

# 华北平原一次破纪录大风事件的 $\gamma$ 中尺度涡旋特征分析

许长义<sup>1,2,4,5</sup> 章丽娜<sup>3</sup> 肖现<sup>5</sup>

- 天津市海洋气象重点实验室, 天津, 300074
- 天津市滨海新区气象局, 天津, 300457
- 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081
- 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
- 中国气象局北京城市气象研究所, 北京, 100089

**摘要:** 2020年6月25日天津西青受伴随 $\gamma$ 中尺度涡旋(mesovortex, 以下简称MV)的对流风暴影响, 发生了1957年有观测记录以来的最强阵风( $41.4\text{ m s}^{-1}$ )。为了提高对此类中尺度涡旋的科学认识, 本文利用雷达四维变分同化技术, 结合多源观测资料, 揭示出MV不同发展阶段的热动力结构特征及其与地面大风强度、位置的时空配置关系。结果表明: MV首先形成于对流层低层2 km附近, 在向拉伸过程中, 旋转速度增强、涡旋直径收缩, 对应近地面由暖干的气旋性涡旋转变冷湿的气旋性涡旋, 极端大风出现在成熟阶段的MV西侧与后侧入流急流叠置区。MV的发展演变与对流风暴内不同性质的气流结构密切相关, 成熟阶段, 垂直环流由斜升气流、后侧入流急流、前部下沉气流和低层入流气流构成。MV发展加强下传及地过程中, 雨水在下落过程中蒸发吸热, 后侧入流急流的强度明显加强且不断向下伸展。在MV发展演变过程中, 冷池与垂直风切变的配置起到重要作用: MV从形成到发展阶段, 冷池与0-3 km的低层垂直风切变达到平衡态, 从发展到成熟阶段, 冷池与0-6 km的深层垂直风切变达到平衡态, 在强的深层垂直风切变的拉伸作用下MV加强发展。与典型弓形回波的及地后侧入流急流结构区别明显, 本次过程后侧入流急流并未及地, 而是与MV的下沉气流在1 km高度附近耦合, 产生垂直向下的扰动气压梯度力。同时, 雨水的拖曳作用有利于下沉气流的加强, 在其下降过程中蒸发吸热使得冷池不断增强导致地面风速加大, 共同导致极端大风。

**收稿日期** 2024-11-07; **网络预出版日期**

**作者简介** 许长义, 女, 1985年出生, 高级工程师, 主要从事灾害性天气机理与预报预警技术研究。Email: [xusupergirl@163.com](mailto:xusupergirl@163.com)

**通讯作者** 章丽娜, 女, 教授, 主要从事灾害性天气机理与教学。Email: [zhangln@cma.cn](mailto:zhangln@cma.cn)

**资助项目** 国家自然科学基金项目(42405013、42375019), 天津市海洋气象重点实验室开放基金(2024TKLOMYB01), 灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B24), 中国气象局城市气象重点开放基金(LUM-2023-11), 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-006)

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 42405013, 42375019), The Open Project of Tianjin Key Laboratory of Oceanic Meteorology (2024TKLOMYB01), The Open Grants of the State Key Laboratory of Severe Weather(2024LASW-B24), Key Laboratory of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing (LUM-2023-11), China Meteorological Administration Review Summary Project (FPZJ2024-006)

关键词: 极端大风,  $\gamma$  中尺度涡旋 (MV), 弓形回波, 后侧入流急流 (RIJ)

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

## **Analysis of the Characteristics of low-level mesovortex during a record-breaking wind event in North China Plane**

XU Changyi<sup>1,2,4,5</sup> ZHANG Lina<sup>3</sup> XIAO Xian<sup>5</sup>

1. *Tianjin Key Laboratory of Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China*

2. *Binhai New Area Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300457, China*

3. *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 10081, China*

4. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

5. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorology Administration, Beijing 10089, China*

**Abstract** On June 25, 2020, Tianjin Xiqing was affected by a convective storm accompanied by a mesovortex (MV), which produced record-breaking gust ( $41.4 \text{ m s}^{-1}$ ) since the observation started in 1957. In order to improve the scientific understanding of extreme thunderstorm winds caused by such mesoscale vortex, the thermodynamic structure characteristics and maintenance mechanism of MV were analyzed by using the Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) technique of radar data combined with multi-source observation data. The results show that the MV in this process was initially born at a height of 2.0 km, and the contracting and stretching vertical vortex rapidly descended to surface from 2.0 km height with the rotation speed increasing and vortex diameter contracting. During this process, the surface transition from warm and dry to cold and wet cyclonic vortex, extreme wind appeared in the overlap area of western of MV and rear inflow jet (RIJ). The evolution of MV was closely related to the different properties in convective storms. In the mature stage of MV, the vertical circulation was formed by tilt updraft (TUD), RIJ, front flank downdraft (FFD) and forward low-level inflow (FLI). During the strengthening and descent of MV, the rainwater evaporated and absorbed heat during its descent, leading to a significant enhancement in the intensity of RIJ and its continuous downward extension. The configuration of the cold pool and vertical wind shear plays crucial role in the evolution of MV: from the formation to development stage of MV, the cold pool and low-level vertical wind shear from 0-3 km height

reach a stage of equilibrium; from the development to mature stage of MV, the cold pool and bulk vertical wind shear from 0-6 km height reach a balanced stage; from the mature to dissipation stage, the intensity of cold pool exceeds the bulk wind shear, which is unfavorable for the storm development. Distinct from the ground-reaching RIJ associated with typical bow echo, the RIJ in this event did not reach the ground, but instead coupled with the vertical downdraft of MV in near an altitude of 1 km, generating a vertically downward perturbation pressure gradient force. Meanwhile, the drag effect of rainwater facilitated the strengthening of the downdraft. During its descent, evaporation and heat absorption weakened the cold pool, which in turn intensified the surface wind speed, collectively leading to the extreme gale.

**Keywords** extreme wind, mesovortex (MV), bow echo, rear inflow jet (RIJ)

## 1 引言

极端雷暴大风（以下简称：极端大风）是指阵风风速 $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$ （10级）且伴有雷电的强对流天气（马淑萍等，2019），往往造成与龙卷天气破坏程度相当或高于弱龙卷天气危害程度的灾情。其中，局地极端大风往往伴随着 $\gamma$ 中尺度（2~20 km，Orlanski, 1975）涡旋（mesovortex，以下简称MV）的发展演变（Weisman and Trapp, 2003; Wheatley et al., 2006; Xu and Xiao, 2024）。由于MV发生发展迅速、局地性强，且热动力结构复杂，伴随MV的极端大风天气具有突发性强、破坏力大、防御时间短、预警难度高等特点，因而在强对流天气研究中备受关注（郭英莲和孙继松，2019；许长义等，2023；王婷婷等，2023；Xu et al., 2024）。

研究表明，在准线性对流系统（Quasi-Linear Convective Systems, QLCSs）的前沿常存在维持时间不足1 h、位于大气低层的中尺度涡旋（Trapp and Weisman, 2003; Atkins and Laurent, 2009a, 以下简称AL09a, 2009b; Xu et al., 2015a, 2015b）。MV通过改变地面附近的气压梯度，产生垂直向下的扰动气压梯度力，加强垂直下沉速度，进而导致极端大风甚至龙卷的出现（Schenkman and Xue, 2016; 戴建华等，2021）。Roberts and Wilson（1989）研究表明，MV确实有助于云内初始下沉气流的触发。另一方面，极端大风的产生与后侧入流急流（Rear Inflow Jet，以下简称RIJ）下沉到近地面有关（Johns and Hirt, 1987; Grim et al., 2009），而MV在RIJ结构和强度的发展演变中起着重要的作用（Meng et al., 2012）。Atkins et al.（2005）发现灾害性大风的的路径并非沿着弓形回波顶点，而是出现在MV南侧与RIJ交汇处。Weisman（1993）认为弓形回波顶端的极端大风由RIJ的动量下传及地产生，而RIJ主要由扰动低压引起的水平扰动气压梯度力产生（Lafore and Moncrieff, 1989）。MV附近垂直向下的扰动气压梯度力（vertical pressure gradient force, VPGF）是中低层RIJ

加强的主导因素 (Xu et al., 2015a)。最新的数值模拟研究 (Xu et al., 2024) 揭示了合并型弓形回波中, 对流的合并加强了 MV 的低层辐合, 通过垂直涡度的拉伸导致 MV 向下发展和增强, 最终 MV 的旋转流与环境流的叠加产生了范围更广、强度更大的灾害性大风。由此可见, 与 MV 有关的极端大风研究难点在于尚不清楚 MV 的发展演变规律与大风强度和位置的对应关系。

风暴环境对 MV 的发展演变具有重要影响 (杨磊等, 2023)。Weisman and Trapp (2003) 通过理想数值试验研究指出, 较强的深层垂直风切变和较大的对流有效位能均有利于弓形回波 MV 的生成, 并指出 QLCSs 中上升气流的强度和倾斜度决定了 MV 的伸展程度, 研究还强调了强冷池以及科氏力强迫对 MV 的强度具有重要作用。Matthew et al. (2024) 研究了低层垂直风切变的方向和大小对飚线结构和 MV 形成的影响, 发现大气低层风速矢端曲率增加有助于形成更强和更宽的上升气流, 而上升气流又支撑更强烈和持久的 MV 发展。Nielsen and Schumacher (2018) 的数值模拟研究则揭示出较强的 0~1 km 垂直风切变环境有利于 MV 的强烈发展, 其产生的动力非线性扰动气压梯度力增强风暴低层的上升运动。另一方面, 在 MV 发展演变过程中, 冷池的作用同样不可忽视。研究指出 (Trapp and Weisman, 2003; 杨磊等, 2023), 冷池出流形成的水平涡度在下沉气流的扭曲作用下导致 MV 的形成。Liu et al. (2023) 指出在湿度较大、垂直风切变较弱的季风环境中, 合并型弓形回波发展时形成了相对较弱的冷池和 MV, 这种风暴环境不同于北美地区, 可能与北美地区弓形回波后侧强的 RIJ 有关。此外, 阵风锋前沿 MV 与冷池存在相互影响和内在关联, MV 的碰撞增强了阵风锋的辐合抬升, 配合冷池的合并增强, 形成较强的水平涡度, 从而导致对流风暴加强发展 (许长义等, 2022)。上述研究表明, 垂直风切变和冷池均对 MV 的发展演变具有重要影响, 但两者的配置对 MV 发展演变的影响仍不明确, 还有待进一步研究。

2020 年 6 月 25 日夜間, 华北平原地区出现了一次较大范围的雷暴大风过程 (许长义等, 2023), 其中天津西青站阵风风速达到  $41.4 \text{ m s}^{-1}$ , 为 1957 年有完整气象观测资料以来的最强阵风。近年来, 我国破纪录的极端大风事件时有发生, 如 2009 年 6 月 3 日河南商丘、2015 年 6 月 1 日湖北监利、2016 年 6 月 10 日渤海湾、2021 年 4 月 30 日江苏南通均出现破历史极值的极端大风事件。这些极端大风事件均与 MV 的发展演变密切相关 (王秀明等, 2012; 郑永光等, 2016; 许长义等, 2022; 吴海英等, 2023; Luo et al., 2024)。尽管 Tang et al. (2020) 统计分析了我 国江淮流域两类 MV 的结构特征, 但是针对 MV 与地面大风的时空配置及其热动力结构演变特征方面的研究仍存在不足, 尚不能为精准预报极端大风天气提供清晰的机理认识基础。为此, 本文针对 2020 年 6 月 25 日发生在华北平原的一次极端大风过程, 之前的研究基于观测资料分析了对流风暴的环境演变特征及致灾大风的成因机制 (许长义等, 2023), 本研究将利用高分辨率的数值模拟结果, 进一步分析 MV 的热动力结构特征及其发展维持机制, 从而加深对伴有中尺度涡旋的极端大风机理的认识和理解。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料简介

