暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

逗点状MCS中的γ中尺度涡旋形成机制及结构特征

徐姝 王艳春 王莹 庄园煌 易笑园 张文龙

Formation mechanism and structural characteristics analysis of meso-γ-scale vortex in comma-shaped MCS

XU Shu，WANG Yanchun，WANG Ying，ZHUANG Yuanhuang，YI Xiaoyuan，ZHANG Wenlong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-103

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

变性台风“美莎克”结构演变特征及暴雨成因分析

Structural evolution characteristics and cause analysis of heavy rain of transition typhoon "Maysak"

暴雨灾害. 2023, 42(5): 521-531 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-050

两个相似路径台风深入内陆所致暴雨对比分析

Comparative analysis of rainstorms caused by two typhoons with similar path deep inland

暴雨灾害. 2021, 40(5): 484-493 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.005

东北冷涡背景下中尺度低涡的演变成因及其对MCS的影响分析

Analysis of the evolution reason of the mesoscale vortex and its influence on MCS under the background of the northeast cold vortex

暴雨灾害. 2021, 40(5): 474-483 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.004

四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析

Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin

暴雨灾害. 2024, 43(6): 627-636 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-239

陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制

Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi

暴雨灾害. 2025, 44(1): 19-30 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-224

2017年7月25日陕北局地特大暴雨过程的β中尺度特征分析

Analysis of a continuous heavy rain event in Shaanxi produced by a low vortex

暴雨灾害. 2021, 40(4): 374-382 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

徐姝,王艳春,王莹,等.2025.逗点状 MCS 中的 γ 中尺度涡旋形成机制及结构特征[J].暴雨灾害,44(5):642−652. XU Shu, WANG Yanchun, WANG Ying, et al. 2025. Formation mechanism and structural characteristics analysis of meso-γ-scale vortex in comma-shaped MCS [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):642−652 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−103

逗点状 MCS 中的 γ 中尺度涡旋形成机制及结构特征

徐姝[1], 王艳春[1], 王莹[1], 庄园煌[1], 易笑园[1], 张文龙[2]
(1. 天津市气象台, 天津 300074; 2. 北京城市气象研究院, 北京 100089)

摘　要: 利用自动站观测资料、多普勒天气雷达资料以及 ERA5 再分析等资料, 对 2022 年 7 月 5 日夜间发生在渤海西岸的一次大暴雨过程进行观测和数值预报结果分析, 初步探讨了逗点状中尺度对流系统 (MCS) 中的 γ 中尺度涡旋形成机制及其结构特征。结果表明: 暴雨过程发生在高空低槽东移和台风“暹芭”减弱后低压倒槽北抬的天气背景下, 由逗点状中尺度对流系统头部的低质心涡旋回波有组织性地持续影响渤海西岸造成。γ 中尺度涡旋最初发生在低压倒槽顶部, 是由前期降水形成的西北气流和暖湿东南气流相遇后的锋生作用所致, 其随后在 925 hPa、850 hPa 依次出现, 降水主要出现在涡旋的右侧。涡度方程的收支诊断表明, 涡旋主要由低层水平辐合辐散项提供初始扰动, 后通过垂直涡度依次向上输送, 最终在对流层下半部形成深厚的中尺度涡旋。涡旋在 700—850 hPa 附近存在暖心结构, 925 hPa 以下弱冷空气的渗透为对流雨带的发展提供了热力不稳定和动力强迫作用; 涡旋呈现不对称结构特征, 其东侧上升速度大于西侧, 使得东侧降水明显强于西侧。涡旋的水汽输送也呈明显的不对称结构, 水汽辐合主要集中在涡旋东侧即渤海西岸, 这也是涡旋东侧降水偏强的原因。

关键词: γ 中尺度涡旋; 锋生; 不对称结构; 暖心; 涡度收支
中图法分类号: P445　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−103

Formation mechanism and structural characteristics analysis of meso-γ-scale vortex in comma-shaped MCS

XU Shu[1], WANG Yanchun[1], WANG Ying[1], ZHUANG Yuanhuang[1], YI Xiaoyuan[1], ZHANG Wenlong[2]

(1. *Tianjin Meteorological Observatory*, *Tianjin* 300074; 2. *Beijing Institute of Urban Meteorology*, *Beijing* 100089)

Abstract: This study analyzes the formation mechanisms and structural characteristics of meso-γ-scale vortices in a comma-shaped mesoscale convective system. Using the data from automatic weather stations, ERA5 reanalysis data, Doppler radars, and other sources, the observational and numerical simulations analyses were conducted on a heavy rainstorm event on the west coast of the Bohai Sea on the night of July 5, 2022. The results show that the heavy rainfall occurred under the synoptic conditions of an eastward-moving upper-level trough and a northward-shifting low-pressure trough following the weakening of Typhoon "Chaba". The event was driven by the continuous influence of the low-centroid vortex echo in the head of the comma-shaped mesoscale convective system on the west coast of the Bohai Sea. The meso-γ-scale vortex formed at the top of the low-pressure inverted trough, where frontogenesis occurred due to the interaction between northwest airflow formed by the early precipitation and warm, humid southeast airflow. The formation of γ-scale mesoscale vortices appeared successively at 925 hPa and 850 hPa, with the precipitation predominantly occurring on the right side of the vortices. The budget diagnostic of the vorticity equation indicated that the vortices were primarily initiated by horizontal convergence-divergence terms at the lower levels. These vortices were then transported upward through vertical vorticity. Ultimately, a deep γ-scale vortex with a closed cyclonic circulation formed in the lower half of the troposphere. The mesoscale vortices exhibited a warm-core structure between 700 hPa and 850 hPa, while the infiltration of weak cold air below 925 hPa provided thermodynamic instability and dynamic forcing for the development of convective rainbands. The vortices displayed an asymmetric structure, with higher ascent rates on the east side, resulting in significantly stronger precipitation on the east side than on the west side. Furthermore, the water vapor transport associated with the vortices exhibited a distinct asymmetric structure, with moisture convergence primarily concentrated on the east side of

收稿日期: 2024−05−23; **定稿日期**: 2024−11−14
资助项目: 国家自然科学基金项目 (41575049, 41475050)
第一作者: 徐姝, 主要从事暴雨中尺度分析及机理研究。E-mail: xushu210@163.com
通信作者: 易笑园, 主要从事天气预报和中尺度灾害天气研究。E-mail: yixy123@sina.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

the vortices, specifically on the west coast of Bohai Bay. This asymmetry was identified as a crucial factor contributing to the stronger precipitation on the east side of the vortices.

Key words: meso-γ-scale vortex; frontogenesis; asymmetric structure; warm core; vorticity budget

引　言

近年来我国灾害性暴雨天气频发, 其中中尺度涡旋 (Mesovortex, MV) 是产生暴雨的重要天气系统之一 (孙建华等, 2023; 陈小华等, 2023; 胡鹏宇等, 2024; 李明娟等, 2025), 其水平尺度在 2~2 000 km 之间 (Fu et al., 2020)。就水平尺度而论, 又可细分为 α 中尺度 (200~2 000 km)、β 中尺度 (20~200 km) 和 γ 中尺度 (<20 km) 系统。

许多极端降水事件与 MV 相伴随 (Hitchens and Brooks, 2013; Nielsen and Schumacher, 2018)。2013—2017 年间美国将近 50% 的极端小时累积降水量与低层中尺度涡旋有关 (Nielsen and Schumacher, 2020)。MV 也是我国暴雨产生的最重要天气系统之一, 2012 年 7 月 21 日北京、2017 年 5 月 7 日广州、2019 年 8 月 16 日沈阳、2021 年 7 月 20 日郑州发生的暴雨事件均与尺度小于 20 km 的 γ-MV 有关 (俞小鼎, 2012; Luo et al., 2016; Yin et al., 2022; Zeng et al., 2022), 因此引起人们对此类天气的广泛关注。很多学者通过研究 MV 的结构特征和形成机制来加深对此类强降水触发机制和维持原因的认识 (翟亮等, 2022; 杨磊等, 2023)。Morales 等 (2013) 基于 ARW(the Advanced Research WRF)模型对科罗拉多州极端降水事件进行模拟, 发现 MV 的加强主要由潜热释放驱动, 其过程类似于中尺度对流涡旋 (Mesoscale Convective Vortices, MCV) 的形成机制, 而非干燥地形流动的动力学过程。Evans 等 (2014)利用两种互补的准拉格朗日方法研究堪萨斯州西南部的一次超级对流事件发现, 气旋的垂直涡度主要由入流气团上升时对流向涡度的倾斜作用所产生, 并因上升运动引起的涡管拉伸效应而增强。此外, 横向涡度在下降过程中发生的倾斜作用, 也对发展中的北部和西部涡旋附近少量气团产生气旋性垂直涡度有所贡献。Xu 等 (2015a, 2015b) 利用 WRF 模式模拟美国中部的弓形回波事件, 表明近地面摩擦作用形成的水平涡度也可能是 MV 形成的重要涡度来源。陈贵川等 (2016) 利用 ARW 模拟四川西南部与重庆西部的大暴雨过程表明, 在中低层垂直风切变偏弱的环境中, 中低层异常高的温湿条件是促进强降水中涡旋形成的重要条件; 杨磊等 (2023) 综合多源观测资料对沈阳出现的一次伴有低空 γ-MV 的强降水天气开展研究, 发现 MV 的形成是由于准线性的冷池出流形成的水平涡度在初期降水造成的下沉气流的扭曲作用下导致, 其厚度小于中气旋。

