

基于相控阵雷达的东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋对合并型弓状回波的影响研究*

杨雪^{1,2,3} 杨磊^{1,2,3,4,5} 袁潮^{1,2,4,5} 平凡^{1,2,5} 曹世腾^{1,2,3,5} 王改利²

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3. 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

4. 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 广东佛山 528315

5. 盘锦国家气候观象台, 辽宁盘锦 124010

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

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

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.110501

Study on the influence of mesovortex on merger-formation bow echo under the background of Northeast China Cold Vortex based on phased array radar

YANG Xue^{1,2,3} Yang Lei^{1,2,3,4,5*} YUAN Chao^{1,2,4,5} Ping Fan^{1,2,5} Cao Shiteng^{1,2,3,5} Wang Gaili²

1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166

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

中国气象局青年创新团队(CMA2024QN05)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J013、CXFZ2022J003、CXFZ2022J059)、中国气象局复盘专项(FPZJ2024026)、中国气象局龙卷风实验室开放课题(TKL202307)、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(2024SYIAEKFD02)和中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2023Z019)共同资助。

2024-09-24 收稿 2024-11-22 收修订稿

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

通信作者: 杨磊, 主要从事强对流和强降水等中尺度气象学研究。yanglei_nuist@163.com

-
- 31 3. Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang 110166
32 4. China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Guangdong, Foshan, 528315
33 5. Panjin Meteorological Office of Liaoning Province, Panjin 124010

34 **Abstract:** Based on the X-band phased array radar data, this work studied the impact mechanisms of the fine
35 characteristic on merger-formation bow echo and thunderstorm gusts which occurred under the background of
36 Northeast China Cold Vortex. The results show that: the thunderstorm gusts area in Liaoning province was located
37 in the southeast quadrant of the Northeast China Cold Vortex, and was influenced by low-level shear lines and
38 low-level jet streams. The beneficial environment conditions such as extreme temperature differences between
39 850hPa and 500hPa were conducive to the occurrence of thunderstorm gust. The relative humidity near the ground
40 at night was close to 70%, which was not conducive to the formation of strong cold pools. Therefore, there was no
41 bow-shaped pattern in squall lines and the thunderstorm gusts were very scattered at this time. Subsequently, the
42 squall line merged with the isolation storm. The shallow MVs generated at the merging height, and the rear-inflow
43 jet (RIJ) had weakened. The micro downburst near MV created a strong cold pool near the ground. Under the joint
44 stretching effect of the rising airflow at the edge of the cold pool and the original rising airflow of the storm, the
45 MV was stretched and strengthened. Subsequently, the ZDR column formed over the MV, indicating the presence
46 of strong updrafts and prolonging the duration of thunderstorms and strong winds in this area. Although the storm
47 at the MV showed a bow-shaped pattern during this period, there were no thunderstorm gusts below the MV. When
48 the ration of MV weaken, there was a rapid decrease in the scale and concentration of precipitation particles within
49 the storm. The evaporation of precipitation led to the formation of stronger and larger cold pools on the ground,
50 and the development of RIJ below the MV. Although the MV with a bottom height higher than 2 km in this process
51 could not cause strong winds directly, the thermodynamic and microphysical processes of the storm were affected
52 by MV, leading to the concentration of thunderstorm winds in the strong cold pool and RIJ below the MV. The
53 thunderstorm gusts were not caused by the strengthening of MV development, but rather the result of RIJ's
54 downward development and hydrometeor evaporation.