本文所选取的数据资料主要包括：（1）欧洲中期天气预报中心第5代全球再分析资料（the fifth ECMWF reanalysis，以下简称 ERA5 资料），时间分辨率为 1 小时，水平分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ，垂直分辨率为 25 hPa，垂直方向共 37 层（Hersbach et al.,2020），主要用于环流形势和环境条件的分析，并为 WRF（Weather Research and Forecasting Model）中尺度模式提供初始场和边界场；（2）北京大兴和天津塘沽两部 CINRAD/SA 多普勒天气雷达体扫资料，要素包括基本反射率因子、基本径向速度和组合反射率因子，时间分辨率为 6 分钟，覆盖时间段为 2023 年 6 月 25 日 20:00~24:00（北京时，下同），用于分析对流风暴的演变特征；（3）华北平原地区加密自动站观测资料，要素包括温度、露点温度、气压和风场，时间分辨率为 5 分钟，覆盖时间段为 25 日 20:00~24:00，用于分析 MV 的结构演变特征；（4）华北平原地区加密自动站降水资料，时间分辨率为 1 小时，覆盖时间段为 25 日 20:00~24:00，用于分析强对流过程的短时强降水落区；（5）北京站探空资料，要素包括温度、相对湿度，资料时间为 6 月 25 日 20:00，用于对比检验此次强对流过程中 WRF 模拟结果和 VDRAS 反演结果与实况的偏差情况。

### 2.2 模式系统介绍、设置和检验

本研究所采用的变分多普勒雷达分析系统（Variational Doppler Radar Analysis System，以下简称 VDRAS）是在 Sun and Crook（1997，1998）最初发展研究的包含暖雨参数化方案的三维云模式和雷达四维变分同化技术（4-D variational assimilation，以下简称 4DVar）的基础上，经过一系列改进（Sun and Crook，2001；陈明轩等，2011）建立起来的适合于京津冀地区的雷达变分分析系统（陈明轩和王迎春，2012；肖现等，2015；Xiao et al，2019，2022）。首先，中尺度背景场的选取对于 VDRAS 结果非常重要（陈明轩等，2012）。为了得到可靠的背景场，本研究选取基于 WRF-ARW（Advanced Research WRF）4.1.1 版本的 3 km 分辨率的模拟结果作为背景场，WRF 模式采用水平分辨率为 9 km 和 3 km 的嵌套网格方案（图 1），垂直层数为 51 层，模式层顶气压为 50 hPa。模拟所采用的物理过程参数化方案包括 Lin 微物理方案、RRTM 长波和短波辐射方案、Yonsei 边界层方案、Noah 陆面方案和 Kain-Fritsch 积云对流方案（仅用于 d01），这些方案经过调试筛选得到。模拟的初始时刻为 2020 年 6 月 25 日 08 时，整个模拟过程积分 24 h，至 6 月 26 日 08 时。WRF 模式初始场和边界场均选用 ERA5 再分析资料。

其次，本研究的 VDRAS 系统使用了京津冀地区 5 部多普勒天气雷达（图 1 中“+”所示）在 VCP21 扫描模式下的同步组网观测资料，包括径向速度和反射率因子。在本模拟中，水平方向网格点数设置为  $200\times 200$ ，水平分辨率为 2 km，模拟范围为  $400\text{ km}\times 400\text{ km}$ 。模式中心设定于

(39.58 N, 116.18 E)。在该模式系统范围内，同时对 5 部多普勒天气雷达（北京、天津、石家庄、秦皇岛和沧州 S 波段）资料进行同化（雷达站位置如图 1 中“+”所示），其中雷达扫描模式为 VCP21（6 min 间隔、9 个仰角）。垂直方向模式设置为 60 层，垂直分辨率为 150 m，模式最低层高度为垂直分辨率的一半即 100 m，模式层高为 11.9 km (Xiao et al., 2022)。为实现雷达资料的有效和快速同化分析，并有效减少模式误差的累积，本模拟设置雷达变分分析系统以快速更新循环方式运行，其中第一个循环为冷启动，随后是热启动。设置每个 4DVar 循环为 12 min，包含上述每部雷达在 VCP21 模式下体扫资料的同化，并利用云模式进行 6 min 预报，作为下一次热启动的初猜场 (肖现等, 2015)。此外，VDRAS 系统利用有限元准牛顿迭代算法进行代价函数的最小化迭代 (Sun and Crook, 1997)，经测试发现，当迭代次数达到 35~40 时，代价函数的梯度迅速下降到比较平缓的状态。因此，设定迭代次数为 40 次，即终止代价函数的最小化过程，并输出同化分析结果。同时，利用云模式进行 6 min 预报，作为下一循环的初值。本研究将利用模式反演结果分析 MV 的结构演变过程。

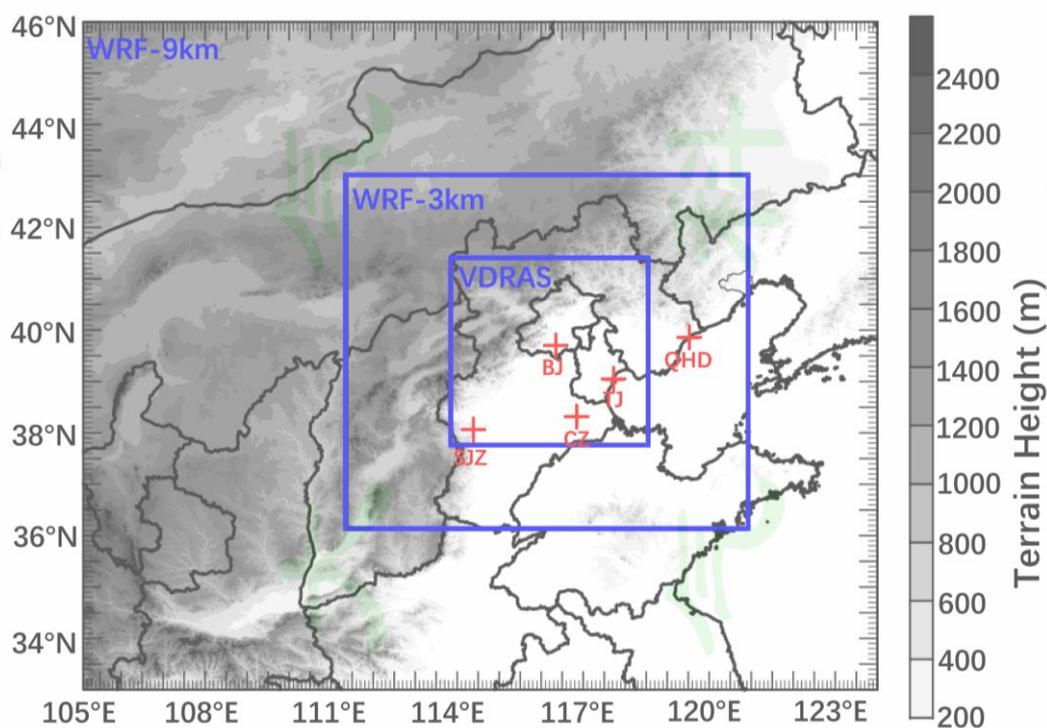


图 1 WRF 模拟区域（整个区域为 9 km 分辨率，中间方框为 3 km 分辨率）和雷达变分分析系统模式范围（内框）（“+”分别表示北京（BJ）、天津（TJ）、石家庄（SJZ）、秦皇岛（QHD）、沧州（CZ）雷达站位置，灰阶表示地形高度，单位：m）

Fig. 1 Domain of the Weather Research and Forecasting (WRF) model (the whole region with 9 km resolution, the middle rectangle with 3 km resolution) and Variational Doppler Radar Assimilation and Analysis System (VDRAS) (the innermost rectangle). The five radar sites of the operational China New Generation Radars (CINRAD) network are marked (+symbols) as: BJ, TJ, SJZ, CZ and QHD. The gray shaded indicates terrain heights (unit: m).

最后，为了验证 VDRAS 模拟结果的准确性，本研究利用北京站探空站的温湿资料分别对 VDRAS 模拟结果和 WRF 模拟结果进行了比较（图 2）。VDRAS 模拟的温度曲线与实况吻合得较好（图 2a），相对湿度曲线也较 WRF 模拟结果更接近实况（图 2b），说明 VDRAS 模拟结果能够较好地反映此次强对流过程的热力情况。

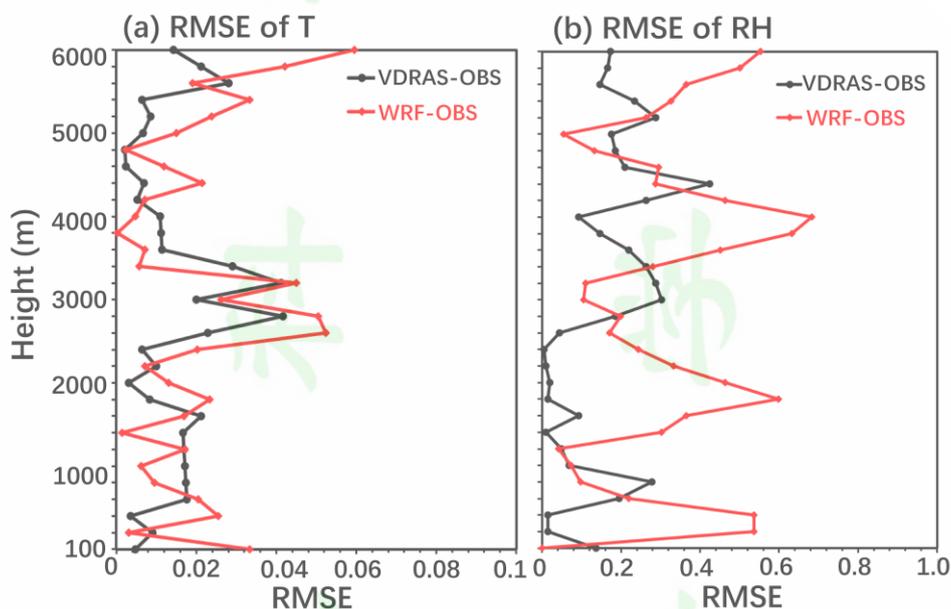


图 2 2020 年 6 月 25 日 20:00 VDRAS 和 WRF 与北京探空站温度 (a) 和相对湿度 (b) 的均方根误差

Fig. 2 Root mean square error of temperature (a) and relative humidity (b) between Variational Doppler Radar Analysis System and Weather Research and Forecasting and Beijing sounding station at 20:00 BJT 25 June 2020.

### 3 天气背景与个例简介

#### 3.1 实况与灾情

2020 年 6 月 25 日夜间，华北平原出现历史罕见的雷暴大风天气（图 3b），其中 8 级以上大风站 63 个，10 级以上大风站 16 个，12 级以上大风站 1 个，最大阵风出现在天津的西青站，达  $41.4 \text{ m s}^{-1}$ （13 级），出现时间为 22:54，为 1957 年西青有完整气象观测资料以来的最强极大风速。同时在河北廊坊、天津西青、津南等多地出现冰雹，最大直径达 2.5 厘米，达到大冰雹标准。此次过程从北京昌平至天津沿海的两百千米路径，仅用不足 4 h，平均速度超过  $50 \text{ km h}^{-1}$ ，过程致灾性非常强，极端大风导致农作物大量受损、房屋垮塌，直接经济损失达 5.16 亿元（许长义等，2023）。