以上通过观测和模拟方法对 MV 的物理机制和形成过程展开的研究, 多是针对内陆地区复杂地形下的 MV, 而对海陆热力差异明显的沿海地区形成的 MV 研究较少, 使得对沿海地区涡旋的结构以及演变机理的认识仍然不足。2022 年 7 月 6 日渤海西岸出现一次大暴雨过程, 造成渤海西岸大暴雨的逗点状中尺度对流系统与镶嵌在其中的 γ 中尺度涡旋密切相关。睿图模式是北京城市气象研究院研发的快速更新的多尺度分析和预报系统, 可为降水环境的分析提供密集的空间场, 是研究中小尺度系统的有力工具 (王莹等, 2021)。本文利用其短期预报子系统 (RMAPS-ST) 的预报结果结合加密观测资料, 初步分析出现在渤海西岸的 γ 中尺度涡旋的形成机制及其热动力结构特征, 以期为加强此类涡旋系统的认识、提高其产生的强降水天气的预报和预警能力提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文分析所用资料包括: 国家气象信息中心提供的逐 10 min 区域自动站资料, 用于暴雨过程的降水分布特征及地面环境场特征分析; 国家气象信息中心提供的塘沽和沧州多普勒天气雷达逐 6 min 资料, 用于分析涡旋的演变特征; 欧洲中期数值预报中心第五代全球再分析资料 ERA5 (时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25°×0.25°), 用于分析该过程的环流形势和天气系统; 北京城市气象研究院提供的睿图模式资料 (时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 3 km), 用于分析 γ 中尺度涡旋形成机制和结构特征。以上资料时段为 2022年 7 月 5 日 20 时—6 日 08 时 (北京时, 下同)。

1.2 研究方法

在研究大气环流及其演变的基本规律时, 涡旋特征是一个很重要的性质, 涡度方程是用来描述大气涡旋运动与变化规律的。本文利用涡度方程揭示造成大暴雨过程的 γ 中尺度涡旋形成机制。不考虑摩擦和积云对涡度垂直输送效应, p 坐标系中的涡度方程如下

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}=-\left(u\frac{\partial \zeta}{\partial x}+v\frac{\partial \zeta}{\partial y}+v\frac{\partial f}{\partial y}\right)-\omega\frac{\partial \zeta}{\partial p}-(\zeta+f)\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial p}-\frac{\partial \omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}\right) \quad (1)$$

其中，u、v 分别为纬向、径向水平风速 (单位：$m\cdot s^{-1}$)，ω 为垂直速度 (单位：$hPa\cdot s^{-1}$)，ζ 为相对涡度 (单位：s^{-1})，f 为科里奥利参数 (单位：s^{-1})。方程中左边为相对涡度的局地变化项 (用 E 表示)；右边第 1 项为相对涡度水平平流项 (用 A 表示)，它是由于相对涡度的水平分布不均匀所引起的；第 2 项为相对涡度的垂直输送项 (用 B 表示)，它代表非均匀涡度场中，由于垂直运动引起的相对涡度的重新分布所造成的涡度的局地变化；第 3 项为水平辐合辐散项 (用 C 表示)，它表示由于水平辐合 (辐散) 引起垂直涡度的增加 (减小)；第 4 项为扭曲项 (用 D 表示)，它表明当有水平涡度存在时，由于垂直运动的水平分布不均而引起涡度铅直分量的变化。方程右边所有项的累加代表了相对涡度的局地变化。

2 降水实况及雷达回波特征

2022 年 7 月 5 日夜间，2203 号台风“暹芭”进入河南后，其北侧对流雨带位于山东半岛南部，而距离对流雨带 300 km 外的渤海西岸地区突发暴雨，5 日 23:00—6 日 03:00 累计雨量最大为 106.3 mm (图 1a)，最大小时雨强 54.1 mm。雷达回波图中 (图 1b)，在天津至河北东南部出现一条逗点状 MCS，回波的水平尺度大约 300 km，其中涡旋部分由混合型降水回波形成，位于渤海西岸；对流性带状回波从涡旋右侧向西南方向延伸，主要位于冀鲁交界处。回波向东偏北方向移动，且移动速度缓慢。逗点头部的涡旋回波影响渤海西岸近 5 h，造成天津东部及东北部的大暴雨，是本次强降水中心之一。

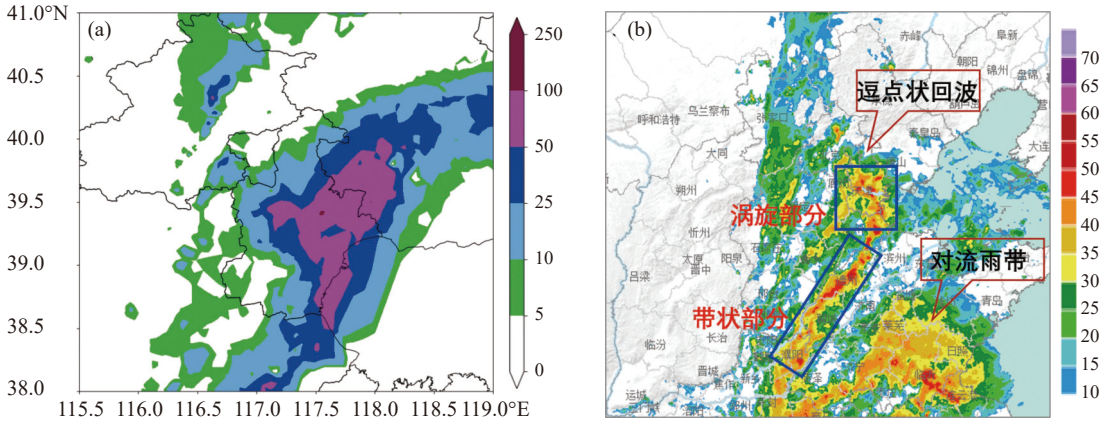


图 1 2022 年 7 月 5 日 23:00—6 日 03:00 累计降水量 (a，单位：mm) 分布以及 6 日 00:00 华北雷达组合反射率因子 (b，单位：dBz)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of cumulative rainfall (unit: mm) from 23:00 BT on July 5 to 03:00 BT on July 6, 2022 and (b) composite reflectivity (unit: dBz) in North China at 00:00 BT on July 6, 2022

3 环流背景

这次暴雨天气过程是在特定的大尺度背景下形成的。利用 ERA5 再分析数据分析 5 日 20:00 500 hPa 高空图 (图 2a)，可见，台风“暹芭”减弱后的低压位于河南和安徽交界处，同时在内蒙到山西一带存在一个东北—西南走向的高空低槽，低槽上有明显的温度密集带，低槽逐渐东移并和低压倒槽相互作用，逗点状回波带处于倒槽北侧的斜压带区。从 850 hPa 高空图 (图 2b) 可见，低压右侧的偏南低空急流携带大量暖湿空气在华北东南部辐合，一方面为暴雨区提供了充分的水汽条件，另一方面使得大气层结向不稳定状态发展。通过乐亭探空资料 (图 2c) 估计暴雨区上空大气层结状况，850 hPa 和 925 hPa 比湿达 16 $g\cdot kg^{-1}$，对流有效位能达到 1 648 $J\cdot kg^{-1}$，且对流抑制位能为 0，有较强的对流潜势。环境垂直风切变较弱。抬升凝结高度和自由对流高度都在 975 hPa 以下，较低的抬升凝结高度和自由对流高度易触发对流。大尺度环境配置为更小尺度低值系统的发生发展提供了有利的热动力环境。

4 地面环境场特征

逗点状对流回波形成前，区域自动站数据显示，5 日 19:00 受前期降水影响 (图 3a)，在北京及河北中部形成冷池，中心正变压达到 3 hPa，降温 8 ℃(图 3b)。21:10 时，由前期降水形成的西北气流与暖湿的渤海东南气流在津冀交界处相遇，形成温湿密集区，密集区东西温差最大达到 6 ℃，温度露点差达到 4 ℃，它们之间形成强烈的温湿对比 (图 3c、e)。5 日 21:10 时，从地面的锋生函数可以看到，两个热力性质不同的气团相遇后锋生作用明显，锋生区呈涡旋状分布，