55 **Keywords:** mesovortex, merger-formation bow echo, thunderstorm gusts, Northeast China Cold Vortex, phased
56 array radar

57 58 引言

59 东北冷涡背景下, 大气常具有强天气尺度强迫、接近干绝热温度直减率和中等以上的风
60 垂直切变等环境特征, 常给我国中东部地区带来极端致灾的雷暴大风事件(郑永光和宋敏敏,
61 2021; 杨磊和郑永光, 2023; Tao et al, 2023)。这些事件常由弓状回波导致, 在雷达图像
62 中呈现向前凸起的弓状(Fujita, 1978; Schenkman and Xue, 2016; 吴海英等, 2023; 许长
63 义等, 2023; Xu et al, 2024a)。因此, 需要加深对东北冷涡背景下弓状回波造成极端大风
64 的机理研究。

65 早期研究发现, 弓状回波可以由孤立普通风暴或飑线演变而成, 常称为经典型弓状回波
66 (Fujita, 1978; Bluestein and Parker, 1993; Burke and Schultz, 2004; Klimowski et al, 2004)。
67 飑线演变为经典型弓状回波前, 需要后部层状云内存在一个从后向前的后侧入流急流
68 (Rear-inflow Jet, RIJ), RIJ 逐渐增强并且下降至近地面, 导致弓形出现并造成大风事件
69 (Meng et al, 2012; Smull and Houze, 1987; Zhang et al, 2021), 因此 RIJ 是经典型弓状
70 回波发展的关键动力因素 (Skamarock et al, 1994; Schenkman and Xue, 2016)。在弓状回

71 波形成后,其内部可能会出现 γ 中尺度涡旋(英文为 mesovortex, 简称为 MV), 相比于超
72 级单体风暴内深厚持久的中气旋, 弓状回波内的 MV 普遍持续时间更短, 更为浅薄, 形成
73 机制也更复杂(Weisman et al, 2003; Trapp and Weisman, 2003; Atkins and Laurent, 2009a;
74 2009b; Schenkman and Xue, 2016; 杨磊等, 2023)。MV 可以是冷池携带的水平涡管被降
75 水下沉气流扭曲(Trapp and Weisman, 2003)或被上升气流拉伸而形成(Atkins and Laurent,
76 2009b), 近地面摩擦作用形成的水平涡度也可能是 MV 的重要涡度来源(Xu et al, 2015a;
77 2015b)。RIJ 和 MV 可以单独或共同作用形成致灾大风(Atkins and Laurent, 2009a; Xu et
78 al, 2015b)。

79 另外, 弓状回波也可以由飑线和孤立风暴合并而成(Finley et al, 2001; Klimowski et al,
80 2003), 被称为合并型弓状回波(Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023), 此类弓形回波得到
81 国外学者的广泛关注(Wolf, 1998; LaPenta et al, 2005; French and Parker, 2012; 2014)。
82 近些年, 学者们才开始研究我国华南地区合并型弓状回波过程, 合并型弓状回波的占比要高
83 于经典型弓状回波, 同时会造成更强的雷暴大风和降水(Zhou et al, 2023)。在合并过程
84 中 RIJ 会减弱, 但上升气流会加强, 即使在弱垂直风切变的环境下也会形成 MV(Zhou et al,
85 2020; Liu et al, 2023; Xu et al, 2024b)。MV 形成后可以通过促进降水并造成更强的冷池,
86 导致合并风暴出现弓状特征和 RIJ 的加强(Zhou et al, 2020); 也会将原线状风暴扭曲, 使
87 其局部变形向前凸起形成弓形(Liu et al, 2023), 最终在 MV 附近出现大风事件, 这与经
88 典弓状回波 RIJ 主导的动力特征具有差异。相比于经典型弓状回波, 合并型弓状回波由于具
89 有复杂的合并过程(Zhou et al, 2023), 需要更高分辨率的观测资料才能研究 MV、RIJ 和
90 冷池的精细特征及产生大风的机制, 目前我国并没有关于东北冷涡背景下合并型弓形回波事
91 件的研究。