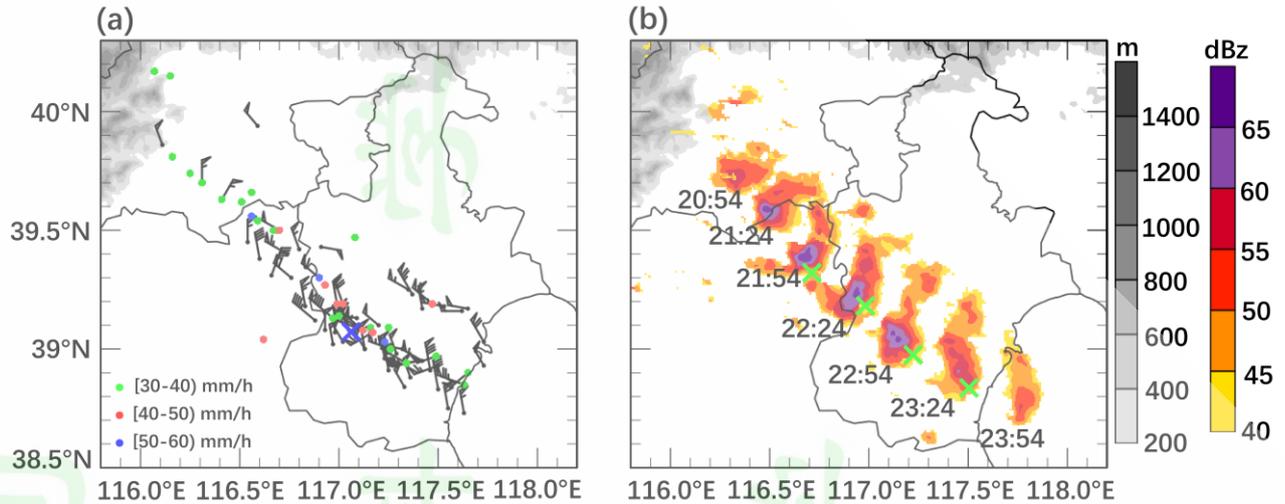


图3 (a) 2020年6月25日20:00-24:00华北平原地区逐小时降水量( $\geq 30 \text{ mm h}^{-1}$ )和 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 的雷暴大风(风羽)(蓝色“x”表示天津西青位置,灰阶表示地形高度(单位:m)) (b) 25日20:54-23:54对流风暴及MV演变(色阶:40dBZ以上雷达组合反射率拼图,绿色“x”代表MV)

Fig.3 (a) Hourly precipitation ( $\geq 30 \text{ mm h}^{-1}$ , color spots) and wind speed  $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$  (wind bars) from 2000 BJT to 2400 BJT 25 June 2020 (Blue “x” indicates Xiqing station. The gray shaded indicates terrain heights (unit: m)); (b) Evolution of convective storm from 2054 BJT to 2354 BJT 25 June (color shaded: composite reflectivity  $\geq 40 \text{ dBZ}$ , green “x” indicate MV)

### 3.2 天气形势和环境条件

利用 ERA5 资料分析此次强对流过程发生前的天气尺度背景场。6月25日14:00, 对流层中层500 hPa 高度上(图4a)低涡中心位于内蒙古中部, 低涡中心伴随有温度( $T$ )为 $-20^\circ\text{C}$ 且比湿( $q$ )为 $2 \text{ g kg}^{-1}$ 的干冷中心, 华北平原处于高空冷涡东南部的干冷区控制, 20:00 随着高空低涡低槽东移(图略), 受槽前正涡度平流控制, 加剧了层结不稳定和动力不稳定性, 进而有利于低层低值系统中辐合上升运动的加强。从对流层低层850 hPa 形势图可以看出, 内蒙古中部存在一低压中心, 华北平原受到低空切变线前部东南气流带来暖湿气流控制, “上干冷下暖湿”的结构配置有利于层结不稳定的发展。地面图上京津地区处于地面低压的东南部, 受暖湿舌( $T \geq 28^\circ\text{C}$ ,  $q \geq 18 \text{ g kg}^{-1}$ )控制造成近地面能量条件有利于对流风暴的发展。

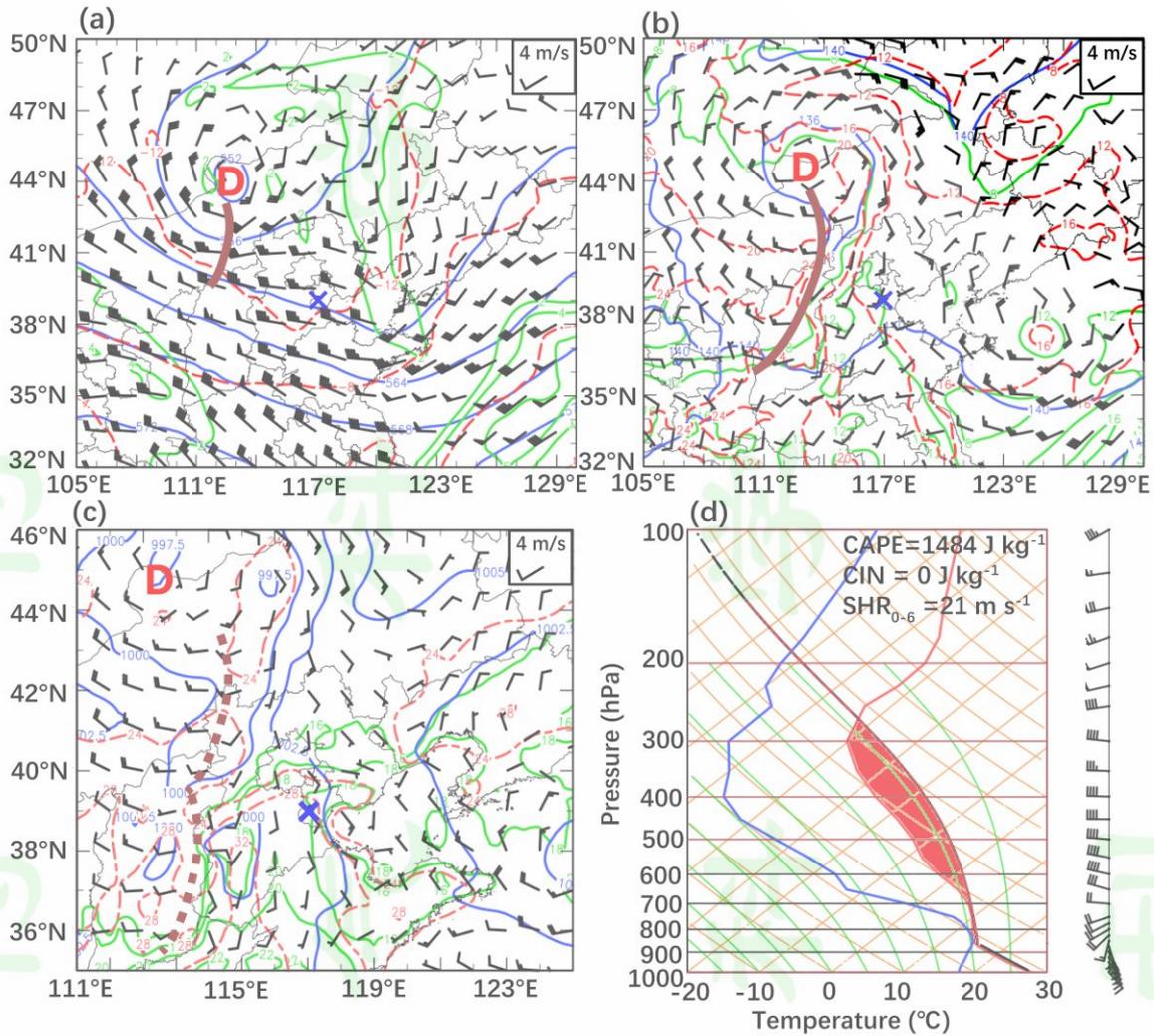


图4 2020年6月25日14时天气形势

(a) 500hPa 位势高度 (蓝色实线, 单位: dagpm)、温度 (红色虚线, 单位: °C)、比湿 (绿色实线, 单位: g kg<sup>-1</sup>) 及风场 (单位: m s<sup>-1</sup>), 其中红色字母“D”表示低压 (下同), 棕色实线为槽线, 蓝色“×”表示天津西青位置; (b) 850hPa 位势高度 (蓝色实线, 单位: dagpm)、温度 (红色虚线, 单位: °C)、≥8 g kg<sup>-1</sup> 比湿 (绿色实线, 单位: g kg<sup>-1</sup>) 及风场 (单位: m s<sup>-1</sup>), 其中棕色实线为切变线; (c) 地面气压场 (蓝色实线, 单位: hPa)、≥12 g g<sup>-1</sup> 的2m 高度处比湿 (绿色实线, 单位: g kg<sup>-1</sup>)、≥24 °C 的2m 高度处温度 (红色虚线, 单位: °C) 及风场, 其中棕色虚线为地面辐合线; (d) 西青站探空曲线 (蓝线表示露点曲线, 黑线表示温度层结曲线, 红实线表示过程曲线, 红色阴影表示 CAPE, 风向杆: 全杆为 4 m s<sup>-1</sup>)

Fig. 4 Synoptic pattern at 14:00 BJT 25 June 2020

(a) Geopotential height (blue solid line), temperature (red dashed line), specific humidity (green solid line, only the values less than 2 g kg<sup>-1</sup>) and horizontal wind at 500 hPa. The red letter “D” denotes low pressure, brown line is trough. Blue “×” indicates Xiqing station; (b) Geopotential height (blue solid line), temperature (red dashed line), specific humidity (green solid line, only the values greater than 8 g kg<sup>-1</sup>) and horizontal wind at 850 hPa; (c) Surface pressure field (blue solid line), 2 m specific humidity (green solid line, only the values greater than 12 g kg<sup>-1</sup>), 2 m temperature (red dashed line, only the values greater than 24 °C) and horizontal wind; (d) Skew T-logp diagrams at Xiqing (The blue, black and red line indicate dew point curve, stratification curve and state curve, respectively. Shading in red is CAPE. The full barbs indicating speeds of 4 m s<sup>-1</sup>)

基于 ERA5 资料绘制的 25 日 14:00 西青站探空曲线 (图 4d) 具有以下特征: ① 较强的对流有效位能 (Convective Available Potential Energy, CAPE 为  $1484 \text{ J kg}^{-1}$ ) 和弱的对流抑制能量 (Convective Inhibition, CIN 为  $0 \text{ J kg}^{-1}$ ); ② 温湿廓线呈“X”型: 700 hPa 以上的中高层为干层, 900~850 hPa 接近饱和, 而地面相比 850 hPa 相对较干, 这是高空冷涡背景下常见的探空形态 (许爱华等, 2014; 彭霞云等, 2022), 干层强, 位于 500 hPa 附近; ③ 近地层 1000~850 hPa 的环境大气温度廓线与干绝热线近乎平行, 表明温度垂直递减率较高, 这种温湿廓线特征有利于风暴云内水凝物粒子下降过程中的蒸发冷却 (王秀明等, 2013; 吴海英等, 2023), 有利于地面大风的形成; ④ 900 hPa 以下近地层为东南风, 其上为偏西风, 0~6 km 垂直风切变为  $21 \text{ m s}^{-1}$ , 属于强切变环境。

通过上述分析可知, 此次对流风暴表现为典型的“X”型垂直结构特征, 高空干冷平流夹卷进入风暴, 导致下沉气流强烈蒸发冷却, 有利于加强下沉气流与暖湿入流间的斜压涡度 (Davies-Jones, 1984), 大气的热动力条件非常有利于对流风暴中 MV 的形成和发展。

#### 4 对流风暴和 MV 结构特征的观测分析

6 月 25 日 20 时前后, 北京西北部山区的对流风暴生成并逐渐组织发展增强, 对流风暴经历了超级单体-弓形回波-逗点回波三个阶段 (许长义等, 2023), 其前侧不断有 MV 的发展演变, 根据 MV 的识别标准 (Tang et al., 2020): (1) 水平尺度 2~20 km; (2) 垂直伸展高度位于 2~3 km 以下; (3) 雷达方位角切变超过  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 本次过程 MV 于 21:30 形成, 23:20 减弱消亡, 根据其结构演变特征划分为形成、发展、成熟和消散四个阶段, 下文将对 MV 的结构演变特征进行分析。

##### 4.1 形成阶段

6 月 25 日 20 时, 北京西北部山区的对流单体生成后, 快速向东南偏东方向移动, 21 时加强为超级单体 (许长义等, 2023)。从 2.0 km 高度反射率因子图可见, 超级单体最大反射率因子强度超过 60 dBZ (图 5a), 低层呈现出明显的钩状回波结构特征, 径向速度图上可探测到气旋性旋转特征 (图 5e 中“×”), MV 对应的方位角切变为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 垂直伸展厚度为 1.5~3.5 km, 水平尺度约为 17 km, 地面表现为暖干的  $\gamma$  中尺度涡旋 (图 5a 中“×”, 温度 24~26 °C, 温度露点差 6~7 °C), 近地面垂直涡度为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。此阶段 MV 的西北侧出现  $21.6 \text{ m s}^{-1}$  (9 级) 的雷暴大风。