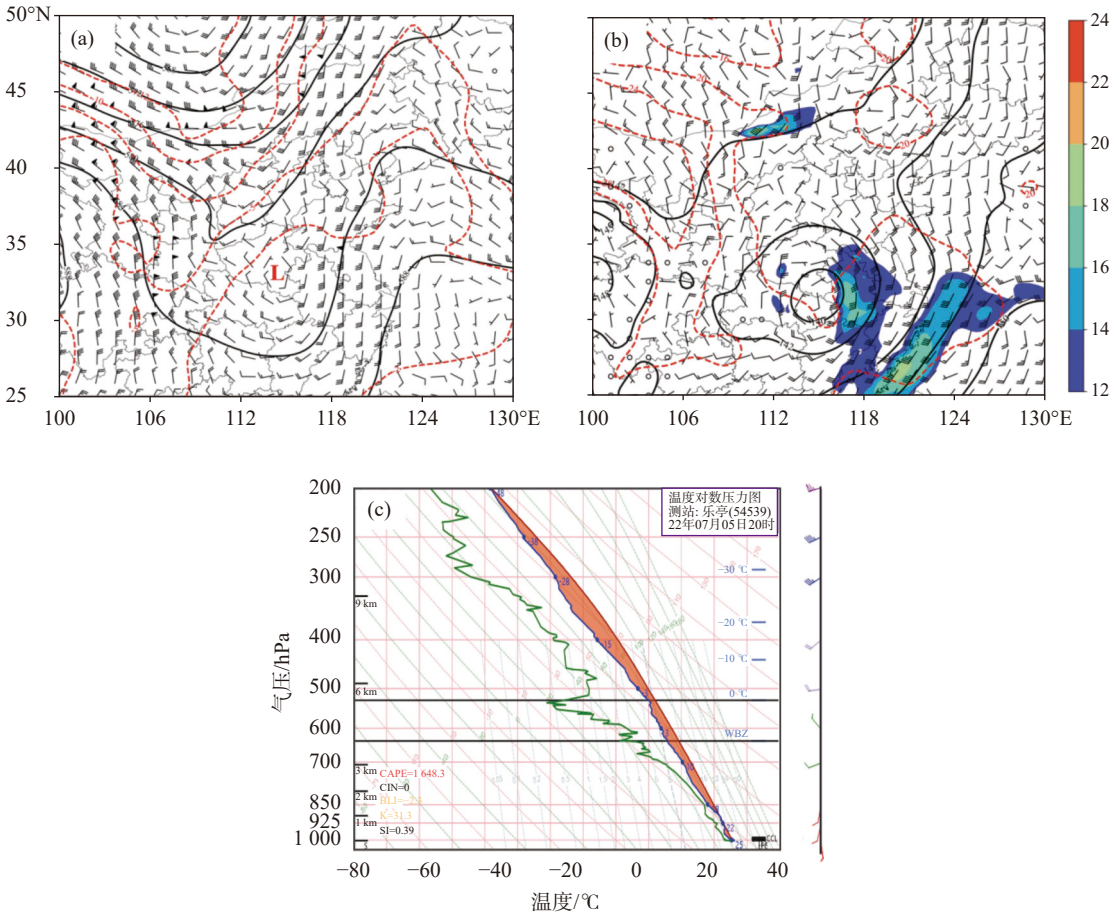


图 2 2022 年 7 月 5 日 20:00 500 hPa (a) 和 850 hPa (b) 的位势高度 (黑色实线, 单位: dagpm)、温度 (红色虚线, 单位: ℃)、风场 (矢量, 单位: m·s^{-1})、850 hPa 低空急流 (填色, 单位: m·s^{-1}) 场以及乐亭探空图 (c) (L 代表低压中心所在位置)

Fig. 2 Geopotential height (black solid lines, unit: dagpm), temperature (red dotted lines, unit: ℃), wind field (vector, unit: m·s^{-1}) and low-altitude jet (shaded, unit: m·s^{-1}) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa and (c) radiosonde map of Laoting station at 20:00 BT on July 5, 2022 (L denotes the position of the low-pressure center)

中心值达到 0.42×10^{-8} K·s^{-1}·m^{-1}, 有利于辐合和上升运动的加强, 风场在锋生大值区出现了气旋性旋转。在涡旋的东侧, 受渤海暖湿气流的影响, 温度和露点温度都在 27 ℃ 左右 (图 3e), 接近饱和, 有利于产生强降水。到 22:20 时, 涡旋两侧的温湿对比差异 (图 3d、f) 及锋生作用较前一时刻均有所减弱, 但地面涡旋环流进一步发展, 涡旋向东北方向移动, 出现显著闭合环流 (图 3f), 气旋性环流水平范围约 18 km, 属于中 γ 尺度, 与逗点头部的涡旋回波中心重合。

5 MCS 演变特征

采用沧州雷达资料分析造成此次暴雨过程的逗点状 MCS 的演变特征, 图 4 为沧州 SA 多普勒天气雷达 7 月 5 日 22:48—6 日 01:54 的组合反射率演变趋势。自 7 月 5 日 22:48 时开始 (图 4a), 降水回波开始自天津南部移入, 以团状混合性降水回波为主要特征, 中间夹杂着超过 50 dBz 的强回波。之后, 降水回波缓慢向东向北移动 (图 4b—h), 影响渤海西岸, 该 MCS 以组织性较高的多单体风暴形式呈现, 逗点头中的强回波呈涡旋回波特征。从穿过图 4f 中强回波中心所作的反射率因子垂直剖面图上 (图 5) 可见, 多个强对流单体排列紧凑, 为典型的低质心结构, 强回波集中在 6 km 附近的 0 ℃ 层以下, 以暖云降水为主, 降水效率高, 回波移动方向与长轴方向一致, 呈现有组织地涡旋状旋转, 形成明显的“列车效应”, 对应渤海西岸地面小时雨量最大达到 54 mm。03:00 后, MCS 继续向东北方向移动, 随着其组织性变差, 回波开始减弱, 其影响范围开始减小。

利用塘沽 SA 多普勒雷达的径向速度场资料分析中尺度涡旋的空间结构, 图 6 为 23:18—01:06 期间 0.5°—2.5°仰角的径向速度场, 23:18 时, 在 0.5° (图 6a$_3$) 仰角上有弱中尺度涡旋生成, 1.5° (图 6a$_2$) 和 2.5° (图 6a$_3$) 仰角上表现为径向速度的辐合场, 23:36 时, 涡旋扩展到 1.5° (图 6b$_2$) 仰角, 2.5° (图 6b$_3$) 仰角仍表现为辐合场, 00:18 时以后, 涡旋往更高仰角扩展至 2.5° (图 6d$_3$)。可以看出, 涡旋首先在底层生成,