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

97 2. 资料与方法

98 使用质量控制后的时间分辨率为 5 min 的自动气象站资料, 强对流区域自动气象站的平
99 均距离为 6 km, 分析强对流实况和地面气象条件。此外, 选取沈阳发生强对流前(2023 年
100 7 月 7 日 01:00)(北京时, 下同)的自动气象站资料订正 ERA5 再分析资料近地面层相关
101 温湿量, 分析雷暴大风发生前环境参量。为了区分本次过程与以往东北冷涡雷暴大风过程环
102 境特征差异, 基于杨磊和郑永光(2023)研究中收集的 2017—2021 年雷暴大风样本, 提取
103 发生在 7 月 1—15 日东北冷涡东南象限雷暴大风样本(合计 1190 个站次), 统计该期间雷
104 暴大风环境参量的平均值和方差, 计算本次过程沈阳市区物理量和统计结果的标准差 σ ,

105 以得出本次过程的极端因素。

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

116 参考弓状回波及其相关 MV 研究总结的概念模型（Schenkman and Xue, 2016），根据
117 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，以及根据每个时刻、
118 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
119 速度区域内退速度模糊后的最大速度，计算 MV 的旋转速度。同时计算每个时刻、每个仰
120 角内 MV 正、负最大速度直线上（平均距离约 5 km）各个像素点上雷达参量的平均值，以
121 便研究 MV 旋转处风暴的雷达特征，并统计每个时刻 MV 厚度、最大旋转速度（及高度）
122 等信息。由于 MV 旋转速度的强度等级并没有统一标准，所以本文与以往 MV 研究相似（杨
123 磊等，2023），参考中气旋强度标准（Yu et al, 2012）来判断 MV 旋转速度的等级。根据
124 每个时刻 MV 最大旋转速度所在的位置，将自动气象站资料插值到 5 km 分辨率的网格点上，
125 计算 MV 所在位置、半径为 20 km 范围内冷池（1 h 降温低于 -1°C ）的面积、冷池的平均温
126 度、最低温度以及冷池上空偏振参量的特征值，以便探讨冷池上空微物理特征变化及其对雷
127 暴大风的影响。

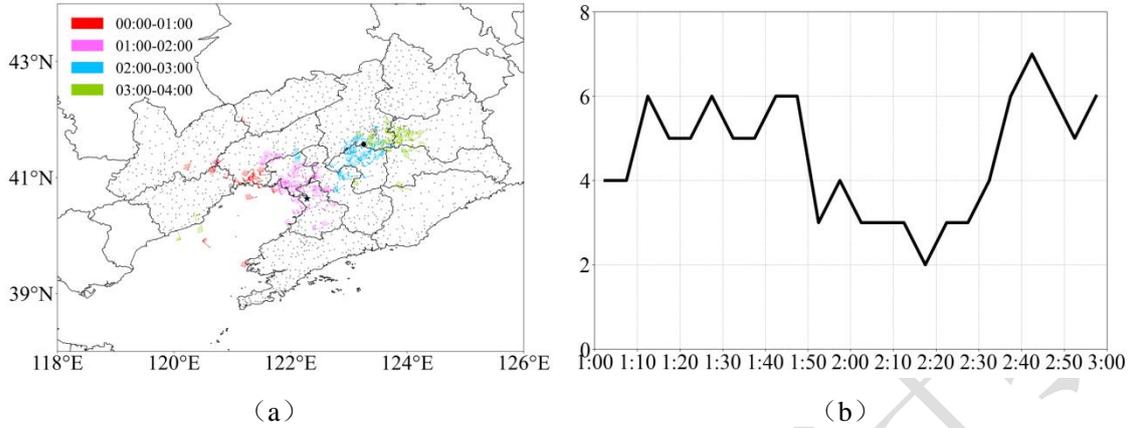
128 3. 强对流实况及影响系统

129 3.1 雷暴大风实况

130 2023 年 7 月 6 日夜間，辽宁自西向东出现雷暴大风过程（图 1a），集中时段为 7 日
131 00:00—04:00，8—9 级和 10 级以上雷暴大风的站数分别为 162 和 10，最大风速为 $27.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
132 达到 10 级。杨磊和郑永光（2023）研究东北冷涡背景下 1 h 内雷暴大风站数主要集中在 10
133 个以下，而本次过程在 7 日 00:00—04:00 共连续 4 h 的雷暴大风站次均超过 10 个站次，其
134 中 7 日 01:00—02:00、02:00—03:00 雷暴大风站次分别高达 59 个和 51 个，也体现出本次雷
135 暴大风出现站次多的特点。

