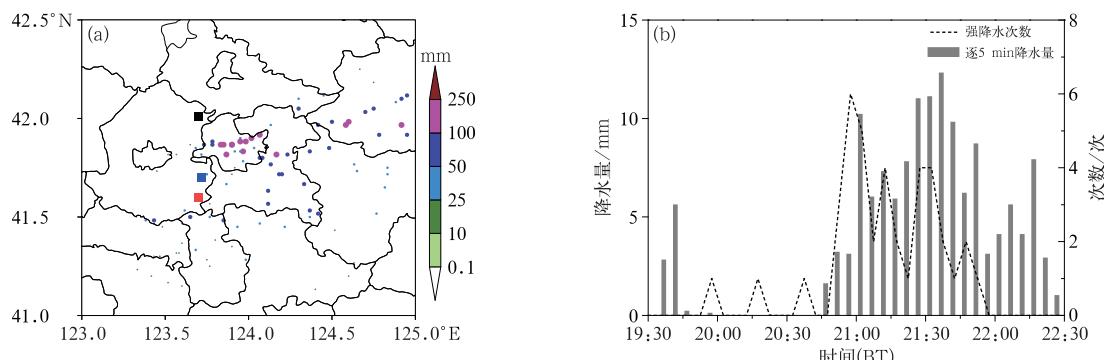
强,本文也重点讨论降水再次增强的原因。

2.2 天气形势和环境条件

8 月 4 日 19:00,500 hPa(图 2a),东北地区存在阶梯槽,辽宁位于位置偏南、较浅的高空槽的底部;副热带高压(以下简称副高)588 dagpm 线已经北上到辽宁南部,584 dagpm 线位于辽宁中部地区,抚顺地区恰好位于 584 dagpm 线的北边界。浅槽和副高向东略偏南的方向缓慢移动,在两个天气尺度系统之间形成位势梯度大值区。850 hPa 的低空涡旋中心位于黑龙江江南侧(图 2a),其底部的切变线在 4 日夜间呈西南—东北走向,影响辽宁地区,并向东略偏南的方向缓慢南下,辽宁东部存在相对湿度大于 80% 的湿区。另外,地面实况资料显示(图 2b),在沈阳至抚顺一带存在东西走向、较为平直的辐合线,该辐合线由来自辽河流域的暖空气和北部冷空气交汇而成,在其上空可触发降水系统。

2.3 水汽、不稳定和垂直风切变

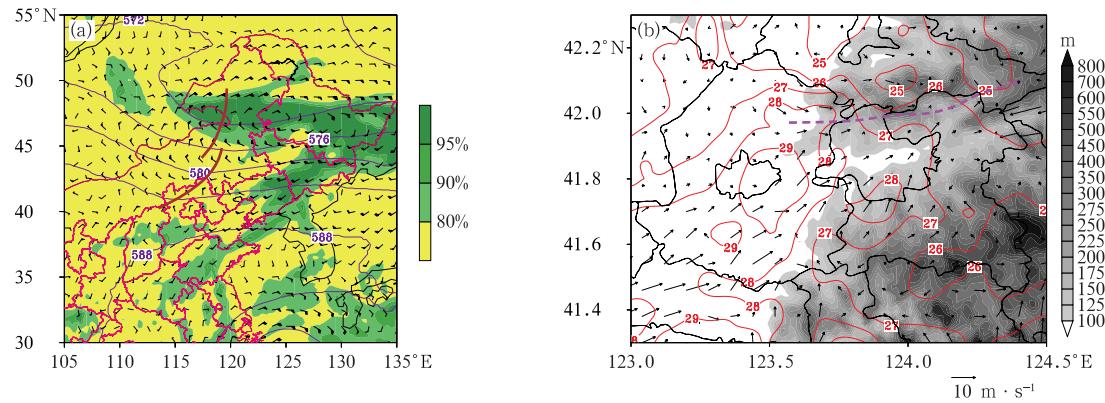
抚顺地区的温、湿度曲线整层均较接近,具有狭长的对流有效位能(CAPE)。水汽方面,大气可降水量和 925 hPa 比湿分别达到 70 mm 和 18.5 g · kg⁻¹,地面露点温度也达到 26℃,以上物理量显著超过同期短时强降水的水汽条件(杨磊等,2016; Yang and Zheng, 2024)。整层相对湿度均较高,抬升凝结高度仅为 115 m,云底以下至近地面最低相



注:图 a 中黑色、红色和蓝色方块分别示意 SC 多普勒天气雷达、X 波段相控阵雷达和风廓线雷达。

图 1 2023 年 8 月 4 日抚顺短时暴雨过程(a)19:00—23:00 累计降水量(彩色圆点)的空间分布,(b)19:30—22:30 强降水(5 min 降水量超过 10 mm)次数和累计降水量最大站点的逐 5 min 降水量的时间演变

Fig. 1 (a) Distribution of accumulated precipitation from 19:00 BT to 23:00 BT (colored dot) and (b) time series of frequency of 5 min precipitation >10 mm and 5 min precipitation at the station with maximum accumulated precipitation from 19:30 BT to 22:30 BT during short-time rainstorm in Fushun on 4 August 2023



注:图 a 中棕色线为高空槽线,图 b 中紫色虚线为地面辐合线。

图 2 2023 年 8 月 4 日 19:00(a)500 hPa 位势高度(等值线,单位: dagpm)和 850 hPa 风场(风羽)、相对湿度(填色),(b)地面气温(等值线,单位: °C)、风场(风矢)和海拔高度(阴影)

Fig. 2 (a) Geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa, wind (barb) and relative humidity (colored) at 850 hPa, (b) the surface temperature (contour, unit: °C), wind (wind vector) and altitude (shaded) at 19:00 BT 4 August 2023

对湿度达 94%, 蒸发削弱作用较弱, 以上特征有利于形成降水效率较高的降水(孙继松, 2017)。

不稳定能量方面, CAPE 达到 $1272 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对流抑制能量(CIN, $8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)很低, 850 hPa 假相当位温达到 360 K, 说明辽宁存在强盛的暖湿气流。另外, 抚顺位于低空切变线造成的辐合区内(图略), 存在较大尺度的辐合抬升作用, 辐合中心的散度高达 $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