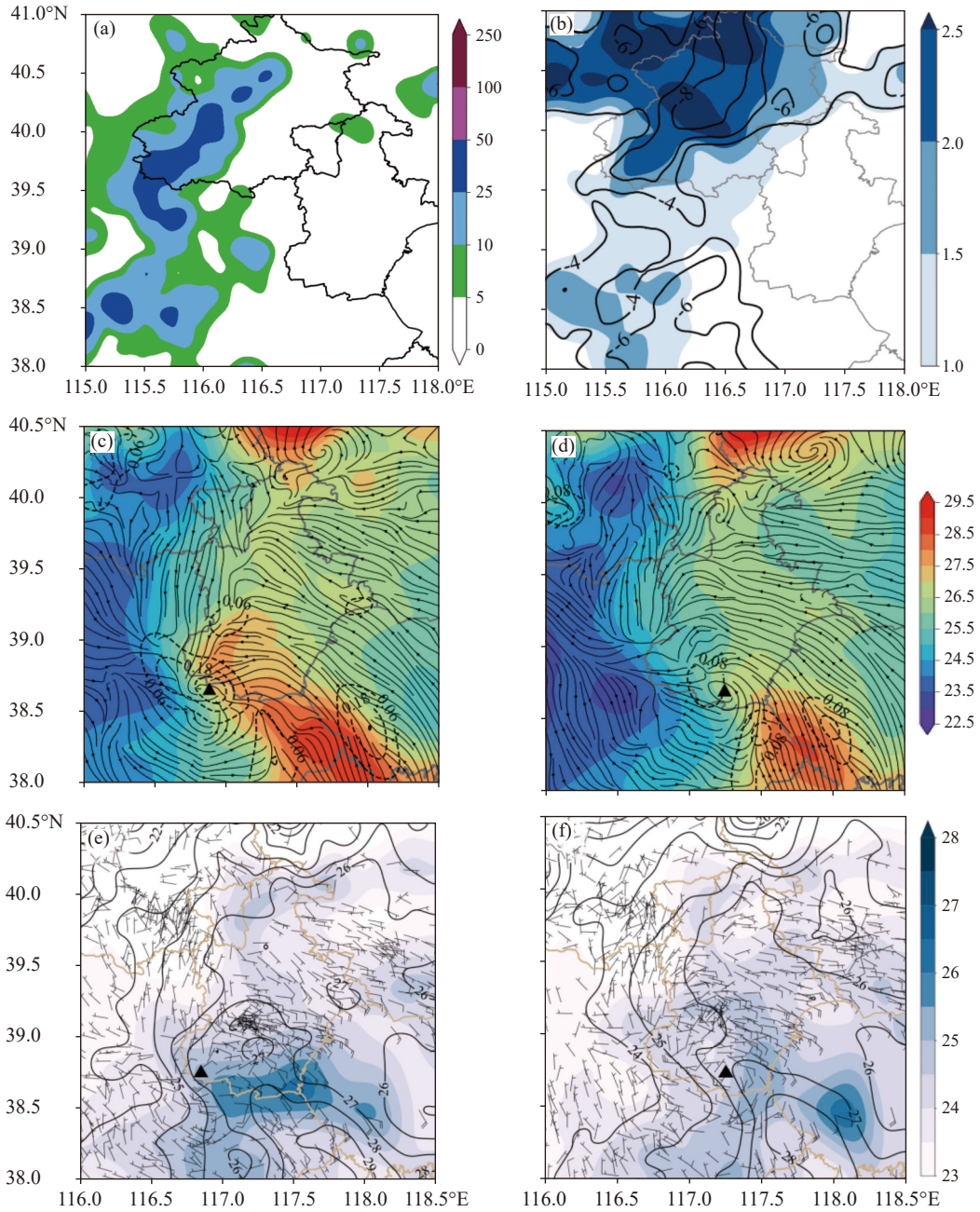


图 3 2022 年 7 月 5 日 19:00 过去 3 h 累计降水量空间分布 (a, 填色, 单位: mm), 19:00 过去 3 h 变压 (填色, 单位: hPa) 和变温 (黑线, 单位: ℃) (b), 7 月 5 日 21:10 (c) 和 22: 20 (d) 的地面温度 (填色, 单位: ℃)、流场和锋生函数 (虚线, 单位: 10^{-8} K·s^{-1}·m^{-1}), 以及 7 月 5 日 21: 10 (e) 和 22: 20 (f) 的地面风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、温度 (实线, 单位: ℃) 和露点温度 (填色, 单位: ℃)(▲代表涡旋中心所在位置)

Fig. 3 (a) Spatial distribution of cumulative precipitation (shaded, unit: mm) in the past 3 hours at 19:00 BT on July 5, 2022. (b) Pressure change (shaded, unit: hPa) and temperature change (black lines, unit: ℃) in the past 3 hours at 19:00 BT on July 5, 2022. Ground temperature (colored, unit: ℃), flow field, and frontogenesis function (dashed lines, unit: 10^{-8} K·s^{-1}·m^{-1}) at (c) 21:10 BT and (d) 22:20 BT on July 5, 2022. Surface wind field (unit: m·s^{-1}), temperature (solid lines, unit: ℃), and dew point temperature (shaded, unit: ℃) at (e) 21:10 BT and (f) 22:20 BT on July 5, 2022 (▲ represents the location of the vortex center)

然后自下向上发展, 最高伸展至大约 2 km, 沿着强降水边沿缓慢向东北方向移动。

6 γ 中尺度涡旋形成机制及其结构特征

6.1 睿图模式预报结果检验

图 7 为睿图的短期预报子系统 (RMAPS-ST) 预报的 7 月 5 日 23:00—6 日 03:00 累计降水量和 6 日 00:00 组合反射率, 模式很好地预报了此次短时暴雨过程, 位于渤海西岸的大暴雨落区与实况基本吻合 (图 7a), 逗点状暴雨回波的形态及强度也完整呈现 (图 7b)。因此, 下文将基于模式预报结果详细分析造成此次强降水的中尺度涡旋发生、发展和环境结构特征。

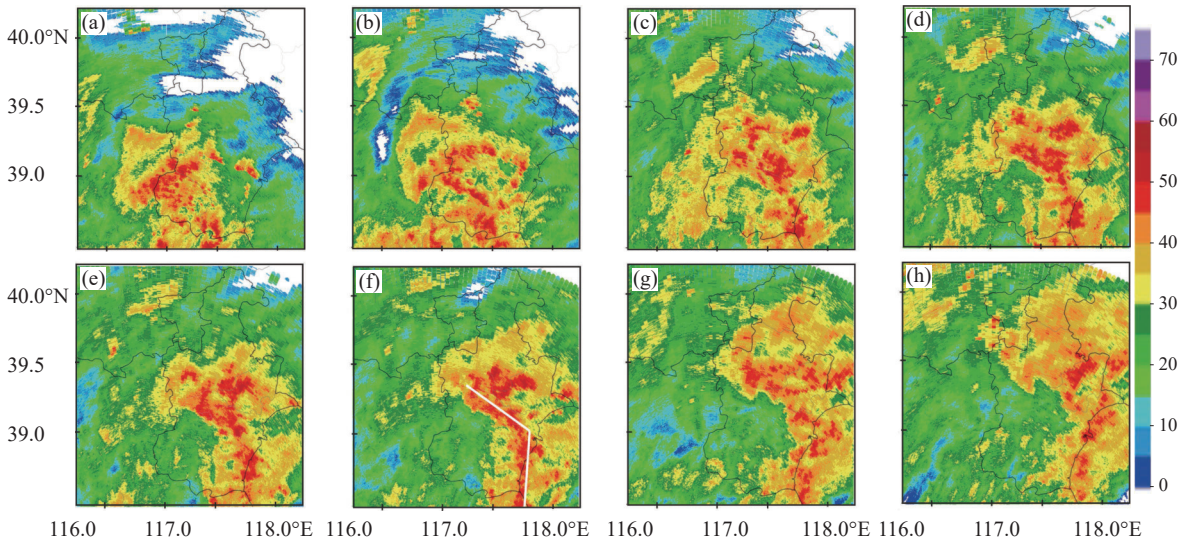


图 4 2022 年 7 月 5 日 22:48 (a)、23:12 (b)、23:42 (c)、6 日 00:06 (d)、00:30 (e)、00:48 (f)、01:18 (g)、01:54 (h) 沧州 SA 多普勒天气雷达组合反射率 (单位: dBz) 演变趋势

Fig. 4 Evolution of combined reflectance (unit: dBz) of SA Doppler weather radar at Cangzhou at (a) 22:48, (b) 23:12, (c) 23:42 BT on July 5, (d) 00:06, (e) 00:30, (f) 00:48, (g) 01:18 and (h) 01:54 BT on July 6, 2022

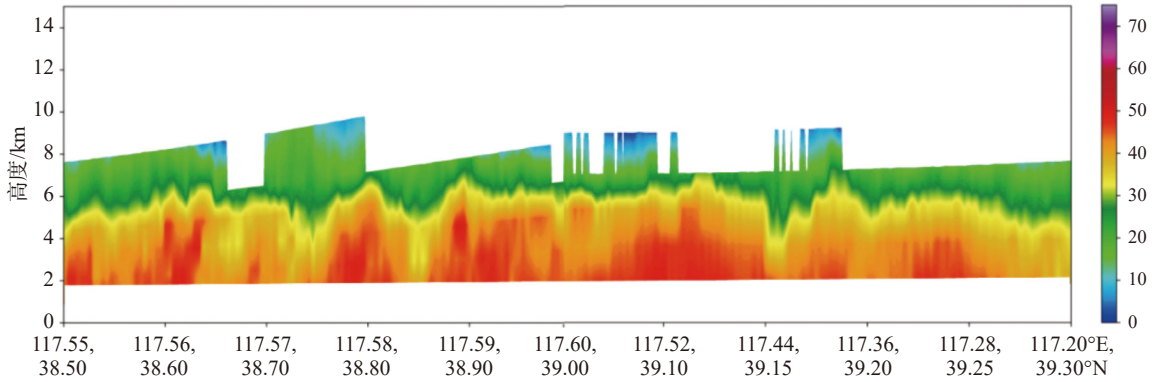


图 5 2022 年 7 月 6 日 00:48 沿图 4f 白色实线的雷达反射率因子 (单位: dBz) 剖面图

Fig. 5 Vertical profile of basic reflectivity factor (unit: dBz) along the white line in fig. 4f at 00:48 BT on July 6, 2022