##### 4.2 发展阶段

6 月 25 日 22 时, 对流风暴发展为弓形回波后继续向东南方向移动, 回波中心最大反射率因子强度增强至 65 dBZ, 回波前沿具有明显的反射率因子梯度, 后侧存在入流缺口 (Rear Inflow Notch, 以下简称 RIN, 图 5b)。与反射率因子图的后侧入流缺口对应, 径向速度图上观测到后侧入流急流 (Rear Inflow Jet, 以下简称 RIJ, 图 5f)。MV 位于弓形回波南端前侧, 其方位角切变增强为  $1.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 垂直伸展厚度为 1.2~3.5 km, 水平尺度从 17 km 迅速收缩为 6 km。与上一阶段相比, 地面温

度 (22~24 °C) 有所降低, 但 MV 仍对应暖干的  $\gamma$  中尺度气旋性涡旋 (图 5b 中“x”, 温度露点差 5~8 °C), 垂直涡度为  $0.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。此阶段 MV 西侧地面出现  $28.5 \text{ m s}^{-1}$  (11 级) 的雷暴大风。

### 4.3 成熟阶段

22:55 弓形回波逐渐演变为北窄南宽的不对称结构, MV 的垂直涡度增强为  $1.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (图 5c), 与此同时, MV 的垂直伸展再次降至 0.7~3.0 km, 直径从 9.4 km 迅速收缩至 6.7 km, 旋转速度由  $17.0 \text{ m s}^{-1}$  增强为  $20.5 \text{ m s}^{-1}$ , 即 MV 在垂直向下伸展的同时, 水平尺度快速收缩且旋转加剧。近地面 MV 对应冷湿的气旋性涡旋 (图 5b 中“x”, 温度 16~20 °C, 温度露点差 2~5 °C), MV 西侧的西青站出现  $41.4 \text{ m s}^{-1}$  (13 级) 的极端大风, 这与 AL09a 得出的极端大风位于 MV 南端 (图 6a) 的结论略有差异。

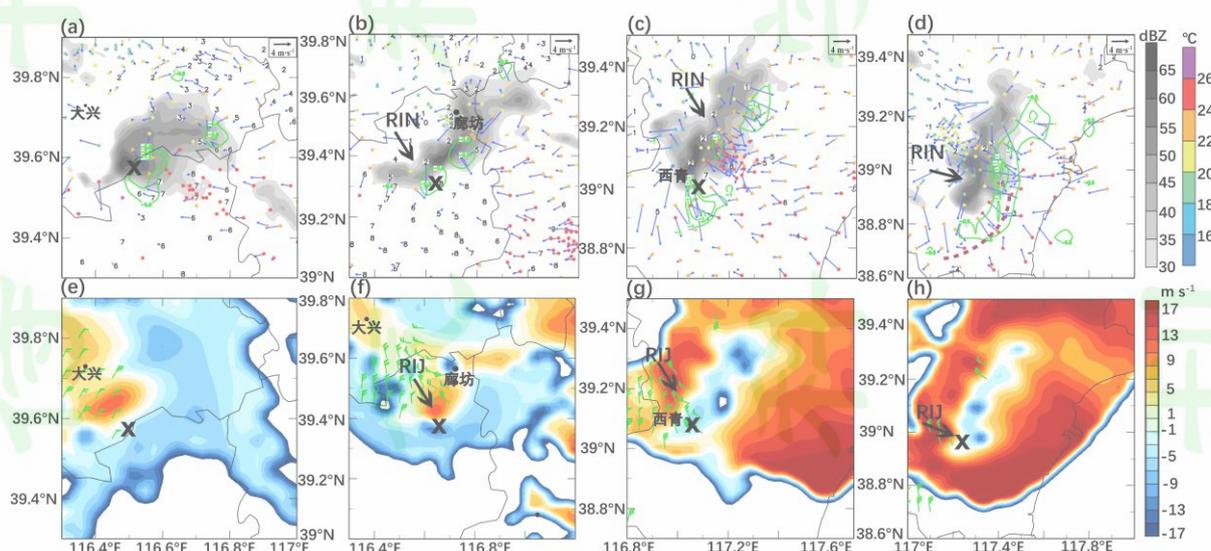


图 5 2020 年 6 月 25 日 21:30 (a、e)、22:00 (b、f)、22:55 (c、g)、23:20 (d、h) 2.0 km 高度反射率因子 (灰阶, 单位: dBZ)、地面加密自动站风场 (箭矢, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )、温度 (彩色圆点, 单位: °C)、温度露点差 (数字, 单位: °C) 和涡度场 (绿色等值线, 单位:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) 分布图 (a、b、c、d) 北京大兴多普勒天气雷达 1.5° 仰角径向速度 (色阶, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 及地面  $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$  的阵风 (风羽) 分布 (e、f、g、h) (RIN 和 RIJ 分别表示后侧入流缺口和后侧入流急流, “x”代表 MV, 红色虚线表示地面辐合线)

Fig.5 (a、b、c、d) Radar reflectivity (shaded, unit: dBZ) at 2.0 km height, automatic weather station wind field (barb, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ), temperature (color denote, unit: °C), temperature and dewpoint temperature difference (numbers) and vorticity field (green contour, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) (e、f、g、h) radial velocity at 1.5° elevation of Daxing Doppler Radar (shaded, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) and wind speed  $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$  (barb) at 21:30(a、e)、22:00 (b、f)、22:55 (c、g)、23:20 (d、h) BJT 25 June 2020. (RIN and RIJ denote the rear inflow notch and rear inflow jet, respectively. Bow and Arrow denote bow echo and arrow echo, respectively. “X”denote MV. The red dashed line is surface convergence line.)

### 4.4 消散阶段

23:20 对流风暴演变为“逗点状” (图 5d), 逗点头部前侧对应 MV, 此阶段 RIJ 减弱  $17 \text{ m s}^{-1}$ , MV 的旋转速度减弱为  $13.5 \text{ m s}^{-1}$ , 厚度约为 0.4~2.8 km, 涡度为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。与 MV 对应的地面温

度 18~20 °C、温度露点差 2~3 °C 的冷湿中心 (图 5d)，并形成长度约为 20 km 的准线状辐合线 (图 5d 中红色虚线)，辐合线西侧产生 22.9 m s<sup>-1</sup> (9 级) 的瞬时阵风。

表 1 MV 不同发展阶段观测特征对比表

Table 1 Comparison of evolution characteristics in the development stage of MV based on observation data

演变阶段 特征量	形成	发展	成熟	消散
水平尺度 (km)	17	6	8	12
垂直伸展厚度 (km)	1.5~3.5	1.2~3.5	0.7~3.0	0.4~2.8
方位角切变 (10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	1.0	1.8	2.4	0.9
旋转速度 (m s <sup>-1</sup> )	15.5	24.0	18.0	13.5
近地面垂直涡度 (10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	1.2	0.9	1.4	2.0
温度 (°C)	24~26	22~24	16~20	18~20
温度露点差 (°C)	6~7	5~8	2~5	2~3
地面大风强度 (m s <sup>-1</sup> )	21.6 (9 级)	28.5 (11 级)	41.4 (13 级)	22.9 (9 级)
大风与 MV 的相对位置	西北侧	西北侧	西侧	西侧

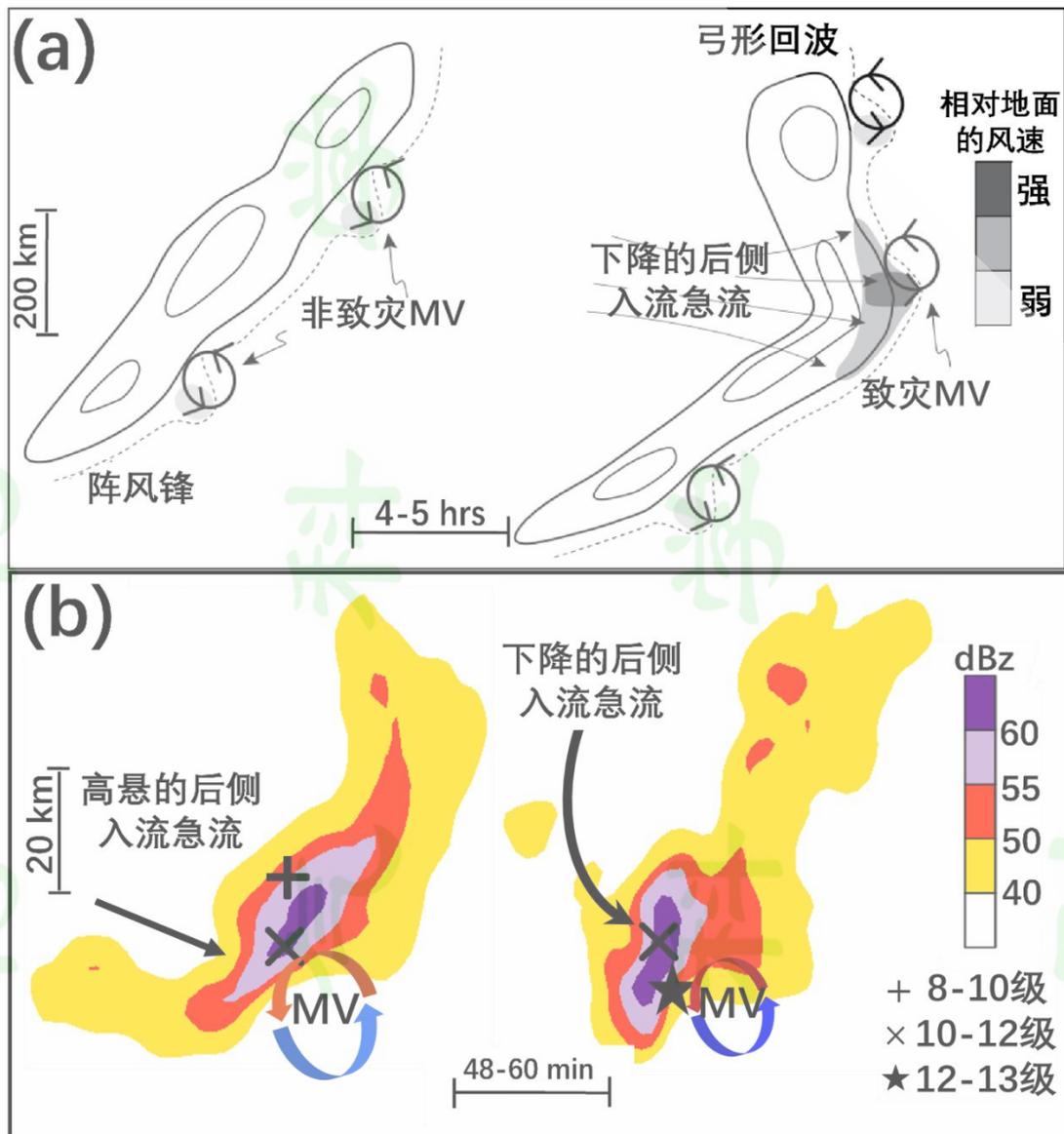


图 6 (a) 弓形回波内可致灾和非致灾 MV (引自于 AL09a) (b) 2020 年 6 月 25 日弓形回波 MV 演变示意图

Fig.6 (a) Schematic diagram illustrating damaging and nondamaging mesovortices formed within a bow echo (AL09a) (b) Schematic diagram for the evolution of bow echo mesovortice at 25 June 2020.