136 从 7 日 01:00—03:00 内逐 5 min 雷暴大风站次的时间演变还可以看到（图 1b），逐 5 min
137 雷暴大风站次存在两个阶段。第一阶段主要集中在 01:10—01:55，5 min 内雷暴大风站次最
138 多为 6 站次，出现在渤海北部沿海陆地（图 1a）。随后在 01:55 后快速减小，至 02:30 之间

139 存在峰谷。第二阶段在集中出现 02:30 后（图 1b），于 2:40—2:45 出现峰值，5 min 内雷暴
 140 大风站次最多为 7 个站次，并且集中出现在沈阳市区南部（图 1a）。因此本次雷暴大风过
 141 程集中出现在以上两个阶段，文中重点讨论雷暴大风站次再次增强期间风暴的结构特征以及
 142 为何如此集中的原因。



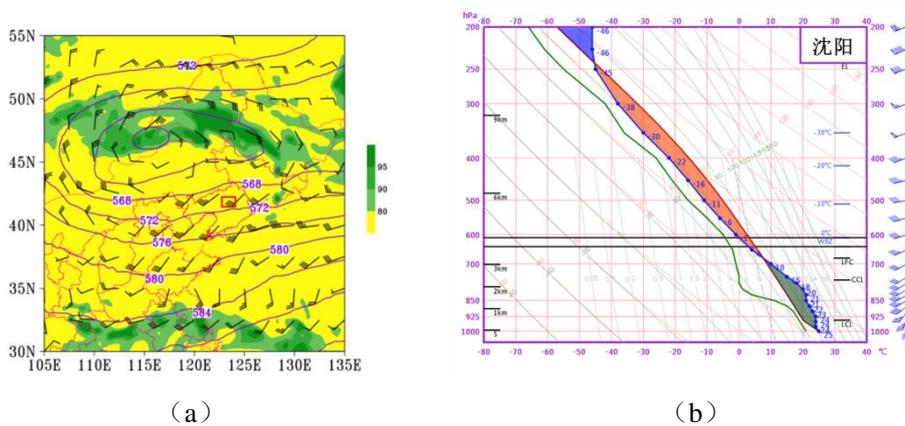
143 注：图 1a 中灰色点为自动站气象站，五角星为营口 SA 双偏振雷达位置，三角为沈阳 X 波段相控阵雷达位置。
 144 图 1 2023 年 7 月 7 日 (a) 00:00—4:00 辽宁雷暴大风分布图； (b) 01:00—3:00 逐 5 min 雷暴大风站次
 145 时间演变

146 Fig.1 Distribution of thunderstorm gusts in Liaoning from 0:00 to 4:00 on 7 July 2023 (a); time series of 5-min
 147 thunderstorm gusts number from 1:00 to 3:00 on 7 July 2023 (b)

148 3.2 天气形势

149 7 月 6 日 500 hPa 天气形势显示（图 2a），东北冷涡中心刚刚进入内蒙古，最外围环流
 150 圈位势高度为 564 dagpm，辽宁位于东北冷涡的东南象限，为大尺度上升运动区。另外，在
 151 内蒙古东南部和辽宁交界处，存在冷中心，中心温度为-12°C（图略）。

152 850 hPa（图 2a），东北冷涡底部存在明显的切变线，主要影响华北地区，而辽宁位于
 153 切变线东侧暖湿气流中，探空观测和 ERA5 再分析资料均显示大气低层风速达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。
 154 低空急流不仅有利于输送渤海水汽至辽宁中部，还有利于加强低层垂直风切变。