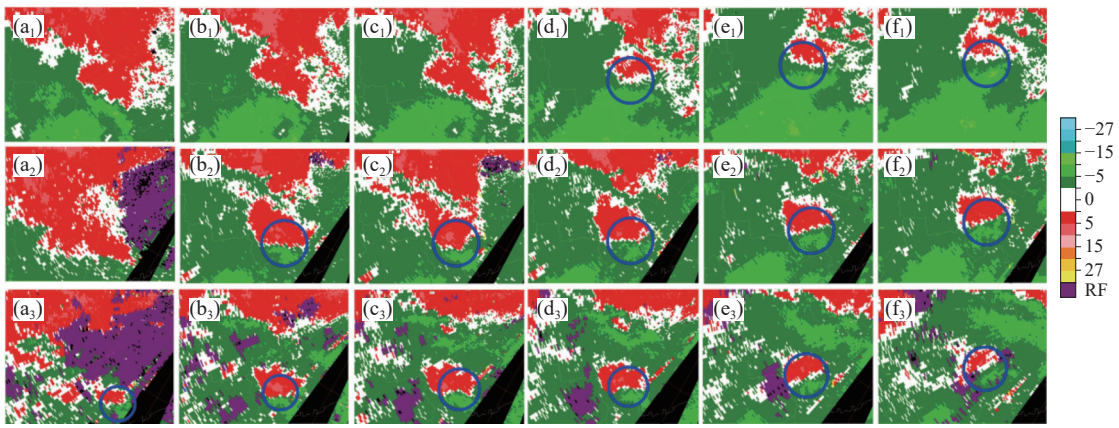


图 6 2022 年 7 月 5—6 日 23:18 (a_1—a_3)、23:36 (b_1—b_3)、23:48 (c_1—c_3)、00:18 (d_1—d_3)、00:48 (e_1—e_3)、01:06 (f_1—f_3) 塘沽 SA 多普勒雷达 0.5° (a_3—f_3) 、1.5° (a_2—f_2) 、2.5° (a_1—f_1) 仰角径向速度场 (单位: $m \cdot s^{-1}$) (蓝色圆圈表示中尺度涡旋)

Fig. 6 Radial velocity field (unit: $m \cdot s^{-1}$) at (a_3—f_3) 0.5°, (a_2—f_2) 1.5°, (a_1—f_1) 2.5° elevation Angle of Tanggu SA Doppler radar at (a_1-a_3) 23:18, (b_1-b_3) 23:36, (c_1-c_3) 23:48, (d_1-d_3) 00:18, (e_1-e_3) 00:48, (f_1-f_3) 01:06 BT on July 5-6, 2022 (blue circle represents mesoscale vortex)

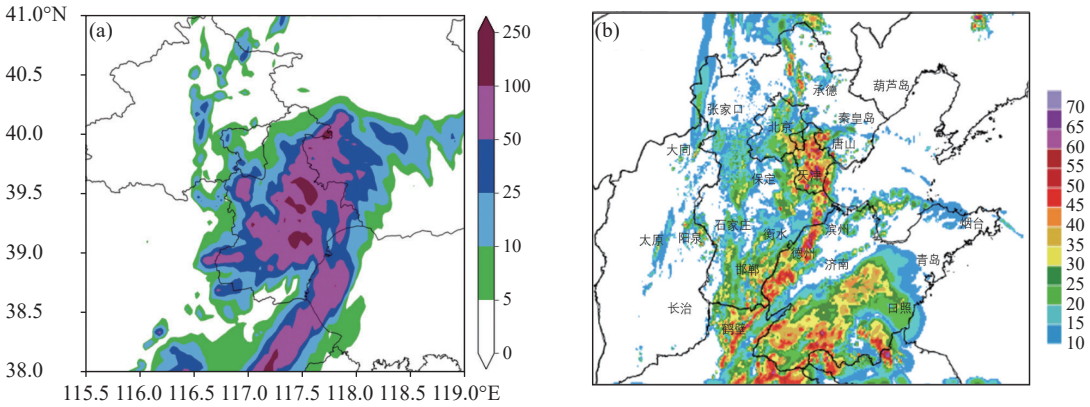


图 7 2022 年 7 月 5 日 23:00—6 日 00:00 睿图预报累计降水量 (a, 填色, 单位: mm) 以及 6 日 00:00 预报的组合反射率因子 (b, 单位: dBz)

Fig. 7 (a) Spatial distribution of simulated cumulative rainfall (shaded, unit: mm) from 23:00 BT on July 5 to 03:00 BT on July 6 and (b) composite reflectivity (unit: dBz) at 00:00 BT on July 6, 2022

6.2 γ 中尺度涡旋发生、发展及其与降水关系

为分析 γ 中尺度涡旋发生、发展过程, 并揭示其发展与降水的关系, 图 8 给出模式预报的低层水平风场及垂直涡度的演变, 从图中可见, 对 7 月 5 日 23:00—6 日 02:00 天津地区的预报结果表现为一个较显著的 γ 中尺度涡旋发展增强的过程。5 日 23:00, 近地面渤海西部处于低压倒槽顶部, 地面涡旋环流位于天津东部 (图 8a), 此时 925 hPa 高度上还未出现涡旋环流 (图 8b), 大于 2×10^{-4} s^{-1} 的显著涡度主要位于天津中部地区和西北部, 在其对应的水平风场上, 天津东部主要以偏东风为主, 天津中部地区显著涡度主要由西南—东南风向切变产生; 天津西北部武清区附近的涡度区对应水平风速相对较小, 平均在 4 $m\cdot s^{-1}$ 以下, 涡度主要由南北风向切变产生, 涡度中心强度较天津中部弱, 流场上表现为弱的气旋性弯曲。此时强降水区主要位于地面涡旋的右侧及 925 hPa 气旋性弯曲处的涡度中心附近。6 日 00:00, 地面涡旋进一步发展, 出现了 1 000 hPa 的闭合低压中心 (图 8d)。925 hPa 高度上 (图 8e), 随着天津西部西北风向市中心进一步的渗入, 在市中心附近出现由西北—西南风向切变形成的涡度, 伴随倒槽顶部的气旋性弯曲明显加强, 倒槽内的小时雨强增大到 30 $mm\cdot h^{-1}$ 以上。6 日 01:00, 地面涡旋环流范围进一步扩大, 外围涡旋风场更加完整 (图 8g)。925 hPa 上随着东南风的加强, 天津东北部东风中气旋性的风向切变显著, 至此 925 hPa(图 8h) 可见气旋式闭合的涡旋风场, 涡旋中心与当地涡度中心位置一致, 形成一个有显著涡度中心对应的 γ 中尺度涡旋, 强降水区位于涡旋的右侧即第一和第四象限。同样在 850 hPa 高度上, 涡度和风场的演变总体与 925 hPa 高度类似, 但在发展时间上存在差别, 相比 925 hPa 上同样特征的形成时间推迟 1 h (图 8c、f、i)。因此, 本次强降水过程中的 γ 中尺度涡旋发生在低压倒槽顶部, 从发展时间上来看, 近地面、925 hPa、850 hPa 自下而上先后出现 γ 中尺度涡旋, 这与雷达速度图中观测到的涡旋自下而上发展一致。降水主要位于涡旋的右侧, 且随着涡旋从近地面向高空深厚结构建立, 降水强度也逐渐增大。

6.3 γ 中尺度涡旋生成发展的动力原因

为探讨天津地区涡度场从初始时一个局地近地层的涡度中心到后期发展成为伴有显著闭合式环流的 γ 中尺度系统的涡度发展机制, 根据公式 (1) 计算了中尺度低涡所在区域 (图 8i 中的方框) 平均的涡度方程。下文通过涡度方程各项, 研究涡度生成和发展的物理过程。

图 9 给出了暴雨发生主要时刻涡度方程各项及总涡度收支的垂直廓线。5 日 23:00(图 9a), 对流层 700 hPa 以下涡度的局地变化为较明显的正值, 最大值为 1.0×10^{-8} s^{-2}, 出现在 1 000 hPa 附近, 此刻地面低涡已经形成, 完全是由水平辐合辐散项 C 提供的, 说明低层涡度生成主要依赖风场辐合。6 日 00:00 (图 9b), 925 hPa 附近总的涡度收入增加非常明显, 达到 2.0×10^{-8} s^{-2}, 成为最大收入层, 主要的正贡献项为相对涡度的垂直输送项 B 和水平辐合辐散项 C, 说明涡度生成除了 925 hPa 风场辐合外, 垂直运动加强开始把低层的垂直涡度向上输送。6 日 01:00(图 9c), 总的涡度收入最大层在 1 000~850 hPa 之间, 仍主要是由垂直输送项 B 和水平辐合辐散项 C 贡献。总的看来, 中尺度涡旋系统主要由近地层水平辐合辐散项 C 提供初始扰动, 然后通过垂直运动把低层的垂直涡度依次向 925 hPa 和 850 hPa 进行输送, 同时 925 hPa 和 850 hPa 水平辐合辐散项 C 使得低涡发展加强。此次过程中, 相对涡度水平平流项和扭曲项