从 ERA5 再分析资料输出的抚顺风场廓线来看(图 3a), 近地面为偏南风, 925 hPa 为西南风, 风速高达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 850~500 hPa 为偏西风, 上文提到浅槽和副高间强的位势梯度, 也有利于 500 hPa 出现大风速区, 以上风场配置有利于形成风矢量差。0~6 km 风矢量差均在 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 达到强垂直风切变的标准(Markowski and Richardson, 2010)。0~1 km 风矢量差在 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 是一个非常强的低层垂直风切变。而从沈阳风廓线雷达资料来看(图 3b), 1 km 以下风速在 20:20 开始出现显著跃增的现象, 高达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到低空急流的标准(Du and Chen, 2019; Zhang and Meng, 2019), 也导致此时 0~1 km 风矢量差出现增加的现象, 最强达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综上, 在强盛西南急流输送暖湿空气和低层辐合抬升作用下, 抚顺具有充沛的水汽、较强的 CAPE、较低的 CIN 和强垂直风切变, 这样的环境条件有利于风暴的形成发展并造成短时暴雨天气的出现。

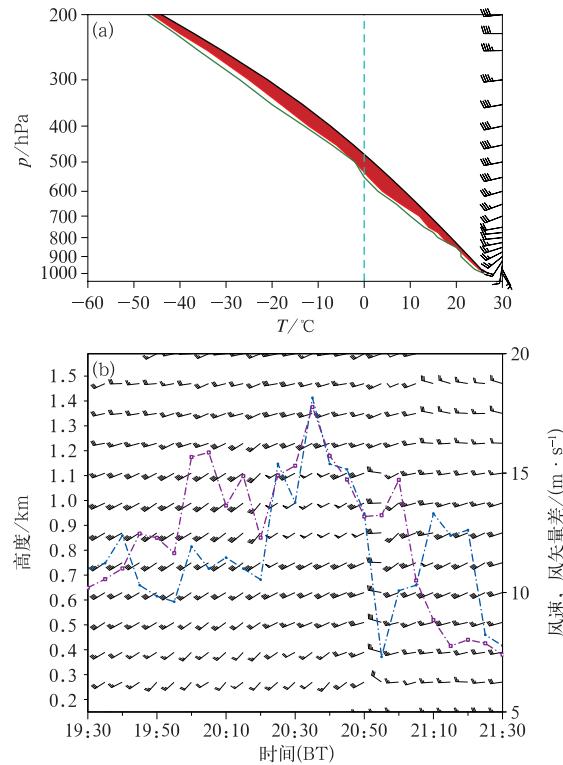


图 3 2023 年 8 月 4 日(a)19:00 抚顺 $T-\ln p$ 图,(b)19:30—21:30 沈阳风场(风羽)、1 km 以下最大风速(蓝线)和 0~1 km 风矢量差(紫线)的时间演变

Fig. 3 (a) The skew $T-\ln p$ diagram in Fushun at 19:00 BT and (b) time series of wind field (barb), maximum wind speed below 1 km height (blue line) and the 0~1 km wind vector difference (purple line) at Shenyang from 19:30 BT to 21:30 BT 4 August 2023

3 降水风暴和多 MV 演变特征

3.1 风暴的回波特征

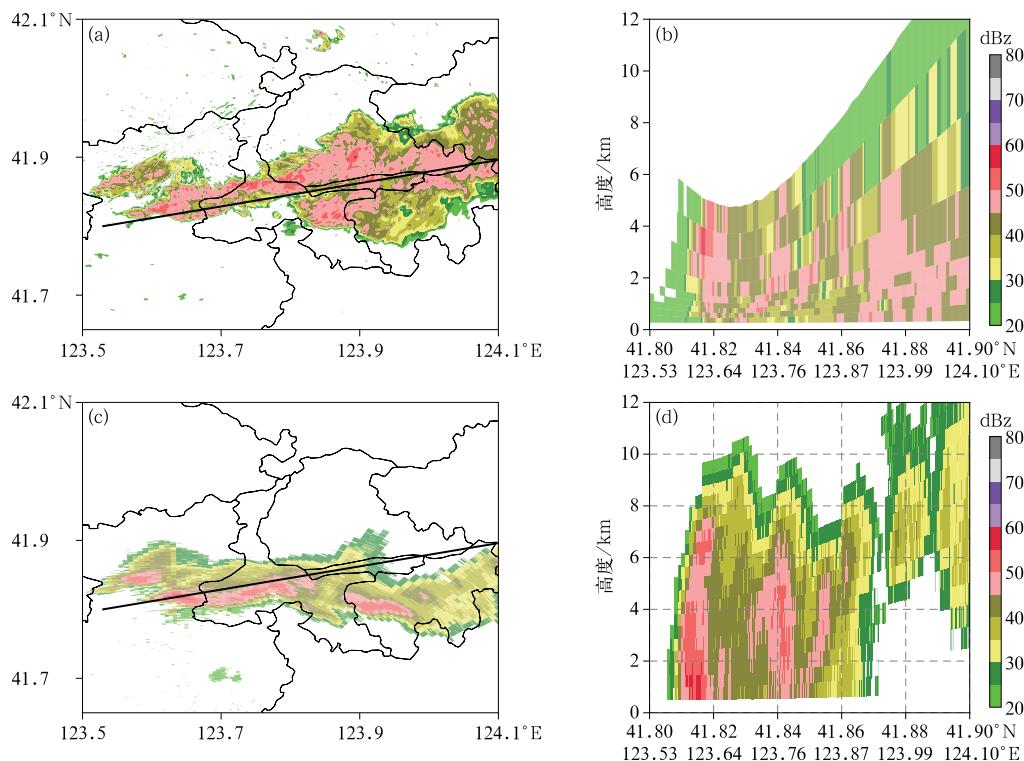
从 8 月 4 日 21:00 沈阳 SC 雷达反射率因子(图 4a)可见,在沈阳、抚顺和铁岭地区存在着线状风暴,该风暴长轴为东西走向,反射率因子超过 45 dBz 的长度接近 80 km。风暴沿着长轴缓慢地向东略偏南方向移动,导致降水时间更长。同时,线状风暴移动方向的后侧不断有孤立风暴新生,孤立风暴也逐渐合并到线状风暴中,因此存在后向传播的特征。从风暴的垂直结构特征来看(图 4b),最强回波达到 60 dBz,强回波集中出现在 5 km 以下,具有显著的低质心降水回波特征,属于典型的热带海洋性降水,降水效率极高(Vitale and Ryan, 2013; 孙继松, 2017; Luo et al, 2020)。