通过对比分析 AL09a 中弓形回波与 MV 的配置关系可知 (图 6), AL09a 提出的弓形回波尺度较大, 生命史较长, 极端大风位于 MV 西侧与 RIJ 叠置区。本次过程弓形回波尺度较小, 生命史短 (110 min), MV 初生于 1.5~3.5 km 高度, 在向下拉伸过程中伴随着气旋性涡旋的旋转速度快速增强、涡旋直径收缩 (表 1), 根据角动量守恒原理, 旋转速度加快必然伴随涡旋直径收缩, 这也反映了风暴中垂直运动对于涡管的拉伸效应。成熟阶段弓形回波由南北对称结构逐渐演变为北窄南宽的不对称结构, 极端大风出现在 MV 的西侧与 RIJ 叠置区, 下文将通过 VDRAS 模拟结果细致分析 MV 不同发展阶段的热动力结构特征。

### 5 MV 不同发展阶段的热动力结构演变特征

前面一节基于观测结果定性分析了 MV 各个发展阶段的地面中尺度演变特征，本节将利用 VDRAS 模拟结果定量分析 MV 的热动力结构演变特征。

### 5.1 形成阶段

图 7 为模拟的 MV 不同发展阶段的反射率因子、涡度、垂直速度与相对风暴的水平风场。6 月 25 日 21:30，MV 位于超级单体前沿，对应辐合上升运动区，垂直涡度大值中心 ( $6 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ) 位于近地层 100 m 高度 (图 7a)。从垂直剖面图 (图 8a) 可见，50 dBZ 以上强回波位于 7 km 高度，斜升气流 (Tilt Updraft, 以下简称 TUD) 贯穿整个对流风暴。从雨水混合比 ( $qr$ ) 的垂直分布可知， $1 \text{g kg}^{-1}$  以上的  $qr$  区域接近 8 km 高度，且与斜升气流对应，表明该阶段对流风暴具有明显的垂直伸展特征。后侧入流气流 (Rear Inflow Jet, 以下简称 RIJ) 高悬于 4~5 km，强度为  $20 \sim 22 \text{ m s}^{-1}$ 。MV 位于对流风暴前侧 2~3 km 高度附近，其前沿 1 km 以下为低层入流气流 (Forward Low-level Inflow, 以下简称 FLI)，该入流气流为高能舌 ( $\theta_{se} > 344 \text{ K}$ )，且  $\partial \theta_{se} / \partial z < 0$ ，表现出明显的对流不稳定特征。

### 5.2 发展阶段

随着对流风暴演变为弓形回波结构，存在三支不同性质的气流：一支位于近地层 (0~2 km) 的前侧下沉气流 (Forward Flank Downdraft, 以下简称 FFD)，另一支位于雷暴前侧中高层 (3~8 km) 的斜升气流 (TUD)，第三支位于风暴后侧中层 (2~4 km) 的后侧入流气流 (Rear Inflow Jet, 以下简称 RIJ)。RIJ 为中层较干的、具有低假相当位温的入流 ( $\theta_{se} < 324 \text{ K}$ )，在弓形回波发展过程中不断向下伸展，此阶段增强至  $30 \text{ m s}^{-1}$ ，并向下伸展至对流层低层 2 km 高度附近，RIJ 将雷暴后方中层的干冷空气带入层状云区低层，下沉接近地面时辐散，与前侧下沉气流共同对地面大风的形成有重要作用，同时也增强了弓形回波前端 MV 的辐合。斜升气流为高能量的暖湿空气 ( $\theta_{se} > 338 \text{ K}$ )，在对流云区前部辐合强迫抬升，其中一部分在高层翻转，向前方流出，带出了部分对流云区的暖湿空气。由于斜升气流增强，导致假相当位温梯度加大，产生中尺度锋面。这支斜升气流在 4 km 高度向前流出云体，中尺度锋面上辐合上升运动加强，进一步促进了对流风暴的发展加强，这是一个正反馈的过程 (雷蕾等, 2021)。从垂直速度看，MV 在 100 m 高度处的垂直上升速度较形成阶段有所减弱，但 MV 西侧开始出现下沉运动。从垂直涡度看，MV 伸展至 4 km 高度 (图 8b)，垂直涡度中心增强至  $12 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ，对应假相当位温密集带。雨水混合比大值中心位于 3~4 km，对应上升气流区，雨滴粒子主要分布在 4 km 以下的对流层低层，并与 MV 联系紧密 (图 8b)。

### 5.3 成熟阶段

22:54 弓形回波演变为北窄南宽的不对称结构 (图 7c)，从雷达反射率的垂直剖面看，与上一阶段相比，50 dBZ 以上的强回波伸展至 9 km 高度以上，有明显的回波空洞特征 (图 8c)。从垂直气

流结构来看,前侧下沉气流中下沉气流强度较上一阶段显著增强,与风暴前侧的暖湿入流气流(FLI)共同增强了MV的近地层辐合。TUD进一步发展加强,表明风暴顶辐散加强(李佳等,2017)。RIJ为中层较干的、假相当位温较低的入流( $\theta_{se}<328\text{ K}$ ),在接近弓形回波系统的过程中进一步向下伸展至1 km高度附近,强度增强至 $30\text{ m s}^{-1}$ ,并下沉到近地面辐散流出。从垂直涡度的分布看,100 m高度处垂直涡度中心增强至 $15\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ (图7c),其东西两侧分别对应上升和下沉运动,下沉速度较发展阶段有所增强。垂直方向上,MV下传及地,其西侧与RIJ叠置区出现极端大风(图8c中“★”)。雨水混合比最大值达到 $4.5\text{ g kg}^{-1}$ ,较上一阶段有所增加,对应下沉气流区,大值中心位于800 m以下的近地面,与MV垂直涡度大值区基本重合(图8c),说明雨水在下降过程中蒸发吸热使得近地面冷池不断增强导致地面风速在辐散过程中加强,是地面极端大风形成的重要原因之一。此阶段MV加强的原因可能是:对流风暴回波顶高快速升高、低层辐合、风暴顶辐散的特征,表明对流风暴内的强上升气流对垂直涡度的拉伸使得旋转加强(杨磊等,2023)。MV的水平涡度进入风暴的斜升气流与前侧下沉气流共同作用下转换成垂直涡管(图7c),形成闭合垂直环流圈并向下伸展至近地面(图8c中“×”),对应低能区( $\theta_{se}<328\text{ K}$ ),且下沉气流强度明显强于上升气流。总的来说,该阶段垂直下沉运动较上阶段显著增强,雷达反射率上MV对应回波空洞特征,MV的垂直涡度较上阶段显著增强,雨水混合比大值区位于MV中心区。

#### 5.4 消散阶段

6月25日23:18,对流风暴演变为具有逗点结构的弓形回波(图7d),从雷达反射率的垂直结构看(图8d),大于50 dBZ以上的强回波中心降至4.5 km,明显低于成熟阶段。 $1\text{ g kg}^{-1}$ 以上的 $qr$ 区域降至4 km以下高度,中心最大值迅速减小为 $2.5\text{ g kg}^{-1}$ ,较成熟阶段显著减小。MV的辐合强度和伸展高度均明显减弱,气旋式涡旋仅在100 m高度层有所表现,其垂直涡度减弱至 $8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ (图7d),3 km高度的后侧入流急流减弱至 $16\text{ m s}^{-1}$ (图8d)。假相当位温高值区随弓形回波的发展有所减小,可能是因为环境垂直风切变产生的水平涡度造成环境干空气夹卷效应增强,进而使蒸发冷却作用增强(程晶晶等,2022)。

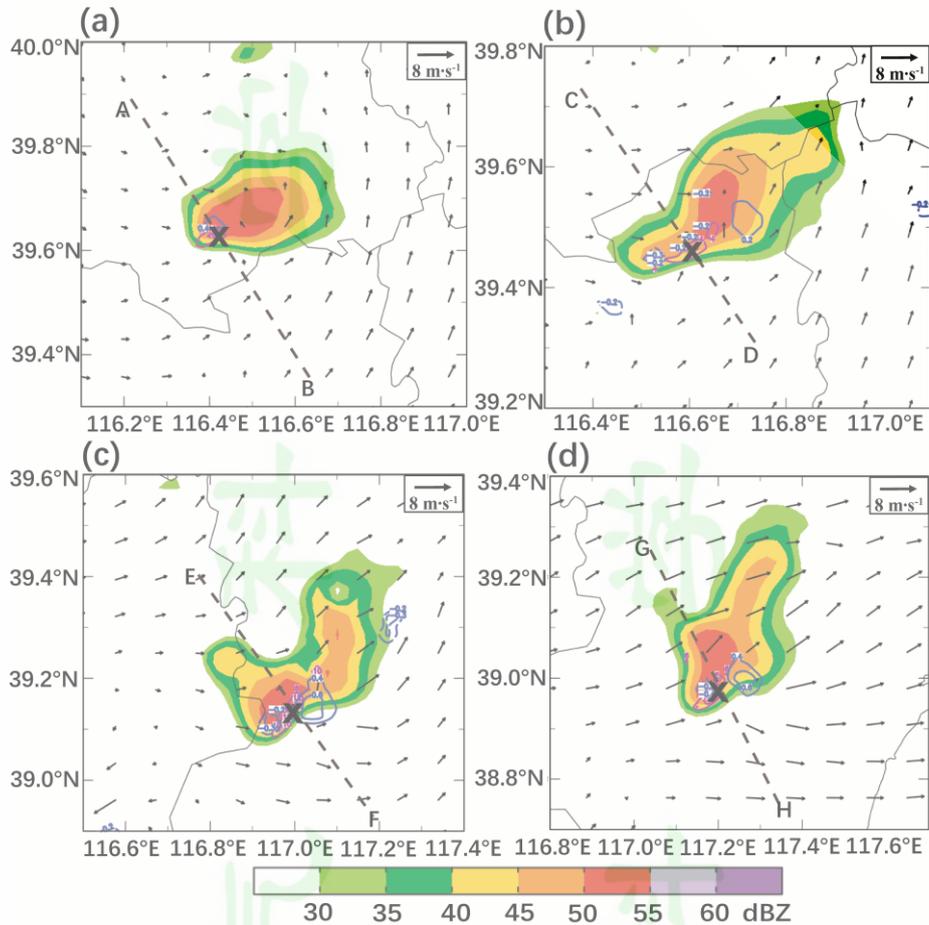


图7 2020年6月25日21:30 (a)、22:00 (b)、22:54 (c)、23:18 (d) VDRAS 反演的1 km 高度反射率因子(色阶, 单位: dBZ)和相对风暴水平风场(箭矢, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )以及100 m 高度的垂直涡度(紫色实线, 单位:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )和垂直速度(蓝色实线和虚线分别表示上升和下沉速度, 单位:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) (“x”代表MV, 黑色虚线表示图8剖面位置)

Fig.7 VDRAS (Variational Doppler Radar Analysis System) simulated reflectivity (shaded, unit: dBZ) and storm-relative wind (vectors, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) at 1 km height, vertical vorticity (purple contours, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) and vertical velocity (blue solid and dashed lines represent updraft and downdraft, respectively, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) at 100 m height at 2130 BT (a), 2200 BT (b), 2254 BT (c) and 2318 BT (d) 25 Jun 2020 (“x”denote MV. The black dashed lines indicate the location of vertical cross section in Fig.8)