155 注：图 2a 中红色方框为沈阳市区位置。
 156 图 2 2023 年 7 月 (a) 6 日 20:00500hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）、850 hPa 风场（风向杆）和
 157 相对湿度（填色，单位：%）； (b) 7 日 01:00 沈阳 T-lnP 图

158 Fig. 2 Geopotential height (solid line, interval: 4 dagpm) at 500 hPa, relative humidity (shading, unit: %)
 159 and wind (barb) at 850 hPa at 20: 00 BT 6 July 2023 (a); skew T-lnP diagram in Shenyang at 1:00 BT 7 July
 160 2023 (b)

161 3.3 水汽、不稳定和风垂直切变

162 大气层结方面，沈阳受低空急流输送暖空气影响，850 hPa 气温为 21°C。而地面温度在
 163 夜间降温明显，仅为 25°C，与 850 hPa 的温度差仅为 4°C，近地面为稳定的温度层结。但是
 164 850 hPa 与 500 hPa 存在明显的“上冷下暖”的温度层结，温度差达到 33.5°C（表 1），垂直减
 165 温率极大，标准化距平绝对值达到 2.6 个 σ 。通常标准化距平绝对值达到 2.5 个 σ 即可视为
 166 非常强的异常（孙军等，2012），所以本次过程具有较以往过程更强的静力不稳定条件，是
 167 引起本次过程极端性的主要因子。已有研究也证实强静力不稳定是形成区域性雷暴大风天气
 168 最重要的参数（Doswell III and Evans, 2003; Coniglio et al, 2012）。这种层结下，CAPE
 169 分别为 2020 J·kg⁻¹，下沉对流有效位能达到 1446 J·kg⁻¹，当以上两个参量均超过 1000 J·kg⁻¹
 170 时，非常有利于雷暴大风天气的出现（杨磊和郑永光，2023）。

171 水汽方面，尽管 850—700 hPa 最大相对湿度仅 52.2%，但是在低空急流输送水汽的作
 172 用下，大气可降水量 PWV 为 39.3 mm，925 hPa 比湿为 14 g·kg⁻¹，以上绝对水汽参量略高
 173 于气候态上同月雷暴大风发生时需要的水汽条件（杨磊和郑永光，2023）。另外，500—400
 174 hPa 最低相对湿度和 LCL 至地面最低相对湿度分别为 68.2%和 69.1%。由于低的相对湿度更
 175 有利于降水蒸发，会在近地面形成更强的冷池，所以后文分析也发现，本次过程较高的相对
 176 湿度导致冷池并没有以往过程那么强。

177 垂直风切变方面，0—6 km 和 0—1 km 风矢量分别达到 18 m·s⁻¹和 13 m·s⁻¹，达到了
 178 强垂直风切变的标准，有利于风暴的维持发展，进而延长强对流天气的时间；另一方面也会
 179 形成强上升运动，通过扭转项形成 γ 中尺度涡旋（Weisman and Klemp, 1982; Trapp and
 180 Weisman, 2003; Atkins and Laurent, 2009a; 2009b）。

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

186

187 表 1 2023 年 7 月 7 日 1 时沈阳环境参数和东北冷涡雷暴大风形成环境条件统计结果对比

188 Table1 Comparison between environmental conditions in Shenyang at 1:00 BT on 7 July 2023 and thunderstorm
 189 gusts in Northeast China

物理量名称	本次过程 沈阳环境参数平均 值	东北冷涡东南象限 雷暴大风统计结果		本次过程沈阳与统计结果 标准差
		平均值	方差	
925hPa 比湿 (g·kg ⁻¹)	14.2	13.0	2.4	0.5