但是在本次过程中,存在降水量和组合反射率

相关性较低的现象,这在以往雷达估测降水研究也出现过(Zeng et al, 2021; 杨磊等, 2023),这可能与雷达低仰角探测能力较低、雷达电磁衰减和资料分辨率不匹配等原因相关。另外,对比同时刻 X 波段相控阵雷达(图 4c, 4d)和 SC 雷达监测到的反射率因子可见,降水系统位于 X 波段相控阵雷达的正东方向,该雷达衰减明显,无法监测到降水系统东侧回波特征。因此在分析降水系统的反射率因子特征时,SC 雷达监测到雷达反射率因子信息更可靠,需要加强研究 X 波段相控阵雷达反射率因子产品的衰减订正技术。

3.2 MV 的总体特征

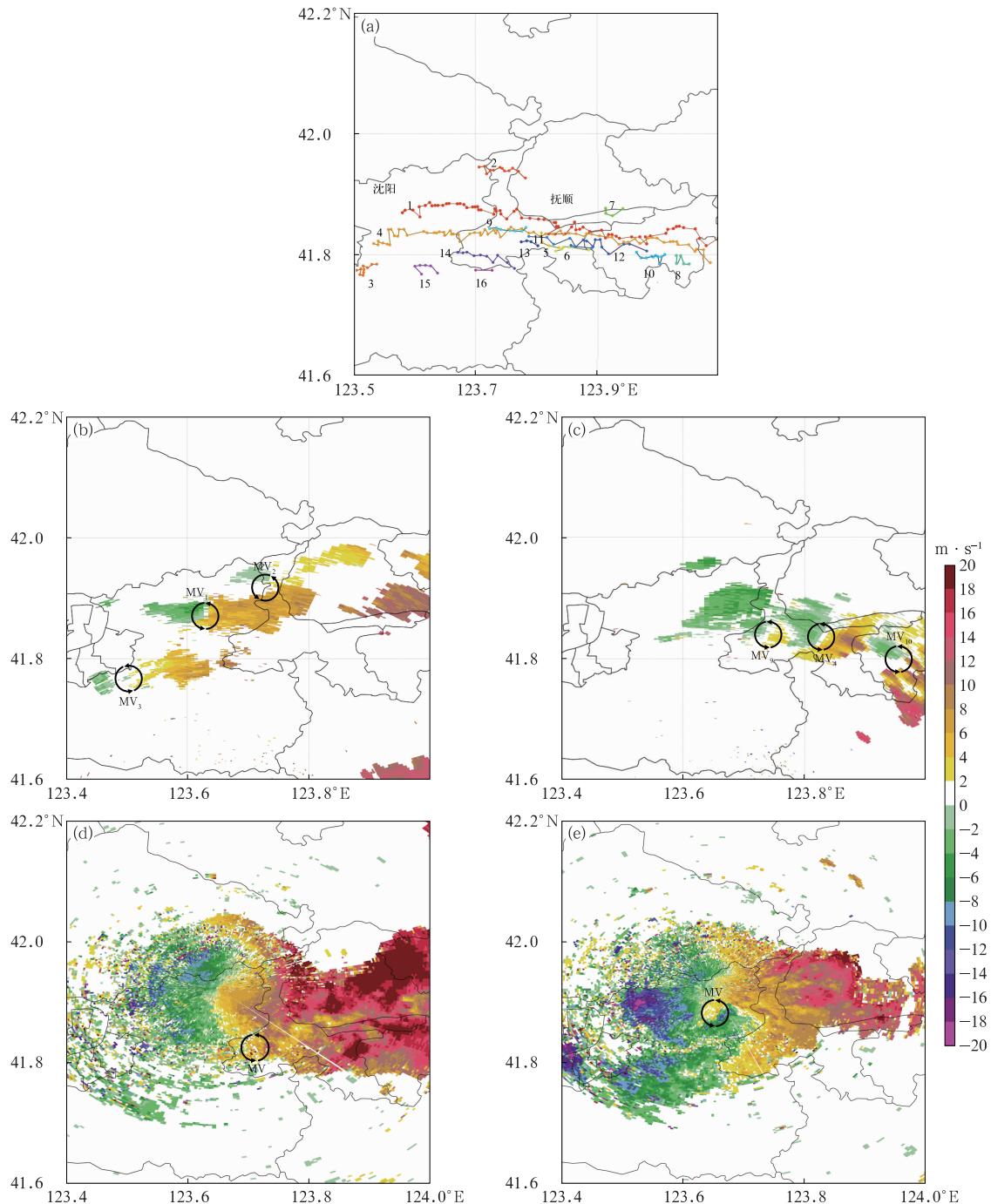
以往研究证实 X 波段相控阵雷达衰减问题对径向速度的影响较小(苏永彦和刘黎平, 2022),因此分钟级的径向速度资料能够精细表征降水系统内的动力结构,尤其是观测到该风暴内共出现了 16 个尺度在 2~20 km 的 MV(图 5a)。其中图 5b, 5c 为两



注:图 b,d 为分别沿图 a,c 中黑色直线的剖面。

图 4 2023 年 8 月 4 日 21:00 沈阳(a,b)SC 雷达和(c,d)X 波段相控阵雷达的 0.5°仰角(a,c)反射率因子和(b,d)反射率因子垂直剖面

Fig. 4 (a, c) Radar reflectivity factor at 0.5° elevation and (b, d) vertical cross-section of radar reflectivity factor observed by (a, b) SC radar and (c, d) X-band phased array radar at 21:00 BT 4 August 2023



注:图 a 中数字为 MV 的序号,图 b~e 中圆圈示意 MV。

图 5 2023 年 8 月 4 日抚顺短时暴雨过程中(a)MV 移动路径(彩色点线),(b)20:24,(c)21:31 X 波段相控阵雷达 2.7°仰角径向速度,(d)20:24,(e)21:31 SC 雷达 2.4°仰角径向速度

Fig. 5 (a) The movement path (colored line) of MV, (b, c) the radial velocity at 2.7° elevation observed by X-band phased array radar at (b) 20:24 BT and (c) 21:31 BT, and (d, e) the radial velocity at 2.4° elevation observed by SC radar at (d) 20:24 BT and (e) 21:31 BT during the short-time rainstorm in Fushun on 4 August 2023

个典型时刻径向速度,结合相应(或最临近)时刻的 SC 雷达监测到的反射率因子(图略)可见,这些 MV

镶嵌在降水系统内、相互独立。SC 雷达仅能观测到单个 MV(图 5d,5e),观测到 MV 的个数少于 X 波

段相控阵雷达,同时 SC 雷达的时间分辨率为 6 min,对 MV 观测的连续性也更差。因此在 X 波段相控阵雷达有效探测范围内,可利用其径向速度资料分析降水系统动力结构,尤其是 MV 的精细化观测特征。