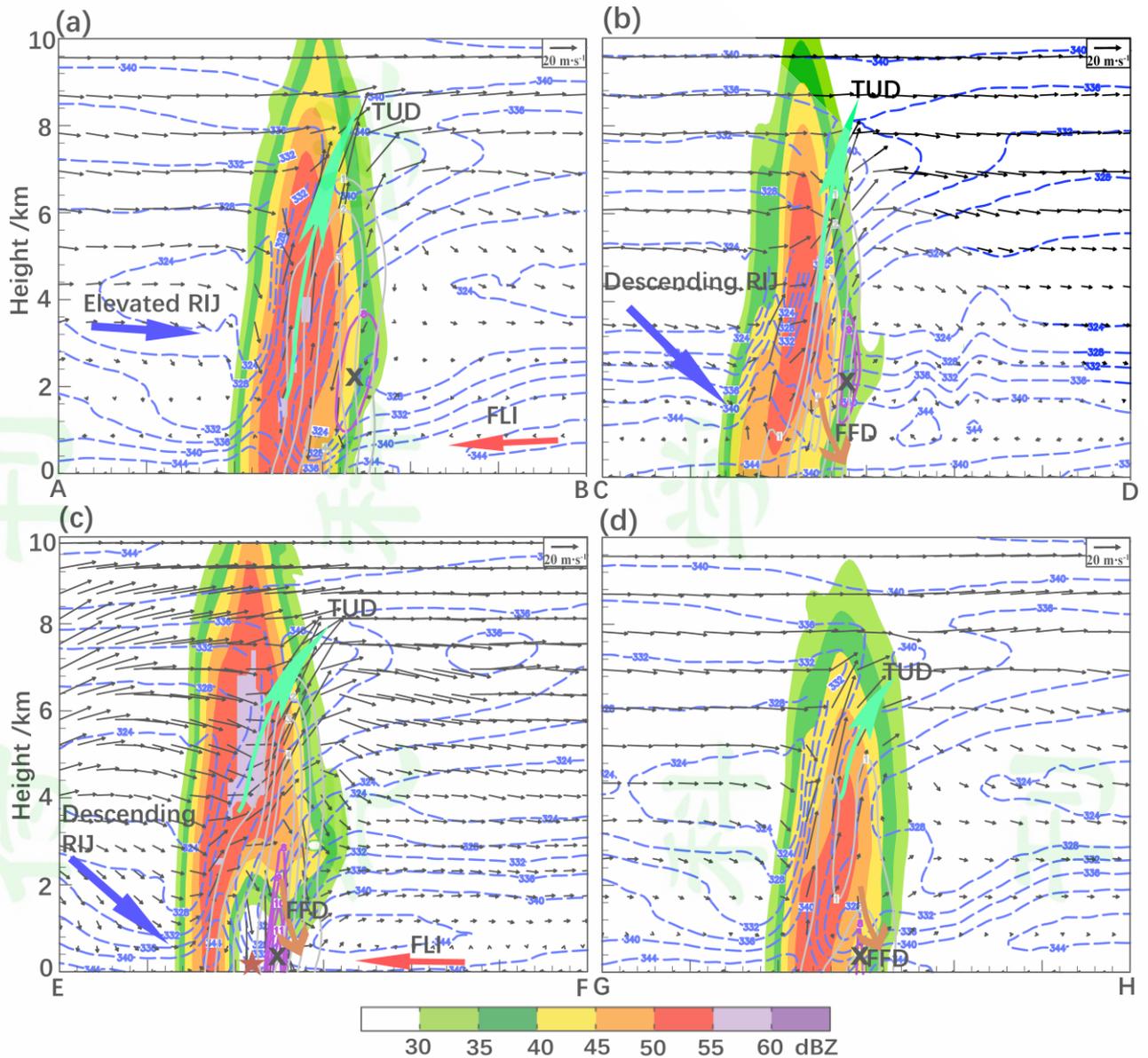


图8 2020年6月25日VDRAS反演的雷达反射率(填色,单位:dBZ)、垂直涡度(紫色实线,单位: $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )、雨水混合比(灰色实线,单位: $\text{g kg}^{-1}$ )、相对风暴风场(箭头,垂直速度\*10,单位: $\text{m s}^{-1}$ )和假相当位温(蓝虚线,单位:K,间隔4K) (“×”表示MV,蓝色、红色、绿色和橙色箭头分别表示后侧入流急流RIJ、前侧低层入流FLI、斜升气流TUD和前侧下沉气流FFD,“★”表示地面极端大风位置) (a) 21:30 (b) 22:00 (c) 22:54 (d) 23:18

Fig.8 Vertical cross sections of simulated radar reflectivity(shaded,unit:dBZ), vertical vorticity (purple contours, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), rainwater mixing ratio (gray contours, unit:  $\text{g kg}^{-1}$ ), storm-relative wind (vertical motion amplified by a factor of 10), equivalent potential temperature ( $\theta_{se}$ , blue dashed at 4 K intervals,unit:K) at (a) 21:30 (b) 22:00 (c) 22:54 (d) 23:18 25 June 2020 (“×”denote MV, blue, red, green and orange arrows represent RIJ,FLI,TUD and FFD, respectively. “★”denote surface extreme wind.)

以上分析表明, MV 的发展演变与对流风暴内不同性质的气流结构密切相关。形成阶段, 对流风暴后部风速梯度逐渐增强, RIJ 高悬于对流层中层。发展阶段, 随着 RIJ 高梯度 V 分量风速的增强, MV 的风场气旋性曲率逐渐增大, 斜升气流增强, 导致假相当位温梯度加大, 产生中尺度锋面。其后, RIJ 进一步增强并向下侵入至对流层低层。MV 成熟后形成一个较强的垂直环流圈, 并向下

伸展至近地面。在 MV 与其后侧的 RIJ 之间，风速  $V$  分量逐渐加大，气旋性曲率增大，RIJ 与 MV 逐渐接近，雨水混合比大值区位于 MV 中心区。消亡阶段，气旋性环流逐渐消失，正涡度减弱。从 MV 形成-发展-成熟-消亡的过程可以看出，MV 发展加强下传及地过程中，雨水在下降过程中蒸发吸热，RIJ 的强度明显加强且不断向下伸展。此外，MV 的发展演变必然随着垂直涡度的增长才能实现。

## 6 MV 发展维持机制探讨

### 6.1 MV 发展维持机制及其对极端大风的影响

前文分析表明，MV 的发展演变与对流风暴内不同性质的气流密切相关，MV 在对流层低层 2~3 km 形成，随后其上升运动区向上伸展，近地层出现下沉运动。发展阶段，上升和下沉气流不断加强，垂直风切变产生的水平涡度因垂直拉伸而加强，MV 发展加强。成熟阶段，MV 通过非线性动力作用造成负的气压扰动，进而有助于近地面形成向下的气压梯度力 (Trapp and Weisman, 2003; Atkins and Laurent, 2009b)。进一步计算 MV 中心区域 (图 7a-d 中“x”所在区域) 的垂直速度、雨水混合比和扰动温度的高度-时间演变可知 (图 9)，成熟阶段，强的下沉气流与雨水混合比有较好的对应关系，下沉速度的大值区对应高的雨水混合比 (图 9a)，通过雨水的拖曳作用使下沉气流得到加强。同时，与最大下沉速度区相配合的近地层负扰动温度达到最大值 (图 9b)，说明雨水在下降过程中不断蒸发吸热加强近地面冷池效应，配合 RIJ 的下传，这也是成熟阶段地面极端大风形成的重要原因之一。

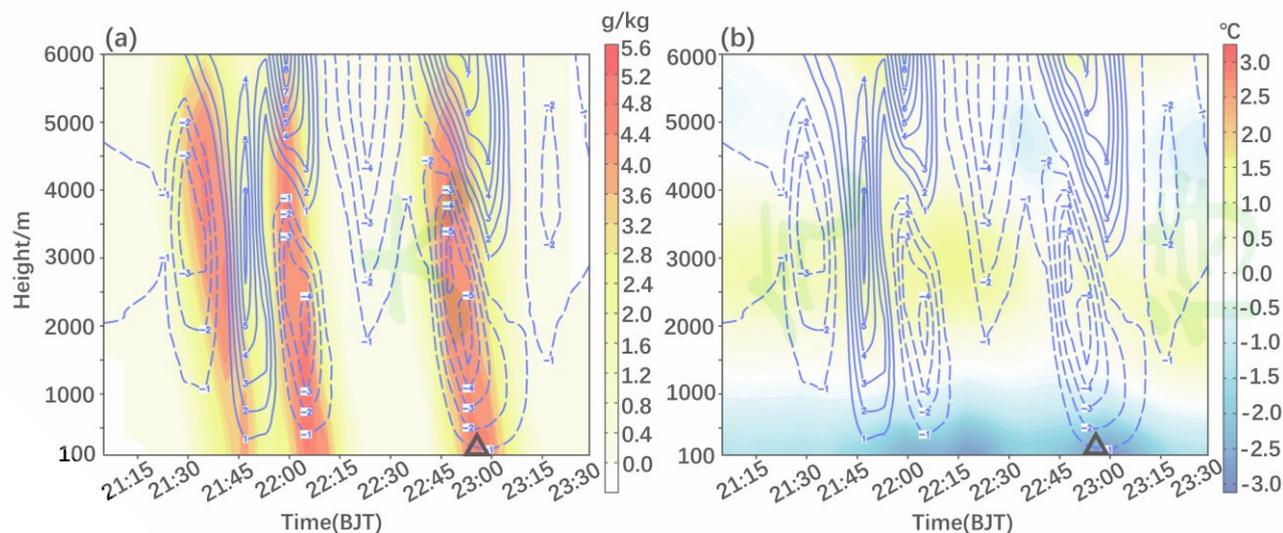


图9 2020年6月25日21时06分-23时30分MV区域的平均雨水混合比(填色,单位:  $\text{g kg}^{-1}$ )、垂直速度(蓝实线表示上升运动,虚线表示下沉运动,单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) (a)和扰动温度(填色,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、垂直速度的高度-时间剖面图(b) (“ $\Delta$ ”表示地面极端大风出现时刻)

Fig.9 Time series of averaged rainwater mixing ratio (shaded, unit:  $\text{g kg}^{-1}$ ), vertical velocity (blue solid and dotted line represent ascending and sinking, respectively, unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) (a) and perturbation temperature (shaded, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) over MV region from 21:06 to 23:30 BJT 25 June 2020 (“ $\Delta$ ” denote surface wind)

研究表明中低层适宜或强的垂直风切变有利于强、深且长生命史 MV 的形成 (Schenkman and Xue, 2016), 另一方面, 科里奥利力和强冷池有利于强 MV 的产生 (AL09a)。根据 RKW 理论 (Rotunno et al., 1988; Weisman and Rotunno, 2004), 冷池与垂直风切变的平衡关系可以通过冷池传播速度  $C$  和垂直于对流风暴的切变  $\Delta U$  的比值 (即  $C/\Delta U$ ) 表示 (陈明轩和王迎春, 2012)。根据 Benjamin (1968) 的工作, 冷池传播速度  $C$  实际上可以看作是一个在无限深、不分层环境中的二维密度流的移动速度

$$C^2 = 2 \int_0^H (-B) dz \quad (2)$$

式中,  $H$  是冷池深度,  $B$  是浮力项, 并且

$$B \equiv g \left[ \frac{\theta - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} + 0.6I(q_v - \bar{q}_v) - q_c - q_r \right] \quad (3)$$

式中,  $g$  是重力加速度,  $\theta$  是位温,  $\bar{\theta}$  是平均位温,  $\theta - \bar{\theta}$  是扰动位温;  $q_v$ 、 $q_c$  和  $q_r$  分别表示 VDRAS 模拟的水汽混合比、云水混合比和雨水混合比,  $\bar{q}_v$  是平均水汽混合比。因为在冷池上部, 浮力项  $B$  逐渐接近于零, 并且随高度变化很小, 所以冷池深度只需选取最具有代表性的高度即可 (陈明轩和王迎春, 2012)。这里参量 Schlemmer and Hohenegger (2014) 的工作, 选取从冷池前沿向后的 100 km 范围内扰动位温低于 -2 K 的平均高度作为冷池的深度, 计算每个时次与冷池相关的浮力项  $B$  的平均值, 进而得到平均冷池传播速度  $C$ 。

根据此前研究所述 (Rotunno et al., 1988; Weisman and Rotunno, 2004), 只有垂直于对流风暴的风切变分量才对风暴的发展维持起作用。所以在此分别计算风暴前部垂直于 35 dBZ 以上主回波的 0~1 km 近地层 (即 100~1100 m,  $\Delta U_1$ )、0~3 km 低层 (即 100~3100 m,  $\Delta U_3$ ) 和 0~6 km 深层 (即 100~6100 m,  $\Delta U_6$ ) 垂直风切变分量。为避免风暴出流对计算的影响, 风切变的计算取主回波前 10-100 km 的平均值 (陈明轩和王迎春, 2012)。由图 10 可以看出, MV 形成阶段, 低层和深层垂直风切变强于冷池, 从而导致对流风暴出现前倾趋势 (Rotunno et al, 1988)。发展阶段, 近地面冷池与低层风切变不断加强, 两者逐渐达到平衡状态, 非常有利于对流风暴发展加强。MV 从形成到发展阶段, 风暴前方低层环境垂直风切变逐渐加强, 为对流风暴中旋转上升气流和 MV 的形成创造了重要条件。成熟阶段, 0~1 km 垂直风切变逐渐加强, 同时随着冷池进一步加强, 冷池传播速度超过垂直风切变强度, 对流风暴具有向后倾斜的结构。22:48 冷池传播速度达到峰值 ( $31.7 \text{ m s}^{-1}$ )。此时, 下沉速度、扰动温度相比前一阶段有显著增加 (图 9b), 这对地面极端大风的产生起到了增强作用。MV 消亡阶段, 冷池出流与环境风场之间的辐合减弱, 不利于对流风暴的继续发展, 对流风暴逐渐减弱。通过上述分析可知, 较强的低层垂直风切变有利于强的水平涡度扭转为垂直涡度