大气可降水量 PWV (mm)	39.3	41.8	7.3	-0.3
850—700 hPa 最大相对湿度 (%)	52.2	75.2	10.7	-2.1
500—400 hPa 最低相对湿度 (%)	68.2	48.8	22.7	0.9
LCL 至地面最低相对湿度 (%)	69.1	66.0	15.3	0.2
CAPE ($J \cdot kg^{-1}$)	2020.3	1777.8	849.1	0.3
DCAPE ($J \cdot kg^{-1}$)	1446.3	1007.8	303.9	1.4
850hPa 与 500hPa 温度差 ($^{\circ}C$)	33.5	28.7	1.8	2.6
地面与 850hPa 温度差 ($^{\circ}C$)	3.6	6.8	1.9	-1.7
0-6 km 风矢量差 ($m \cdot s^{-1}$)	18.7	16.5	5.8	0.4
0-1 km 风矢量差 ($m \cdot s^{-1}$)	13.3	7.5	4.3	1.3

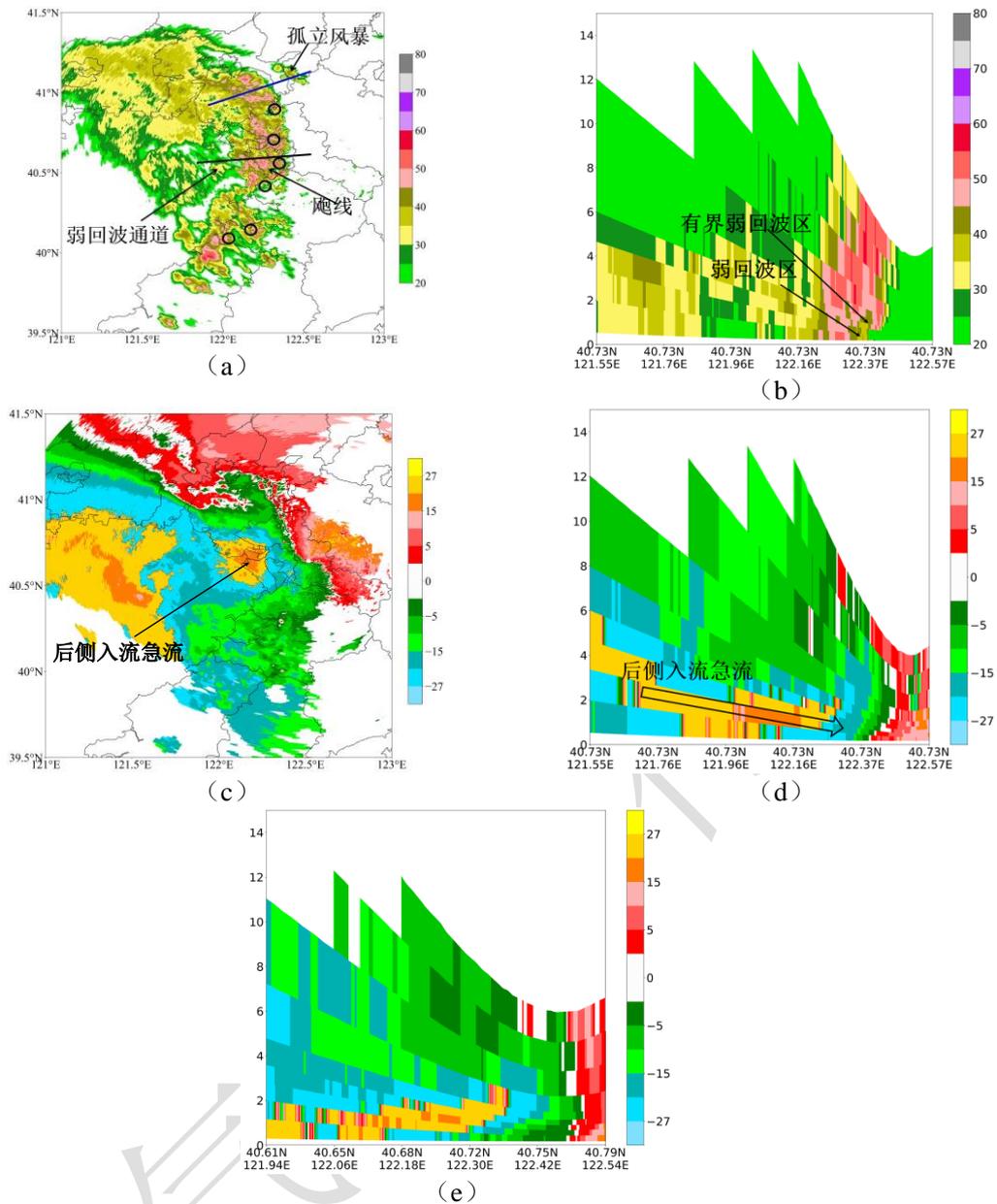
190 4. 对流风暴和 MV 演变特征

191 4.1 飏线登陆渤海湾产生初期雷暴大风

192 6 日夜间, 华北地区触发的风暴在强静力不稳定和垂直风切变的环境下, 发展为飏线(图
193 略)。7 日 01:23 (图 3a), 该飏线经过渤海后, 向辽宁中部地区移动, 40 dBz 以上回波尺
194 度达到 180 km, 尽管其南端存在断裂, 但是整个风暴是准连续的, 达到俞小鼎等 (2020)
195 对飏线定义的标准。该飏线逐渐向东北方向移动, 和以往常见的向南移动的雷暴大风过程存
196 在不同 (蒋超等, 2024; Xu et al, 2024a), 这与本次过程中辽宁位于东北冷涡东南象限,
197 引导气流为西南风有关。

198 在飏线的前沿, 入流一侧存在反射率因子梯度大值区 (图 3a), 垂直结构上, 风暴移
199 动方向前侧, 低空存在弱回波区, 中层存在有界的弱回波区 (图 3b), 以上特征说明风暴
200 移动前侧存在强上升气流。而在风暴移动方向的后侧存在弱回波通道 RIN (图 3a), 径向
201 速度图上表明存在 RIJ (图 3c, 3d), 低仰角出现速度模糊, 最大速度达到 $-37.5 m \cdot s^{-1}$, 距