以往极端短时暴雨也出现过多个 MV,例如 2017 年 5 月 7 日广州短时暴雨(Zeng and Wang, 2022)和 2019 年 8 月 16 日沈阳短时暴雨(杨磊等, 2023)分别观测到 5 个、2 个 MV。本次过程中,在此种尺度风暴内出现如此多的 MV,在中国目前尚无相关研究。这一方面可能是由于 X 波段相控阵雷达分辨率较高,能够观测到尺度更小、位置更低、极为浅薄的 MV,另一方面也与本次过程环境条件有利于多个 MV 生成并维持有关。

所有 MV 活动区域均位于沈阳至抚顺这一狭窄的条状区域(图 5a),普遍自西向东移动,与近地面影响系统和风暴的移动方向一致。所有 MV 集中出现在 20:14—22:15(图 6a),平均持续时间只有 17 min,普遍没有达到中气旋的标准(18 min)(Yu et al, 2012)。另外,MV 平均厚度在 1.7 km,平均顶高 3.5 km,即为浅薄的低空 MV。综上,本次过程中的多个 MV 是位于准线状对流系统内、维持时间普遍不足 1 h、处于大气低层的 MV,以上特征和超级单体风暴中气旋存在不同(Browning, 1964; Moller et al, 1994; 俞小鼎等, 2008; Kumjian and Ryzhkov, 2012)。

在所有 MV 生命期内,MV 影响的区域内有多达 49 次强降水。结合图 1 可以看到,风暴在出现 MV 特征后,产生较前期更多、更强的降水。另外,强降水站点与 MV 的距离在 0.5~18 km(图 6b),

平均距离仅为 6.2 km,和 MV 的尺度相当,以上观测事实均说明强降水站点位于 MV 附近。

通过计算每个 MV 产生强降水的次数发现,共有 5 个 MV 产生强降水,分别为 MV_1 、 MV_4 、 MV_5 、 MV_8 和 MV_{10} 。其中, MV_1 和 MV_4 分别产生强降水 24 次、20 次,显著高于其他 MV,占所有强降水次数的 89%。因此将 MV_1 和 MV_4 称为 RMV,而其余 MV 称为 NMV。

3.3 RMV 与 NMV 观测特征异同点

表 1 给出两个 RMV 与 NMV 的观测特征。对于持续时间,NMV 持续时间在 4~23 min 范围内,平均仅为 9 min,而 MV_1 和 MV_4 的生命史分别为 78 min 和 74 min,即 RMV 的持续时间约是 NMV 的 8 倍。本次过程生命史超过 1 h 的 MV 占所有 MV 的百分比为 12.5%,高于江淮地区的统计结果(5%;Tang et al, 2020),结合前文分析发现,本次过程不仅 MV 的个数多,而且长历时 MV 的占比也较高。

NMV 厚度的平均值为 1.5 km,而 MV_1 和 MV_4 的厚度分别为 2.3 km 和 4.8 km,即 RMV 的厚度也超过 NMV 厚度的平均值。NMV 的最强旋转速度的平均值仅为 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均未达到中气旋的旋转强度(Yu et al, 2012),而 MV_1 和 MV_4 的最大旋转速度分别为 $17.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尽管低于 2019 年 8 月 16 日沈阳暴雨过程(杨磊等, 2023),但超过 2017 年 5 月 7 日广州暴雨过程(Zhang et al, 2022),也达到中等强度中气旋的旋转强度(Yu et al, 2012)。

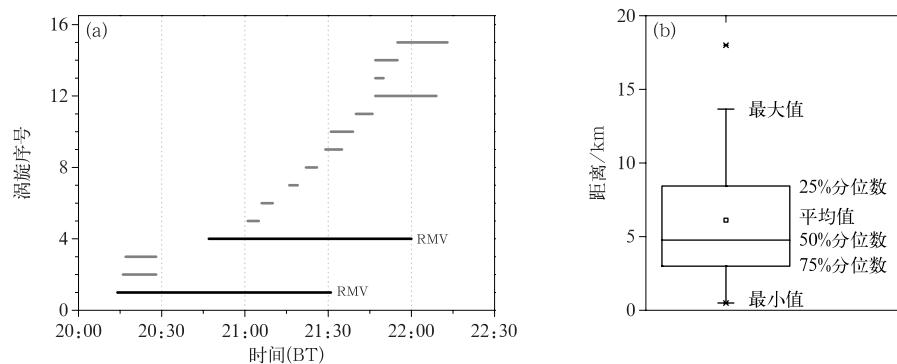


图 6 2023 年 8 月 4 日抚顺短时暴雨过程中(a)MV 的生命史,(b)强降水与 MV 的距离箱线图

Fig. 6 (a) The lifetime of MV and (b) the boxplot of distance between heavy precipitation and MV during the short-time rainstorm in Fushun on 4 August 2023

两类 MV 的生成和移动规律也存在差异。如图 5a 所示, RMV 并非生成于抚顺强降水区, 而均生成于沈阳, 生成于抚顺强降水发生前或初期, 移动距离也更长, 分别达到 55 km 和 60 km(表 1)。而在 14 个 NMV 中, 有 10 个生成于抚顺强降水区, 移

动距离在 2~12.3 km, 平均值为 5.5 km, 同时也生成于降水最强时段。表 1 中还可看到, 两类 MV 移动速度差异较小。综上, 相比于 NMV, RMV 具有更长的生命史、移动路径和强的旋转强度, 后文也重点分析 RMV 维持机制的原因。

表 1 两个 RMV(MV_1 、 MV_4)与 NMV 的观测特征

Table 1 The observational characteristics of RMV (MV_1 , MV_4) and NMV

特征	NMV 平均值	MV_1	MV_4
持续时间/min	9.0	78	74
厚度/km	1.5	2.3	4.8
最大旋转速度/($m \cdot s^{-1}$)	7.4	17.8	18.8
移动距离/km	5.5	55	60
移动速度/($m \cdot s^{-1}$)	11.9	11.5	12.5

3.4 强降水期间 RMV 的精细演变特征

生命史较短、更为浅薄的 NMV 总体上表现出生成后快速消亡的特点, 由于旋转速度较弱, 因此其上空的组合反射率因子平均值仅为 45 dBz。而 RMV 由于具有更强的旋转速度, 因此可以形成更强的上升运动, 其上空组合反射率因子平均值达到 48 dBz 以上, 更有利于 RMV 附近出现更强的降水。