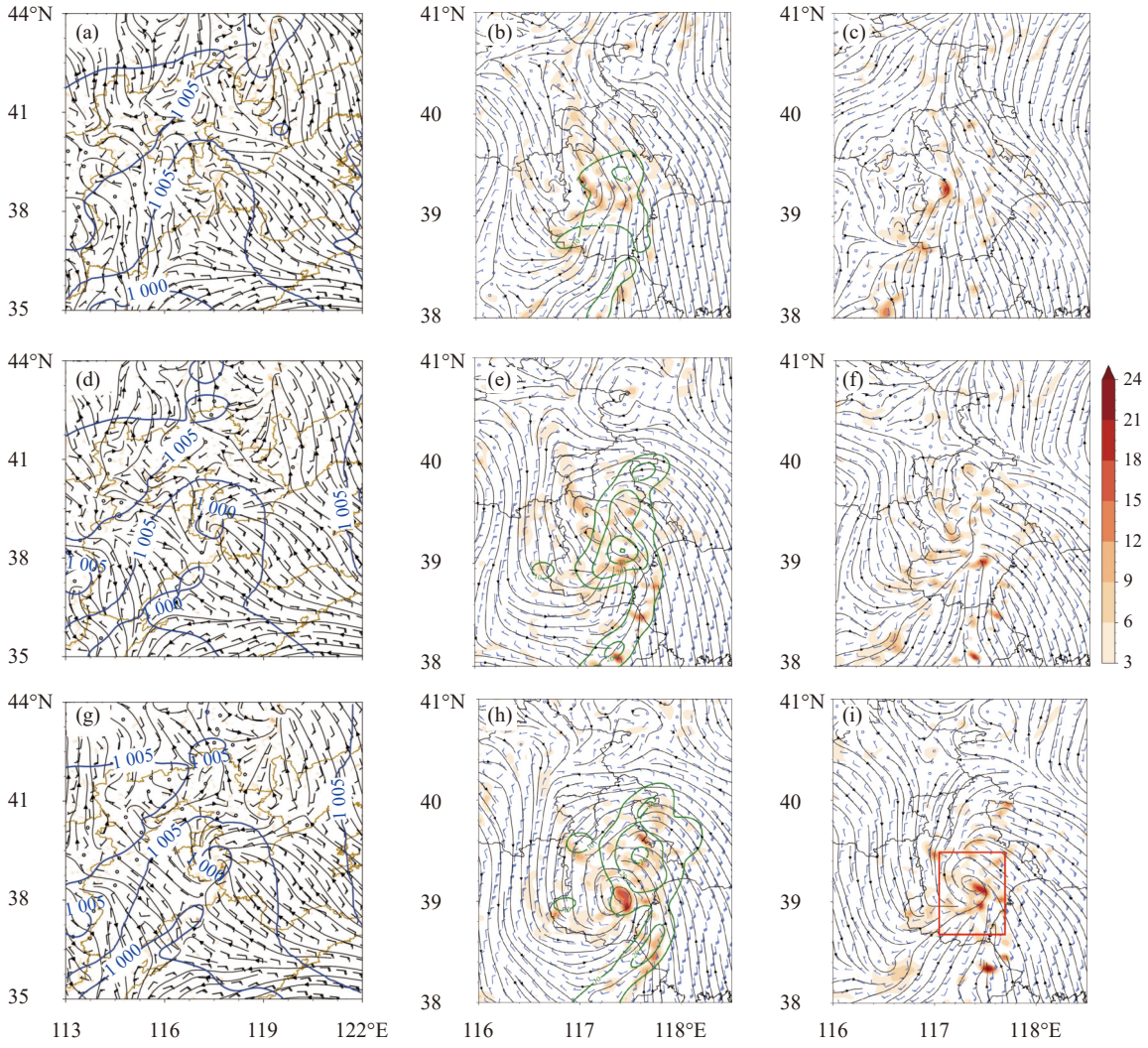


图 8 模式预报的 2022 年 7 月 5 日 23:00 (a、b、c)、6 日 00 时 (d、e、f) 和 01:00 (g、h、i) 的地面风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 与海平面气压场 (蓝色等值线, 单位: hPa) (a、d、g), 925 hPa (b、e、h) 和 850 hPa (c、f、i) 流场及涡度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 及其 1 h 后降水分布 (绿色等值线, 单位: mm, 红框表示中尺度低涡所在区域)

Fig. 8 Simulated surface wind field (unit: m·s^{-1}) at (a, b, c) 23:00 BT on July 5, 2022, (d, e, f) 00:00 BT, and (g, h, i) 01:00 BT on July 6, 2022, (a, d, g) sea level pressure field (blue contours, unit: hPa), flow field and vorticity (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and its precipitation distribution one hour later (green contours, unit: mm) at (b, e, h) 925 hPa and (c, f, i) 850 hPa

在整个对流层对涡度局地变化的贡献为负, 即没有西风槽或其他外来系统为暴雨区提供正涡度, 而水平辐合辐散项和垂直输送项在整个对流层为正贡献, 是中尺度系统发生发展的重要物理过程。

6.4 γ 中尺度涡旋生成发展的热力原因

图 10 为模式预报的中尺度涡旋上空温度距平场配合散度、垂直速度等动力场。从中尺度涡旋上空温度距平场 (图 10a、b) 看到, 中尺度涡旋存在一个暖心结构, 达到 2 ℃ 以上的正距平, 暖中心大概在 700—850 hPa 附近, 6 日 00:00—01:00, 在中尺度涡旋的发展强盛期间, 925 hPa 以下有弱冷空气渗透至涡旋中心附近, 造成局地负变温, 引起局地层结不稳定加强, 促使对流不稳定的垂直发展。至 6 日 03:00 (图 10c), 随着弱冷空气进一步侵入, 直至涡旋的东侧后, 暖心结构变得不规则,强度明显减弱,涡旋的强度也随之减弱。有台风研究表明, 适当的冷空气侵入会给登陆台风提供斜压势能和对流不稳定, 从而加强降水 (杜惠良等, 2011)。而另一方面, 如果冷空气侵入并填满了残留的涡旋, 热带气旋降水会受到抑制。可见在中尺度涡旋发展过程中, 低层弱冷空气的渗入前期为中尺度涡旋对流雨带的发展提供了热力不稳定作用, 到后期却抑制了涡旋的发展。

进一步分析垂直速度散度剖面图, 6 日 00:00 涡旋初步形成后 (图 10d), 涡旋中心东侧中低层是明显的上升运动区, 西侧无对称的上升区, 表现出不对称的结构特征。至 01:00 (图 10e), 涡旋发展旺盛时, 其东西两侧的对流层低层有明显的辐散, 边界层为辐合区, 涡旋附近基本都处于上升运动区, 随着弱冷空

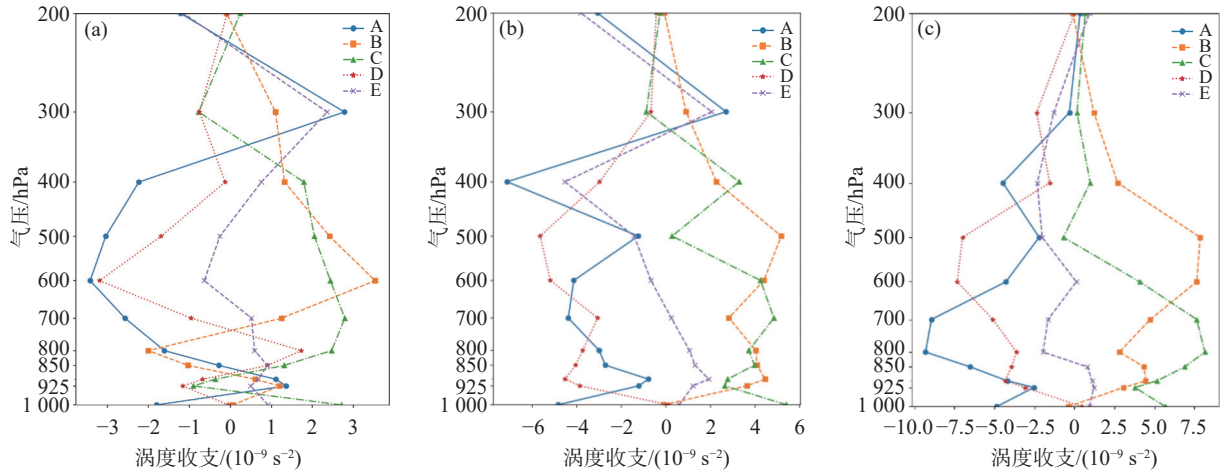


图 9 2022 年 7 月 5 日 23:00 (a) 及 6 日 00:00 (b)、01:00 (c) 涡旋区域 (图 5 g 中红框部分) 绝对涡度水平流项 (A)、相对涡度垂直输送项 (B)、水平辐合辐散项 (C)、扭曲项 (D) 收支及总涡度收支 (E) 区域平均的垂直分布 (单位: 10^{-9} s^{-2})