(Weisman and Trapp, 2003), 为本次事件中 MV 的发展加强提供了有利的环境动力条件。

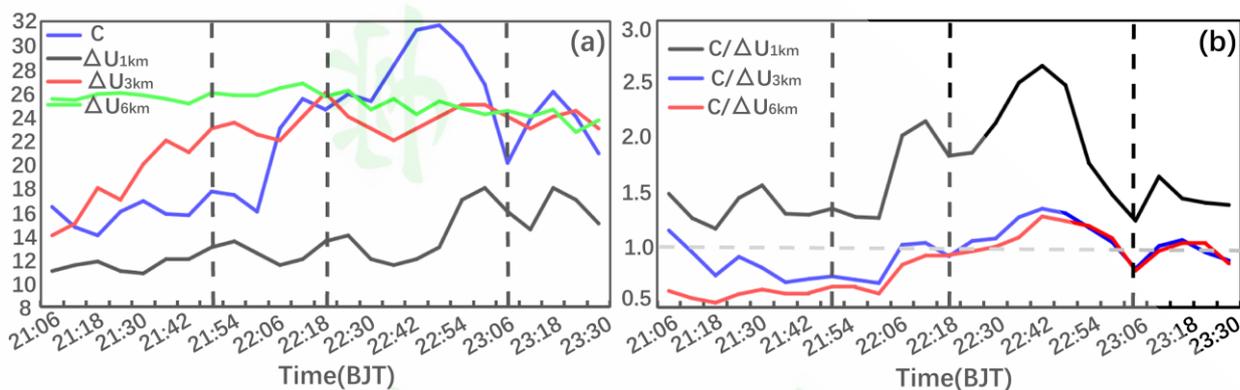


图 10 基于 VDRAS 资料计算的 2020 年 6 月 25 日 21 时 06 分-23 时 30 分(a)冷池传播速度  $C$  (蓝实线, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )、垂直于弓形回波的 0-1 km ( $\Delta U_{1\text{km}}$ , 黑实线, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )、0-3 km ( $\Delta U_3$ , 红实线, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 和 0-6 km ( $\Delta U_6$ , 绿实线, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 风切变分量的时间演变 (b)  $C$  与  $\Delta U_{1\text{km}}$  (黑实线)、 $\Delta U_3$  (蓝实线) 和  $C$  与  $\Delta U_6$  (红实线) 的比值

Fig.10 Time series of the speed of cold pool ( $\text{m s}^{-1}$ ; blue solid), components of the 0-1 km ( $\Delta U_{1\text{km}}$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ; black solid), 0-3 km ( $\Delta U_3$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ; red solid) and 0-6 km ( $\Delta U_6$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ; green solid) shear perpendicular of the bow echo (a)  $C/\Delta U_{1\text{km}}$  (black solid),  $C/\Delta U_3$  (blue solid) and  $C/\Delta U_6$  (red solid) (b)

## 6.2 MV 不同发展阶段概念模型

综合上述分析, 图 11 给出了本次极端大风事件中 MV 不同发展阶段的概念模型。在形成阶段, 对流风暴伸展至 8 km 高度, 斜升气流贯穿整个对流风暴, 雨水主要分布在 6 km 以下的斜升气流区, MV 形成于 1~3 km 高度, 对应近地面暖干的  $\gamma$  中尺度涡旋。发展阶段, 随着对流风暴演变为弓形回波, 2 km 以下开始出现下沉气流, RIJ 逐渐下传, 在前侧下沉气流、斜升气流与后侧入流急流的共同作用下, 将环境水平涡度扭转为垂直涡度, 雨水大值区主要分布在 MV 所在区域。成熟阶段, 对流风暴延伸至 10 km 高度, 下沉速度较上一阶段显著增强, RIJ 下传至 1 km 高度, MV 位于风暴前侧下沉气流区, 雨水混合比大值区较上一阶段增加, 且与 MV 中心重合。雨水分布的质心降低, 在下降过程中蒸发吸热, 近地面冷池不断增强导致地面风速加强, 因而近地面转变为冷湿的气旋性涡旋, 配合后侧入流急流和前侧下沉气流动力效应, 故而在 MV 西侧出现 13 级极端大风。消散阶段, 风暴内上升和下沉气流明显减弱, MV 的垂直涡度、辐合强度和伸展高度均较上一阶段显著减弱, 对应近地面为准线状中尺度辐合线。

本文给出的概念模型与 Xu et al. (2024) 提出的弓形回波 MV 概念模型相似, 极端大风均出现在弓形回波变形阶段, 且 MV 均形成于 2 km 高度附近, 随后向下发展加强并与 RIJ 共同造成地面大风。不同的是, Xu et al. (2024) 的模型中 RIJ 下传至地面, 与 MV 叠加造成地面大风。本文提出的概念模型 RIJ 并未及地, MV 通过非线性动力作用产生负的气压扰动, 进而在近地面形成向下的气压梯度力, 此外, 雨水下降过程中不断蒸发吸热加强近地面冷池效应, 共同造成地面极端大风。

本文提出的概念模型增加了 MV 不同发展阶段的热动力结构演变特征及其地面大风发生的位置，进一步丰富了 MV 的精细结构特征及其与雷暴大风强度和位置的对应关系。

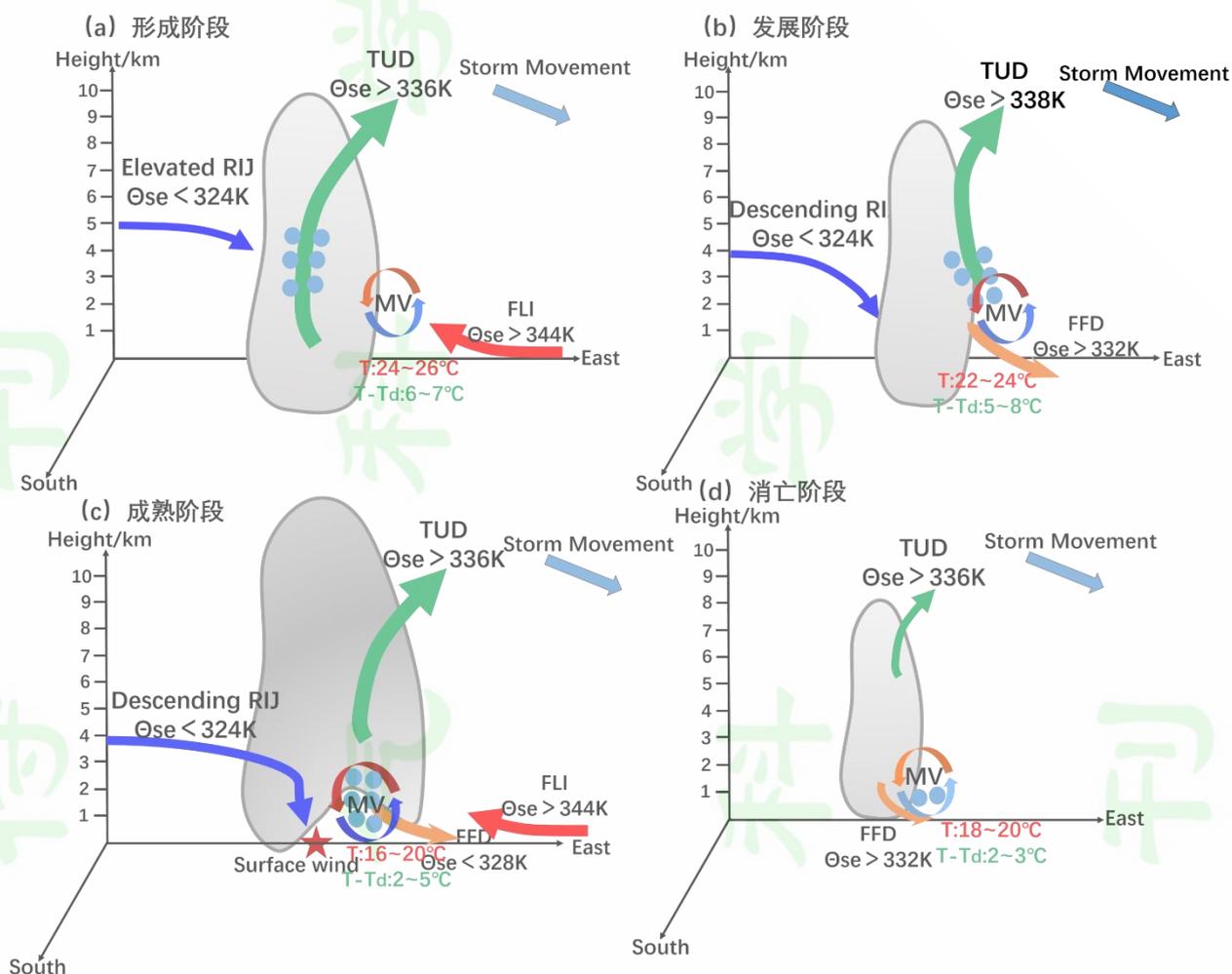


图 11 2020 年 6 月 25 日华北平原极端大风事件中 MV 不同发展阶段的热动力结构概念模型  
Fig.11 Conceptual model demonstrating the thermodynamic structures of MV during different stages.

## 7 结论与讨论

本文针对 2020 年 6 月 25 日发生在华北平原极端大风事件，利用多源观测资料，通过雷达资料四维变分同化技术，分析了本次事件中伴随的  $\gamma$  中尺度涡旋 (MV) 不同发展阶段的热动力结构特征，并研究了 MV 的发展维持机制，最后给出了 MV 不同发展阶段的概念模型。主要结论如下：

本次极端大风事件，华北平原位于 500 冷涡前侧干冷气流和 850 hPa 暖湿气流辐合区中，探空温湿曲线呈“X”型分布，对流层中层的干层有利于风暴云内降水粒子的蒸发冷却效应和下沉气流增强，为极端大风的发生提供了有利的对流环境。

观测分析表明此次极端大风事件中 MV 经历了形成、发展、成熟和消亡四个阶段，MV 初生于对流层低层 2 km 高度附近，在向下拉伸过程中伴随着气旋性涡旋的旋转速度快速增强、涡旋直径

收缩，对应近地面由暖干的气旋性涡旋转变冷湿的气旋性涡旋，极端大风出现在成熟阶段的 MV 西侧与后侧入流急流（RIJ）叠置区。

MV 的发展演变与对流风暴内不同性质的气流密切相关。形成阶段，风暴后部风速梯度逐渐增强，RIJ 高悬于对流层中层。发展阶段，随着对流风暴演变为弓形回波，2 km 以下开始出现下沉气流，RIJ 逐渐下传，在前侧下沉气流、斜升气流与后侧入流急流的共同作用下，水平涡度扭转为垂直涡度，雨水大值区主要分布在 MV 所在区域。成熟阶段，MV 对应回波空洞特征，其形成的垂直环流圈向下伸展近地面。RIJ 进一步增强并向下侵入至 1km，在 MV 与其后侧的 RIJ 之间，风速 V 分量逐渐加大，气旋性曲率增大，RIJ 与 MV 逐渐接近，雨水混合比大值区位于 MV 中心区。减弱阶段，风暴内上升和下沉气流明显减弱，MV 的垂直涡度、辐合强度和伸展高度均显著减弱。从 MV 形成-发展-成熟-消亡的过程可以看出，下沉速度的大值区分别对应着雨水混合比和扰动温度的大值区，雨水的拖曳作用使下沉气流得到加强，MV 发展加强下传及地过程中，雨水在下降过程中蒸发吸热，RIJ 的强度明显加强且不断向下伸展。