从分钟级 X 波段相控阵雷达资料获得 RMV 旋转速度和厚度时间演变(图 7a~7d)可以发现, RMV 最初生成于低空 1~2 km 范围内, 是低空浅薄的 MV。随后在生成初期的前 20 min, RMV 具有以下两个特征:一是旋转速度快速增大, 为整个生命史最强阶段, 最大旋转速度均达到 $17 m \cdot s^{-1}$ 以上, 达到中等强度中气旋的旋转标准(Yu et al, 2012), 强旋转速度位于风暴低层 1~2 km; 二是出现“自下而上”快速垂直伸展的现象, 最大厚度分别达到 2.5 km 和 4.2 km, 和已有研究发现的强降水期间 MV 的厚度相当(Zhang et al, 2022; 杨磊等, 2023), 但较经典超级单体风暴的中气旋浅薄(俞小鼎等, 2008; 郑永光等, 2020)。

在 RMV 旋转最强阶段, 其上方 3 km 以上存在强回波(图 7e, 7f)。通常用 40 dBz 的回波的伸展高度来表征上升气流的高度(Zipser et al, 2006), 此阶段, 大于 40 dBz 的回波伸展到 9 km, 这是极强风暴才具有的回波顶高(Liu and Zipser, 2015), 9 km 处环境温度为 -20°C , 因此 MV 上空的风暴内存在冰相降水粒子。以上特征说明强烈旋转的 RMV 形成强上升气流, 因此导致其上方出现浓度高、相态复杂的降水粒子, 但是上升气流能够支撑这些降水粒子,

所以 RMV 附近并没有出现强降水。随后, RMV 旋转减弱, 产生的上升运动强度减弱, 当无法支撑其上方降水粒子时, 前期 RMV 上空的降水粒子下落到地面, 因此 MV 上空回波存在快速下降的现象, 导致 RMV 附近出现多次强降水事件。另外也需要注意, RMV 并没有迅速消亡, 也存在旋转速度波动性增加的现象。

4 MV 生成和维持机制

4.1 MV 的生成

首先分析本次过程出现多 MV 的原因, 根据 ERA5 再分析资料计算的沈阳和抚顺 0~1 km 风矢量差达到 $8 \sim 10 m \cdot s^{-1}$, 强的垂直风切变为形成 MV 提供了有利的中尺度气象条件(俞小鼎等, 2020)。另外, 上文提到的辐合线逐渐向南移动, 所有 MV 均生成于该辐合线上。

8月4日 21:00, 辐合线位于沈阳市区至抚顺西部(图 8a), 其形态并没有 19:00(图 2b)那么平直; 同时需要注意, 沈阳市区气温高达 28°C , 显著高于周边地区, 辐合线的西段位于该高温区内。受降水影响, 辐合线的东段存在明显的冷池, 气温下降到 26°C 以下。以 25°C 和 26°C 等温线为例, 沈阳市区东部至抚顺一带的等温线呈西北—东南走向, 辐合线和等温线的夹角较 19:00 明显加大, 这意味着辐合线上的空气团存在更显著的温度差异。已有研究证实, 边界层辐合线上常会形成 γ 中尺度甚至更小的气旋(袁潮等, 2022), 其中辐合线上空气团的温度等非均一性越强, 越有利于出现多个 MV(Dahl, 2015;

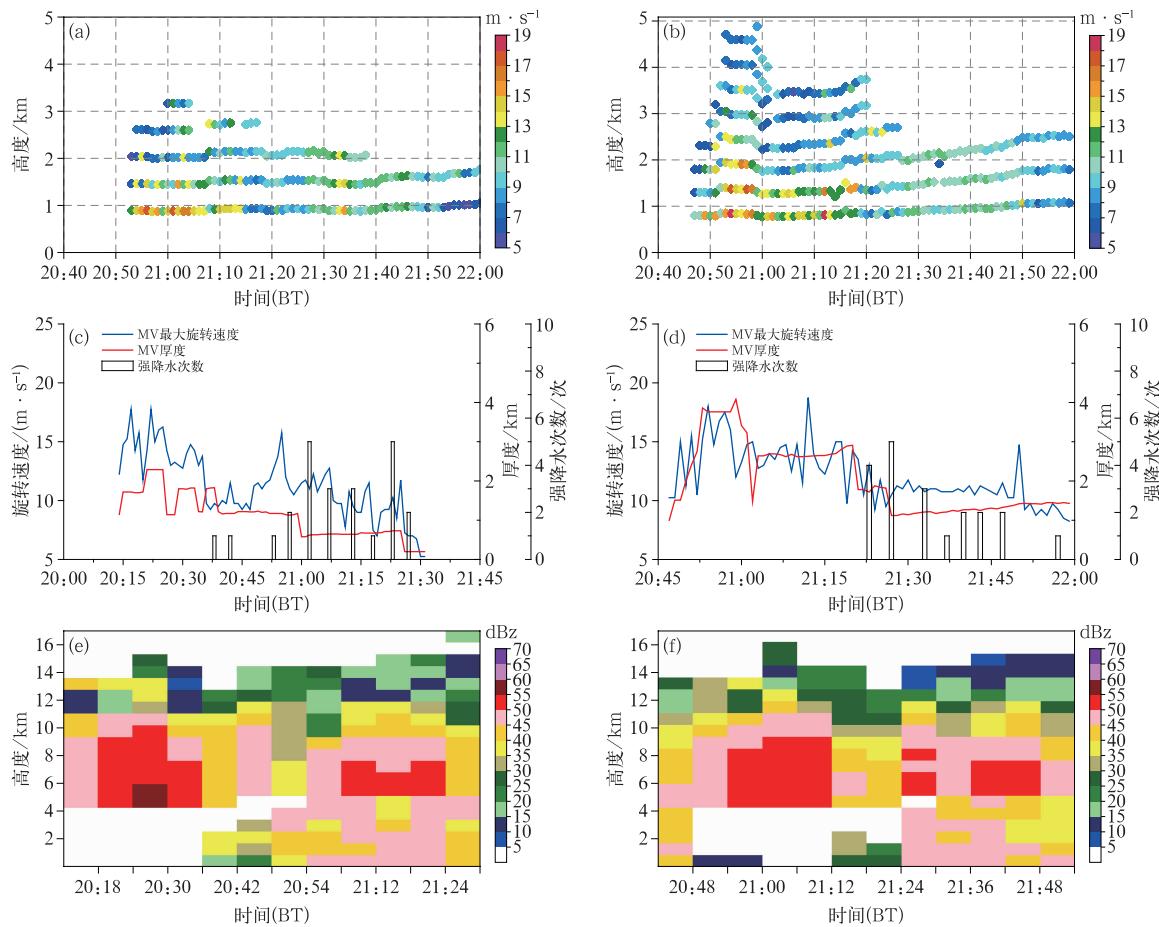


图 7 2023 年 8 月 4 日抚顺短时暴雨过程中两个 RMV 的(a,b)不同高度旋转速度,(c,d)最大旋转速度、厚度和强降水次数,(e,f)上空组合反射率因子的时间演变
(a,c,e)MV₁,(b,d,f)MV₄