Fig. 9 Averaged vertical distributions (unit: 10^{-9} s^{-2}) of horizontal advection term for absolute vorticity budget (labeled as A), vertical transport term for relative vorticity budget (labeled as B), horizontal convergence-divergence term for relative vorticity budget (labeled as C), distortion term (labeled as D), and total vorticity budget (labeled as E) over the vortex region (boxed area in Fig. 5g) at (a) 23:00 BT on July 5, 2022, (b) 00:00 BT on July 6, 2022, and (c) 01:00 BT on July 6, 2022

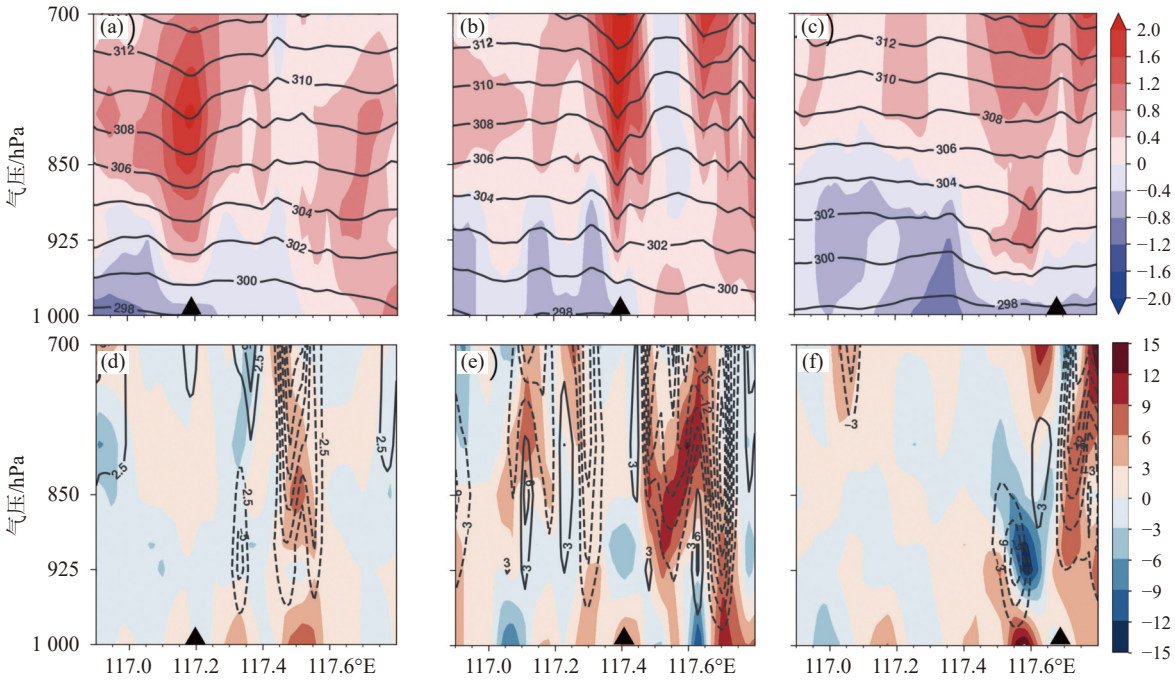


图 10 2022 年 6 日 00:00 (a, d)、01:00 (b, e) 与 03:00 (c, f) 的中尺度涡旋上空温度距平场 (阴影, 单位: ℃) 和位温 (等值线, 单位: ℃) (a, b, c) 及散度 (阴影, 单位: 10^{-4} s^{-1}) 与垂直速度 (等值线, 单位: Pa·s^{-1}) (d, e, f) 的纬向剖面图 (▲代表涡旋中心所在位置)

Fig. 10 The longitude-pressure cross sections of (a, b, c) temperature anomaly fields (shaded, unit: ℃) and potential temperatures (isolines, unit: ℃), (d, e, f) divergence (shading, unit: 10^{-4} s^{-1}) and vertical velocity (isoline, unit: Pa·s^{-1}) above the mesoscale vortex at (a, d) 00:00 BT, (b, e) 01:00 BT, and (c, f) 03:00 BT on June 6, 2022 (▲ represents the location of the vortex center)

气的进一步入侵, 其西侧抬升强迫明显增强, 东侧上升速度及上升区范围也明显大于前一时刻, 弱冷空的渗入为中尺度涡旋对流雨带的发展提供了有力的动力强迫。涡旋继续向东北方向移动后, 上升运动区也逐渐向东扩展, 但涡旋东侧的垂直速度明显减弱 (图 10f), 从而使得降水也明显减弱。

6.5 水汽输送对 γ 中尺度涡旋发展的作用

图 11 为模式预报的 925 hPa 和 850 hPa 的风场和水汽通量场分布。可见, 来自渤海的东南气流为中尺度涡旋提供了充沛的水汽, 同时也有利于其强度维持。中尺度涡旋的水汽输送呈明显的不对称结构, 水汽通量大值区主要集中在涡旋的东侧, 即渤海

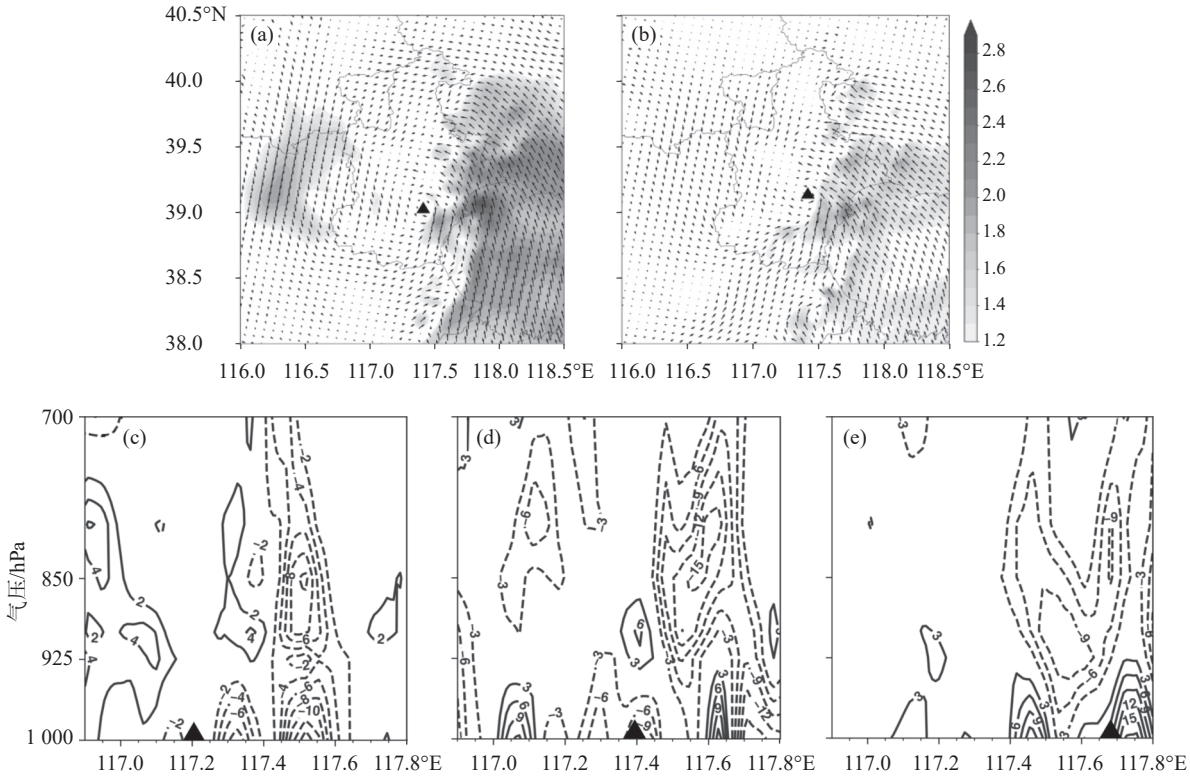


图 11 2022 年 7 月 6 日 01:00 925 hPa (a) 和 850 hPa (b) 的风场 (箭头, 单位: m·s^{-1}) 和水汽通量 (填色, 单位: 10^2 g·kg^{-1}·m·s^{-1}) 以及 6 日 00:00 (c)、01:00 (d)、03:00 (e) 的沿涡旋中心的水汽通量散度纬向垂直剖面 (单位: 10^{-7}g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) (▲代表涡旋中心所在位置)