冷池与不同高度垂直风切变的配置对 MV 的发展演变起到重要作用：MV 从形成到发展阶段，冷池与 0-3 km 低层垂直风切变达到平衡态，给发展中的 MV 提供低层暖湿气流，促使风暴前的低层暖湿空气不断被抬升，MV 从发展到成熟阶段，冷池与 0-6 km 深层垂直风切变达到平衡态，在强的深层垂直风切变的拉伸作用下 MV 加强发展，消亡阶段，冷池强度超过垂直风切变，切断暖湿入流，从而导致 MV 逐渐减弱消亡。

本研究工作提供了华北平原地区雷暴大风与 MV 精细结构演变之间物理关联的新认识，量化了极端大风与 MV 的强度、厚度等特征的配置关系，展示了 MV 与极端大风在时空上密切关联的观测证据。与此同时，以往关于典型弓形回波大风的研究，多认为地面大风是 RIJ 及地导致的，与典型弓形回波 MV 造成大风机制不同的是，此次过程中 RIJ 并未及地，而是通过与 MV 的垂直下沉气流在近地层的耦合，造成地面极端大风，这也是极端大风出现在 MV 西侧的原因。后续将通过后向轨迹模型进一步探讨 MV 的来源及运动轨迹。

## 参考文献（References）

- Atkins N T, Bouchard C S, Prybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX [J]. *Mon Wea Rev*, 133(8):2275-2296. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR2973.1>
- Atkins N T, Laurent ST M. 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging potential [J]. *Mon Wea Rev*, 137(5):1497-1513. doi: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2649.1>
- Atkins N T, Laurent ST M. 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis [J]. *Mon Wea Rev*,

137(5):1514-1532. doi: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2650.1>

Benjamin T B, 1968. Gravity currents and related phenomena [J]. *J Fluid Mech*, 31(2): 209-248. doi: [10.1017/S0022112068000133](https://doi.org/10.1017/S0022112068000133)

陈明轩,王迎春,高峰,等.2011.基于雷达资料 4DVAR 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J].*气象学报*,69(1):64-78. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Gao Feng, et al.2011. A low-level thermo dynamical retrieval system based on the radar data 4DVAR and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69(1):64-78. doi: [10.11676/qxxb2011.006](https://doi.org/10.11676/qxxb2011.006)

陈明轩,王迎春.2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J].*气象学报*,70(3):371-386. Chen Mingxuan, Wang Yingchun.2012. Numerical simulation study of interactional effect of low-level vertical wind shear and cold pool on a squall line evolution in North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70(3):371-386. doi: [10.11676/qxxb2012.033](https://doi.org/10.11676/qxxb2012.033)

陈明轩,王迎春,肖现,等.2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析[J]. *大气科学*, 36(5):929-944. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Xiao Xian, et al.2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud and 4-D variational assimilation on radar data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36(5):929-944.doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132)

程晶晶,李青青,陈锦鹏. 2023. 不同强度环境垂直风切变影响下热带气旋外核区冷池特征[J]. *大气科学*, 47(5): 1510-1524. Cheng Jingjing, Li Qingqing, Chen Jinpeng. 2023. Characteristics of cold pools in the outer core of tropical cyclones under different vertical wind shear magnitudes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 47(5): 1510-1524. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21216](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21216)

Davies-Jones R.1984.Streamwise vorticity: the origin of updraft rotation in supercell storms [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41(20):2991-3006. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2991:SVTOOU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2991:SVTOOU>2.0.CO;2)

Droegemeier K K, Lazarus S M, Davies-Jones R P. 1993. The influence of helicity on numerically simulated convective storms [J]. *Mon Wea Rev*, 121(7):2005-2029. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2005:TIOHON>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2005:TIOHON>2.0.CO;2)

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 Jianhua, Wang Guorong, Gong Jian, 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 (in Chinese)*, 37(5/6):693-709. doi: [10.16032/j.issn.1004-4965.2021.065](https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2021.065)
- 马淑萍,王秀明,俞小鼎.2019.极端雷暴大风的环境参量特征[J]. *应用气象学报*, 30(3):292-301. Ma Shuping, Wang Xiuming, Yu Xiaoding. 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 30(3): 292-301. doi: [10.11898/1001-7313.20190304](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20190304)
- Grim J A, Rauber R M, McFarquhar G M, et al. 2009. Development and forcing of the rear inflow jet in a rapidly developing and decaying squall line during BAMEX [J]. *Mon Wea Rev*, 137(4):1206-1229. doi: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2503.1>
- 郭英莲, 孙继松. 2019. 湖北三类组织形态强对流系统造成的地面强对流大风特征[J]. *大气科学*, 43(3): 483-497. Guo Yinglian, Sun Jisong. 2019. Characteristics of Strong Convective Wind Events Caused by Three Types of Convective Systems in Hubei Province. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(3): 483-497. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18206](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18206)
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146(730):1999-2049. doi:[10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803)
- Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: widespread convectively induced windstorms [J]. *Wea Forecasting*, 2(1): 32-49. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002,0032:DWCIW.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW.2.0.CO;2).
- Lafore J P, Moncrieff M W. 1989. A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46(4):521-544. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<0521:ANIOTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<0521:ANIOTO>2.0.CO;2)
- 雷蕾,孙继松,陈明轩,等.2021.北京地区一次飚线的组织化过程及热动力结构特征[J]. *大气科学*, 45(2): 287-299. Lei Lei, Sun Jisong, Chen Mingxuan, et al. 2021. Organization Process and Thermal Dynamic Structure of a Squall Line in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(2): 287-299. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19198](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19198)
- 李佳,陈葆德,张旭,等.2017. 2016年6月23日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析[J]. *大气科学*, 41(6): 1221-1233. Li Jia, Chen Baode, Zhang Xu, et al. 2017: High-Resolution Rapid Refresh Analysis and Prediction of the Tornado Occurring in Funing on 23 June 2016. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(6): 1221-1233. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17144](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17144)
- Liu 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, e2022JD037954. doi:

<https://doi.org/10.1029/2022JD037954>

Luo L P, Xue M, Xu X, et al. 2024. Understanding simulated causes of damaging surface winds in a derecho-producing mesoscale convective system near the East China Coast based on convection-permitting simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 41(11):2112-2130. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3314-8>

Matthew C B, Geoffrey R M, Michael C C. 2024. Influence of low-level shear orientation and magnitude on the evolution and rotation of idealized squall lines. Part I: storm morphology and bulk updraft/mesovortex attributes [J]. *Mon Wea Rev.*, 152(9):2089-2110. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0262.1>

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]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(4):1182-1207. doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0121.1>

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. doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0385.1>

Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56,527-530. doi: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-56.5.527>

彭霞云, 章丽娜, 刘汉华, 等. 2022. 冷涡底部对流引起的杭州湾极端大风形成机制分析 [J]. *气象*, 48(6): 719-728. Peng X Y, Zhang L N, Liu H H, et al. 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou Bay caused by convection at the bottom of cold vortex [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 48(6): 719-728. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2022.051601](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2022.051601)

Roberts R D, Wilson J W. 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 28(4):285-303. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1989\)028<0285:APMNP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1989)028<0285:APMNP>2.0.CO;2)

Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines [J]. *J Atmos Sci.*, 45(3):463-485. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2)

Schenkman A, Xue M. 2016. Bow-echo mesovortices: A review [J]. *Atmos Res*, 70:1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.003>

Schlemmer L, Hohenegger C. 2014. The formation of wider and deeper clouds as a result of cold-pool dynamics [J]. *J Atmos Sci.*, 71(8):2842-2858. doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0170.1>

- Sun J Z, Crook N A.1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments [J]. *J Atmos Sci.*, 54(12):1642-1661. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2)
- Sun J Z, Crook N A.1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm [J]. *J Atmos Sci.*, 55(5): 835-852. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055<0835:DAMRFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<0835:DAMRFD>2.0.CO;2)
- Sun J Z, Crook N A.2001.Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data [J]. *Wea Forecasting*, 16(1):117-132. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0117:RTLLWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0117:RTLLWA>2.0.CO;2)
- Tang Y, Xu X, Xue M, et al. 2020. Characteristics of low-level meso- $\gamma$ -scale vortices in the warm season over East China [J]. *Atmos Res*, 235,104768. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104768>
- 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. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2804:LMWSLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2804:LMWSLA>2.0.CO;2)
- 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 Tingting, Zhu Wenjian, Yaokai, et al. 2023. Mesoscale Analysis of an Extreme Thunderstorm Gale in Central Jilin Province in 2021 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 49(10):1215-1226. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2023.083102](https://doi.org/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 Xiuming, Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, et al. 2012. Study on the formation and evolution of “6·3” damage wind [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(2):504-514. doi: [gyqx.ac.cn/CN/Y2012/V31/I2/504](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2012.083102)
- 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 Xiuming, Zhou Xiaogang, Yu Xiaoding. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71(5):839-852. doi: [10.11676/qxxb2013.073](https://doi.org/10.11676/qxxb2013.073)
- Weisman M L. 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50(4):645-670. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<0645:TGOSLL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<0645:TGOSLL>2.0.CO;2)
- Weisman M L, Rotunno R. 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell

- dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57(9):1452-1472. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<1452:TUOVWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<1452:TUOVWS>2.0.CO;2)
- Weisman M L, Rotunno R. 2004. A theory for strong long-lived squall lines revisited [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61(4):361-382. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0361:ATFSLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0361:ATFSLS>2.0.CO;2)
- 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. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2779:LMWSLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2779:LMWSLA>2.0.CO;2)
- Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T. 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX [J]. *Mon Wea Rev*, 134(3):791-806. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR3100.1>
- 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 Haiying, Sun Jisong, Mu Ruiqi, et al. 2023. Analysis of extreme convective gust event caused by two different typical storms during a strong convection process [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 81(2):205-217. doi:[10.11676/qxxb2023.20220050](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220050)
- 肖现,陈明轩,高峰,等.2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].*大气科学*,39(1):100-124. Xiao Xian, Chen Mingxuan, Gao Feng, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(1):100-124. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13318](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13318)
- Xiao X, Sun J Z, Chen M X, et al.2019. Comparison of environmental and mesoscale characteristics of two types of mountain-to-plain precipitation systems in the Beijing region, China [J].*J. Geophys. Res.: Atmos.*, 124(13):6856-6872. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JD029896>
- Xiao X, Sun J Z, Ji L, et al.2022. A study on local-scale thermal and dynamical mechanisms in the initiation of a squall line under weak forcing [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 127(5), e2021JD035561. doi: <https://doi.org/10.1029/2021JD035561>
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓,等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. *气象*, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 40(4): 400-411. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002)
- Xu X, Ju Y Y, Liu Q Q, et al. 2024. 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. doi:

<https://doi.org/10.1175/JAS-D-23-0047.1>

Xu X, Xue M, Wang Y.2015a. 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. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00234.1>

Xu X, Xue M, Wang Y.2015b. The genesis of mesovortices with a real-data simulation of a bow echo system [J]. *J. Atmos. Sci.*, 72(5):1963-1986. doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0209.1>

Xu C Y, Xiao X. 2024. Comparison of Thermodynamic Structure and Cold Pool of Two Types Gust Fronts over Bohai Sea Bay in China [J]. *Atmosphere*, 15(3):247. doi: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/3/247>

许长义,卜清军,黄安宁.2022.环渤海湾连续两条阵风锋的关联与成因分析[J]. *气象*, 48(6):729-745. Xu Changyi, Bu Qingjun, Huang Anning. 2022. Analyses on correlation and causes for the consecutive thunderstorm gust fronts over the Bohai Sea Bay [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 48(6):729-745. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040202](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040202)

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):1-18. Xu Changyi, Zhang Lina, Xiao Xian, et al. 2023. Analysis of a damaging wind case caused by bow echo in the environment of cold vortex over North China plane [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 81(1):1-18. doi: [10.11676/qxxb2023.20220024](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220024)

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 $\gamma$ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J]. *气象学报*. 81(1):19-39. Yang Lei, Zheng Yongguang, Yuan Zipeng, et al. 2023. The low-level meso- $\gamma$ -scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: Formation, merging, and rain-producing mechanisms [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 81(1):19-29. doi: [10.11676/qxxb2023.20220023](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220023)

郑永光,田付友,孟智勇,等.2016. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析 [J].*气象*,42(1):1-13. Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Meng Zhiyong, et al. 2016. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing” [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(1):1-13. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.001](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.001)