Fig. 7 Time series of (a, b) rotation speed of two RMV at different heights, (c, d) maximum rotational speed and thickness of two RMV and frequency of heavy precipitation near two RMV, and (e, f) composite reflectivity factor over two RMV during the short-time rainstorm in Fushun on 4 August 2023

(a, c, e) MV₁, (b, d, f) MV₄

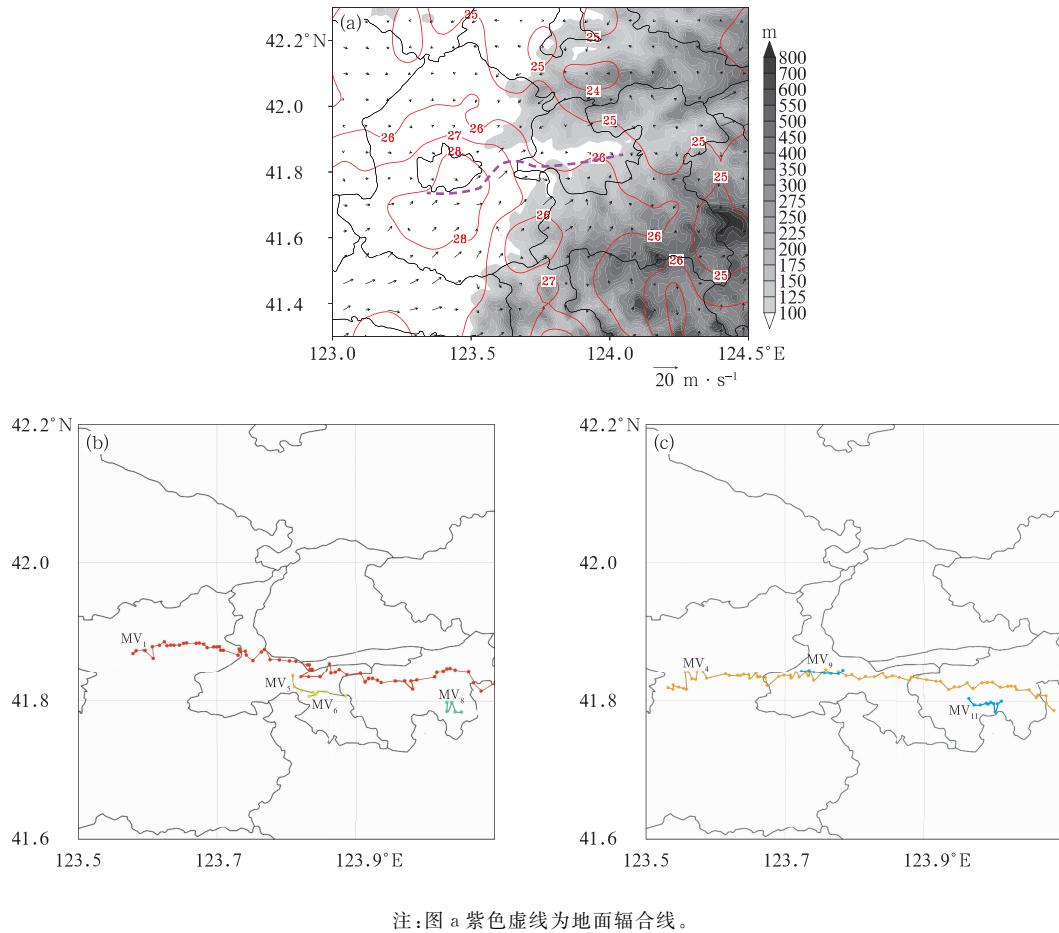
Zeng and Wang, 2022),本次过程也证实以上研究结论。当 MV 移到山区后,其逐渐消亡,可见山区复杂地形不利于这类浅薄 MV 的维持。

4.2 RMV 的加强维持

那么为何 RMV 的维持时间更强、旋转更强呢?两个 RMV 于 20:15—20:45 期间在沈阳生成,此时正是沈阳低空急流最强盛时段,0~1 km 风矢量差高达 15 m·s⁻¹以上(图 3b),大于美国与 MV 有关的 299 个极端短时强降水(>75 mm·h⁻¹)发生时的平均值(4 m·s⁻¹)(Nielsen and Schumacher, 2020)和“5·7”暴雨(Li et al, 2021),如此强的垂直风切变有利于形成生命史更长、强度更强的 MV

(Weisman and Trapp, 2003; Wheatley and Trapp, 2008; Atkins and Laurent, 2009a; 2009b; Tang et al, 2020)。另外,需要注意 RMV 生成地并没有出现强降水,21:00 沈阳地面气温为 28°C,显著高于抚顺降水区的 26°C,因此 RMV 生成区域具有较 NMV 生成区域(抚顺强降水区)更强的不稳定能量,局地气象条件也有利于 RMV 旋转的加强。综上,当受强盛低空急流影响时,低空具有高达 15 m·s⁻¹以上的强垂直风切变,生成区域具有更强的不稳定能量,因此有利于在沈阳形成生命史更长、强度更强的 RMV。当上空 0~1 km 风矢量差减小到 15 m·s⁻¹以后,沈阳没有再生成 RMV。

另外,两个 RMV 移动过程中,存在 NMV 与 RMV



注:图 a 紫色虚线为地面辐合线。

图 8 2023 年 8 月 4 日(a)21:00 地面气温(等值线,单位:℃)、风场(风矢)和海拔高度
(阴影),(b)MV₁、(c)MV₄ 及其附近 MV 的移动路径(彩色点线)

Fig. 8 (a) The surface temperature (contour, unit: ℃), wind (wind vector) at 21:00 BT
and altitude (shaded), and (b, c) the movement paths of (b) MV₁,
(c) MV₄ and nearby MVs (colored dot line) on 4 August 2023