Fig. 11 Wind field (arrow, unit: m·s^{-1}) and vapor flux (shaded, unit: 10^2 g·kg^{-1}·m·s^{-1}) at (a) 925 hPa and (b) 850 hPa at 01:00 BT and the vertical section of vapor flux divergence along the vortex center at (c) 00:00 BT, (d) 01:00 BT, and (e) 03:00 BT on July 6, 2022 (unit: 10^{-7}g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) (▲represents the location of the vortex center)

湾西侧有水汽的辐合, 这也是降水增多的一个重要原因。从水汽通量散度垂直变化 (图 11c—e) 来看, 造成强降水的水汽主要集中在 700 hPa 以下。强降水开始出现时, 也就是在 6 日 00:00 (图 11c), 在涡旋中心东侧出现了水汽通量辐合中心, 大量水汽在渤海西岸集中, 所以该地区上空的中低层有较强的水汽通量辐合抬升, 随垂直上升气流抬升到中高层后冷却凝结释放潜热, 形成降水。至 6 日 01:00 (图 11d) 随着涡旋的发展加强, 其北侧倒槽将东侧的水汽携带至西侧, 可以看到在涡旋中心西侧 850 hPa 也出现了一个辐合中心。到 6 日 03:00 (图 11e), 随着涡旋减弱, 水汽辐合区主要集中在 850 hPa 下, 其中心强度开始减弱, 降水也随之趋于减弱。

7 结论

利用自动站观测资料、ERA5 再分析场资料及多普勒天气雷达资料等, 对发生在渤海西岸的一次大暴雨过程进行了观测分析, 并利用数值预报结果初步分析了逗点状 MCS 中 γ 中尺度涡旋形成机制及其结构特征, 得到主要结论如下:

(1) 高空低槽东移并和台风“暹芭”减弱后的低压倒槽相互作用, 斜压带的活动为倒槽北侧逗点状回波带的触发提供了有利的环境条件。造成强降水的中尺度对流系统为典型的低质心结构, 对流中的多单体风暴呈现有组织地涡旋状旋转, 形成列车效应。涡旋首先在底层生成, 然后自下向上发展。

(2) γ 中尺度涡旋发生在低压倒槽顶部, 地面的锋生函数表明, 由前期降水形成的西北气流与暖湿的渤海东南气流两个热力性质不同的气团相遇后锋生作用明显, 风场在锋生大值区出现了气旋性旋转形成显著闭合环流, 随后 925 hPa、850 hPa 依次向上出现 γ 中尺度涡旋, 降水主要位于涡旋的右侧, 且随着涡旋从近地面向高空深厚结构建立, 降水强度也逐渐增大。

(3) 涡度方程的收支诊断表明, 相对涡度水平平流项和扭曲项在整个对流层对涡度局地变化的贡献为负, 涡旋主要由低层水平辐合辐散项提供初始扰动后, 通过垂直涡度依次向上输送, 结合各层的水平辐合辐散项共同引起正涡度的增加, 最终形成在对流层下半部具有闭合式气旋性环流的深厚 γ 中尺度涡旋, 水平辐合辐散和垂直输送是中尺度系统发生发展的重要物理过程。

(4) 中尺度涡旋存在一个暖心结构，暖中心大概在 700—850 hPa 附近，在中尺度涡旋的发展强盛期间，925 hPa 以下有弱冷空气渗透至涡旋中心附近，引起局地层结不稳定加强。中尺度涡旋东侧上升速度大于西侧，表现出不对称结构的特征，其导致东侧降水明显强于西侧，弱冷空气渗透为对流雨带的发展提供了动力强迫作用。

(5) 从水汽通量散度垂直变化来看，造成强降水的水汽主要集中在对流层中低层。中尺度涡旋的水汽输送也是呈明显的不对称结构，水汽通量辐合中心出现在涡旋东侧，导致大量水汽在渤海西岸集中，随着涡旋的发展加强，其北侧倒槽将东侧的水汽卷至西侧，导致天津中西部也出现短暂的强降水过程。

北京城市气象研究院为本研究提供了所需的睿图模式资料，谨致谢忱！

参考文献 (References):

陈贵川,吴钲,谌芸,等.2016.中低层增温对强降水中涡旋形成的敏感性研究[J].高原气象,35(6):1498-1511. Chen G C, Wu Z, Chen Y, et al. 2016. Sensitivity study of middle-low level temperature increase for mesovortex formation in a heavy rainfall case [J]. Plateau Meteorology,35(6):1498-1511 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00070

陈小华,李华宏,何钰,等.2023.云南两次非超级单体龙卷天气特征分析[J].高原山地气象研究,43(1):81-89. Chen X H, Li H H, He Y, et al. 2023. Characteristics of two non-supercell tornadoes in Yunnan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(1):81-89 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.01.010

杜惠良,黄新晴,冯晓伟,等.2011.弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J].气象,37(7):847-856. Du H L, Huang X Q, Feng X W, et al. 2011. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm [J]. Meteorologcal Monthly,37(7):847-856 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.7.009

胡鹏宇,徐爽,杨磊,等.2024 副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析[J].暴雨灾害,43(5):532−541. Hu P Y, Xu S, Yang L, et al. 2024. Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):532−541 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−116

李明娟,郭大梅,张蔚然,等.2025.陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制[J].暴雨灾害,44(1):19−30. Li M J, Guo D M, Zhang W R, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):19−30 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−224

孙建华,周玉淑,傅慎明,等.2024.近十年我国涡旋系统的研究进展[J].大气科学,48(1):228-260. Sun J H, Zhou Y S, Fu S M, et al. 2024. Progress on vortices in China in the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(1):228-260 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2311.23323

王莹,董畅,易笑园,等.2021.天津城区一次 γ 中尺度短时暴雨的热动力环境分析[J].气象,47(4):398-411. Wang Y, Dong C, Yi X Y, et al. 2021. The thermal and dynamic environmental field analysis of a meso-γ-scale short-time rainstorm in Tianjin [J]. Meteorologcal Monthly,47(4):398-411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.04.002

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 Meteorologica Sinica,81(1):19-39 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220023

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]. Meteorologcal Monthly,38(11):1313-1329 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.11.001

翟亮,王林,郭金兰,等.2022.北京一次极端雨雪天气异常诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,16(4):9-13. Zhai L, Wang L, Guo J L, et al. 2022. Abnormal diagnosis and analysis of an extreme rain and snow weather in Beijing [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(4):9-13 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.04.003

Evans C, Weisman M L, Bosart L F. 2014. Development of an intense, warm-core mesoscale vortex associated with the 8 May 2009 "Super Derecho" Convective Event [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,71(3):1218–1240. doi:10.1175/JAS−D−13−0167.1

Fu S M, Zhang J P, Tang H, et al. 2020. A new mesoscale-vortex identification metric: restricted vorticity and its application [J]. Environmental Research Letters,15(12). doi:10.1088/1748−9326/abcac6

Hitchens N M, Brooks H E. 2013. Preliminary investigation of the contribution of supercell thunderstorms to the climatology of heavy and extreme precipitation in the United States [J]. Atmospheric Research, 123(1):206–210. doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.023

Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. Journal of Climate,29(24):8703−8719. doi:10.1175/JCLI−D−16−0057.1

Morales A, Schumacher R S, Kreidenweis S M. 2015. Mesoscale vortex development during extreme precipitation: Colorado, September 2013 [J]. Monthly Weather Review,143(12):4943–4962. doi:10.1175/MWR−D−15−0086.1

Nielsen E R, Schumacher R S. 2018. Dynamical insights into extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,75(9):2983–3009. doi:10.1175/JAS−D−17−0385.1

Nielsen E R, Schumacher R S. 2020. Observations of extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. Monthly Weather Review,148(1):159–182. doi:10.1175/MWR−D−19−0146.1

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]. Monthly Weather Review,143(6):2266−2290. doi:10.1175/MWR−D−14−00234.1

Xu X, Xue M, Wang Y. 2015b. The genesis of mesovortices within a real-data simulation of a bow echo system [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,72(5):1963−1986. doi:10.1175/JAS−D−14−0209.1

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]. Journal of Meteorological Research,36(1):6−25. doi:10.1007/s13351−022−1166−7

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]. Monthly Weather Review,150(5):1075−1096. doi:10.1175/MWR−D−21−0033.1

(责任编辑　闵爱荣)