靠近的现象。如图 8b,8c 所示,共有 3 个 NMV 与 MV₁ 靠近,2 个 NMV 与 MV₄ 靠近。从 X 波段相控阵雷达的径向速度图上可以看到(图略),这些 NMV 在靠近 RMV 后,最终与 RMV 合并。已有研究证实弱 MV 携带的涡度可以输送到风暴中,有利于原始 MV 的维持甚至加强(Finley et al, 2001; 俞小鼎等,2008)。因此多个较弱的 MV 并入到 RMV 中,可能是 RMV 能够维持时间更长、旋转速度波动性增加的原因。

5 结论与讨论

本文针对 2023 年 8 月 4 日抚顺地区短时暴雨过程,利用 X 波段相控阵雷达资料分析了多个 MV 的观测特征和短时暴雨的关系,得到以下结论:

(1)本次过程中抚顺地区位于 500 hPa 高空槽底部、584 dagpm 线的北边界,850 hPa 位于低空切变线前侧,受低空急流影响,具有充沛的水汽和较低的抬升凝结高度,有利于短时暴雨的发生。

(2)本次短时暴雨是由沿着长轴移动、具有低质心特征的线状风暴导致,X 波段相控阵雷达监测到该风暴内出现多达 16 个 MV。风暴在出现 MV 特征后,产生 49 次强降水,强降水站点与 MV 的距离在 0.5~18 km 范围内,平均距离为 6.2 km,和 MV 的尺度相当。

(3)MV₁ 和 MV₄ 产生强降水的次数占所有强降水次数的 89%。这两个 RMV 在沈阳市区生成,具有更长的生命史、移动路径和强的旋转强度等特征。RMV 强烈旋转时期产生强上升运动,对流系统尽管发展旺盛,但是并没有形成强降水。当

RMV 旋转减弱后,其附近才出现强降水,因此 RMV 位置和旋转强度的演变是提前预判强降水的关键。

(4) 辽宁北部具有强的 $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变, 抚顺地区 $0\sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变达到 $8\sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 地面还存在辐合线, 当辐合线和等温线的夹角加大时, 有利于形成更多的 MV。而 RMV 生成于 $0\sim 1 \text{ km}$ 风矢量差高达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和地面温度高达 28°C 的阶段, 同时存在多个 MV 并入到 RMV 的现象, 这有利于 RMV 持续时间更长。

本文基于 X 波段相控阵雷达资料对目前我国暴雨研究中 MV 个数最多的个例进行了研究。相比于华南等发达地区, 东北地区 X 波段相控阵雷达的建设和应用刚刚起步, 该地区具有水汽偏干、强垂直风切变等环境特征(杨磊和郑永光, 2023), 地面也常受干线等地面辐合线的影响(方祖亮等, 2020), 以上环境条件更利于 MV 的形成并导致极端天气。今后需要加强利用 X 波段相控阵雷达资料继续研究东北地区 MV 对极端天气的形成机理。另外, 由于 X 波段相控阵雷达衰减严重, 也亟须研究反射率和双偏振参量的订正及组网技术, 以便提升该资料应用率。

参考文献

- 戴建华, 王国荣, 龚剑, 等, 2021. 梅雨锋中尺度涡旋内微型超级单体龙卷的形成研究[J]. 热带气象学报, 37(5/6): 693-709. Dai J H, Wang G R, Gong J, et al, 2021. Analysis of the formation of mini-supercells and associated tornadogenesis within a mesoscale vortex embedded in a Meiyu front[J]. J Trop Meteor, 37(5/6): 693-709(in Chinese).
- 方祖亮, 俞小鼎, 王秀明, 2020. 东北暖季干线统计分析[J]. 气象学报, 78(2): 260-276. Fang Z L, Yu X D, Wang X M, 2020. Statistical analysis of drylines in Northeast China[J]. Acta Meteor Sin, 78(2): 260-276(in Chinese).
- 黎立页, 孟智勇, 白兰强, 等, 2023. 2017-08-11 内蒙赤峰 EF4 级山地多发龙卷灾调与成因分析[J]. 热带气象学报, 39(4): 507-521. Li L Y, Meng Z Y, Bai L Q, et al, 2023. Damage survey and analysis of a multiple tornado event over complex terrain in Chifeng, Inner Mongolia on 11 August 2017[J]. J Trop Meteor, 39(4): 507-521(in Chinese).
- 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 等, 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, et al, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 28-33(in Chinese).
- 梅雨菲, 陈生, 刘陈帅, 等, 2023. 珠海 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测产品质量评估[J]. 热带气象学报, 39(4): 614-621. Mei Y F, Chen S, Liu C S, et al, 2023. Quality evaluation of X-band polarimetric phased array radar QPE product in Zhuhai[J]. J Trop Meteor, 39(4): 614-621(in Chinese).
- 苏永彦, 刘黎平, 2022. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. 气象, 48(2): 229-244. Su Y Y, Liu L P, 2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. Meteor Mon, 48(2): 229-244(in Chinese).
- 孙继松, 2017. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 36(6): 498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 498-506(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).
- 孙继松, 2025. 不同尺度天气系统在华北暴雨过程中相互作用的再认识[J]. 气象, 51(11): 1405-1416. Sun J S, 2025. Re-understanding the interaction of multi-scale synoptic systems during torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 51(11): 1405-1416(in Chinese).
- 杨磊, 蒋大凯, 王瀛, 等, 2016. 辽宁省汛期 GPS 大气可降水量的特征分析[J]. 干旱气象, 34(1): 82-87. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al, 2016. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning Province based on GPS remote sensing data[J]. J Arid Meteor, 34(1): 82-87(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).
- 俞小鼎, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329(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, 135. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press, 135(in Chinese).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等, 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 32(3): 508-522. Yu X D, Zheng Y

- Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(3):508-522(in Chinese).
- 袁潮,李得勤,杨磊,等,2022.冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究[J].*气象学报*,80(6):878-895. Yuan C,Li D Q,Yang L,et al,2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex[J]. *Acta Meteor Sin*,80(6):878-895(in Chinese).
- 曾琳,张羽,李怀宇,等,2023.基于多源探测资料的一次广州局地强对流垂直结构分析[J].*热带气象学报*,39(3):348-360. Zeng L,Zhang Y,Li H Y,et al,2023. An analysis of the vertical structure of local strong convection in Guangzhou based on multi-source detection data[J]. *J Trop Meteor*,39(3):348-360(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).
- 张哲,罗红艳,戚友存,等,2024.基于雨滴谱仪和S波段雷达的X波段相控阵雷达反射率观测质量定量分析[J].*气象*,50(10):1187-1200. Zhang Z,Luo H Y,Qi Y C,et al,2024. Quantitative analysis of reflectivity quality of X-band phased-array radar based on disdrometer and S-band radar[J]. *Meteor Mon*,50(10):1187-1200(in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020.2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J].*气象*,46(5):589-602. Zheng Y G,Lan Y,Cao Y C,et al,2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. *Meteor Mon*,46(5):589-602(in Chinese).
- 植江玲,白兰强,黄先香,等,2024.2022年6月19日广东佛山龙卷的双极化相控阵雷达特征[J].*热带气象学报*,40(2):297-312. Zhi J L,Bai L Q,Huang X X,et al,2024. Observation of the 19 June 2022 tornado by X-band polarimetric phased array radar in Foshan,Guangdong[J]. *J Trop Meteor*,40(2):297-312(in Chinese).
- 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.
- Bringi V N,Keenan T D,Chandrasekar V,2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation:a self-consistent method with constraints[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*,39(9):1906-1915.
- Browning K A,1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds[J]. *J Atmos Sci*,21(6):634-639.
- Dahl J M L,2015. Near-ground rotation in simulated supercells; on the robustness of the baroclinic mechanism[J]. *Mon Wea Rev*,143(12):4929-4942.
- Davies-Jones R,1984. Streamwise vorticity: the origin of updraft rotation in supercell storms[J]. *J Atmos Sci*,41(20):2991-3006.
- Doswell C A III,Brooks H E,Maddox R A,1996. Flash flood forecasting:an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*,11(4):560-581.
- Du Y,Chen G X,2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II : convection initiation[J]. *Mon Wea Rev*,147(2):543-565.
- Finley C A,Cotton W R,Pielke 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.
- Funk T W,Darmofal K E,Kirkpatrick J D,et al,1999. Storm reflectivity and mesocyclone evolution associated with the 15 April 1994 squall line over Kentucky and southern Indiana[J]. *Wea Forecasting*,14(6):976-993.
- Huang Y J,Liu Y B,Liu Y W,et al,2019. Budget analyses of a record-breaking rainfall event in the coastal metropolitan city of Guangzhou,China[J]. *J Geophys Res: Atmos*,124(16):9391-9406.
- Kumjian M R,Ryzhkov A V,2012. The impact of size sorting on the polarimetric radar variables[J]. *J Atmos Sci*,69(6):2042-2060.
- Li M X,Luo Y L,Zhang D L,et al,2021. Analysis of a record-breaking rainfall event associated with a monsoon coastal megacity of South China using multisource data[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*,59(8):6404-6414.
- Lilly D K,1986a. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I : energy exchange with the mean flow[J]. *J Atmos Sci*,43(2):113-125.
- Lilly D K,1986b. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II : helicity and storm stabilization [J]. *J Atmos Sci*,43(2):126-140.
- Liu C T,Zipser E J,2015. The global distribution of largest, deepest, and most intense precipitation systems[J]. *Geophys Res Lett*,42(9):3591-3595.
- Luo Y L,Wu M W,Ren F M,et al,2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *J Climate*,29(24):8703-8719.
- Luo Y L,Xia R D,Chan J C L,2020. Characteristics,physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: research progress during 2008-2019[J]. *J Meteor Soc Japan*,98(1):19-42.
- Markowski P,Richardson Y,2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester:John Wiley & Sons:202-244.
- Moller A R,Doswell C A,Foster M P,et al,1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. *Wea Forecasting*,9(3):327-347.
- Nielsen E R,Schumacher R S,2018. Dynamical insights into extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices[J]. *J Atmos Sci*,75(9):2983-3009.

- Nielsen E R,Schumacher R S,2020. Observations of extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. Mon Wea Rev,148(1):159-182.
- Orlanski I,1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. Bull Amer Meteor Soc,56(5):527-530.
- Rotunno R,Klemp J,1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms[J]. J Atmos Sci,42(3):271-292.
- Schenkman A D,Xue M,2016. Bow-echo mesovortices:a review[J]. Atmos Res,170:1-13.
- Siggia A D,Passarelli R E Jr,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,Sweden:ERAD;67-73.
- Tang Y,Xu X,Xue M,et al,2020. Characteristics of low-level meso- γ -scale vortices in the warm season over East China[J]. Atmos Res,235:104768.
- 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.
- Vitale J D,Ryan T,2013. Operational recognition of high precipitation efficiency and low-echo-centroid convection[J]. J Oper Meteor,1(12):128-143.
- Wang G L,Zhang D L,Sun J S,2021. A multiscale analysis of a nocturnal extreme rainfall event of 14 July 2017 in Northeast China [J]. Mon Wea Rev,149(1):173-187.
- 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.
- Wheatley D M,Trapp R J,2008. The effect of mesoscale heterogeneity on the genesis and structure of mesovortices within quasi-linear convective systems[J]. Mon Wea Rev,136(11):4220-4241.
- Yang L,Zheng Y G,2024. The short-duration heavy rainfall in different quadrants of Northeast China cold vortices[J]. J Meteor Res,38(2):321-338.
- Yin J F,Gu H D,Liang X D,et al,2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021[J]. J Meteor Res,36(1):6-25.
- Yin J F,Zhang D L,Luo Y L,et al,2020. On the extreme rainfall event of 7 May 2017 over the coastal city of Guangzhou. Part I :impacts of urbanization and orography[J]. Mon Wea Rev,148(3):955-979.
- Yu X D,Wang X,Fei H,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,Chen Y,2021. An investigation of convective features and Z-R relationships for a local extreme precipitation event[J]. Atmos Res,250:105372.
- 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 M R,Meng Z Y,2019. Warm-sector heavy rainfall in southern China and its WRF simulation evaluation: a low level-jet perspective[J]. Mon Wea Rev,147(12):4461-4480.
- Zhang Q Y,Luo Y L,Tang Y,et al,2022. Cause-effect relationship between meso- γ -scale rotation and extreme short-term precipitation: observational analyses at minute and sub-kilometer scales [J]. J Meteor Res,36(4):539-552.
- Zipser E J,Cecil D J,Liu C T,et al,2006. Where are the most intense thunderstorms on earth? [J]. Bull Amer Meteor Soc,87(8):1057-1072.

(本文责编:戴洋)