202 地面高度 370 m, 有利于地面出现雷暴大风。所以在 01:20—01:25, 飏线产生 6 个站次雷暴
203 大风。但是从大风的分布上来看, 雷暴大风分布较为分散, 这是因为飏线中镶嵌着多个尺度
204 更小的下击暴流, 这些下击暴流是造成大风的直接原因 (孙继松, 2023; 王秀明等, 2023)。
205 随后飏线向东北方向移动, 大风站次逐渐减少。

206 在飏线登陆渤海湾的初期, 地面气温 1 h 最大降温仅 $4\sim 5^{\circ}C$ (图略), 显著低于以往白
207 天雷暴大风过程 (Xu et al, 2024a), 这与上文提到的 500—400 hPa 最低相对湿度和近地面
208 相对湿度较高有关。由于强的冷池更有利于出现弓状回波特征 (Atkins and Laurent, 2009a;
209 2009b), 所以此时飏线没有出现弓状特征。



210 图3 2023年7月7日01:23 (a) 营口雷达0.5°仰角反射率因子(单位: dBz), (b) 径向速度(单位:
 211 $m \cdot s^{-1}$), (c) 沿着图a中黑色直线反射率因子(单位: dBz), (d) 径向速度垂直剖面图(单位: $m \cdot s^{-1}$)
 212 和(e) 01:46 径向速度垂直剖面图(单位: $m \cdot s^{-1}$)

213 Fig. 3 Radar reflectivity (unit: dBz) (a) and radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) (b) at 0.5° elevation angle
 214 at 1:23 BT 7 July 2023, and vertical cross section of reflectivity (c) and radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) (d)
 215 along the black line in Fig. a; the vertical cross section of radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) at 01:46 BT along the blackline
 216 in Fig. a (e)

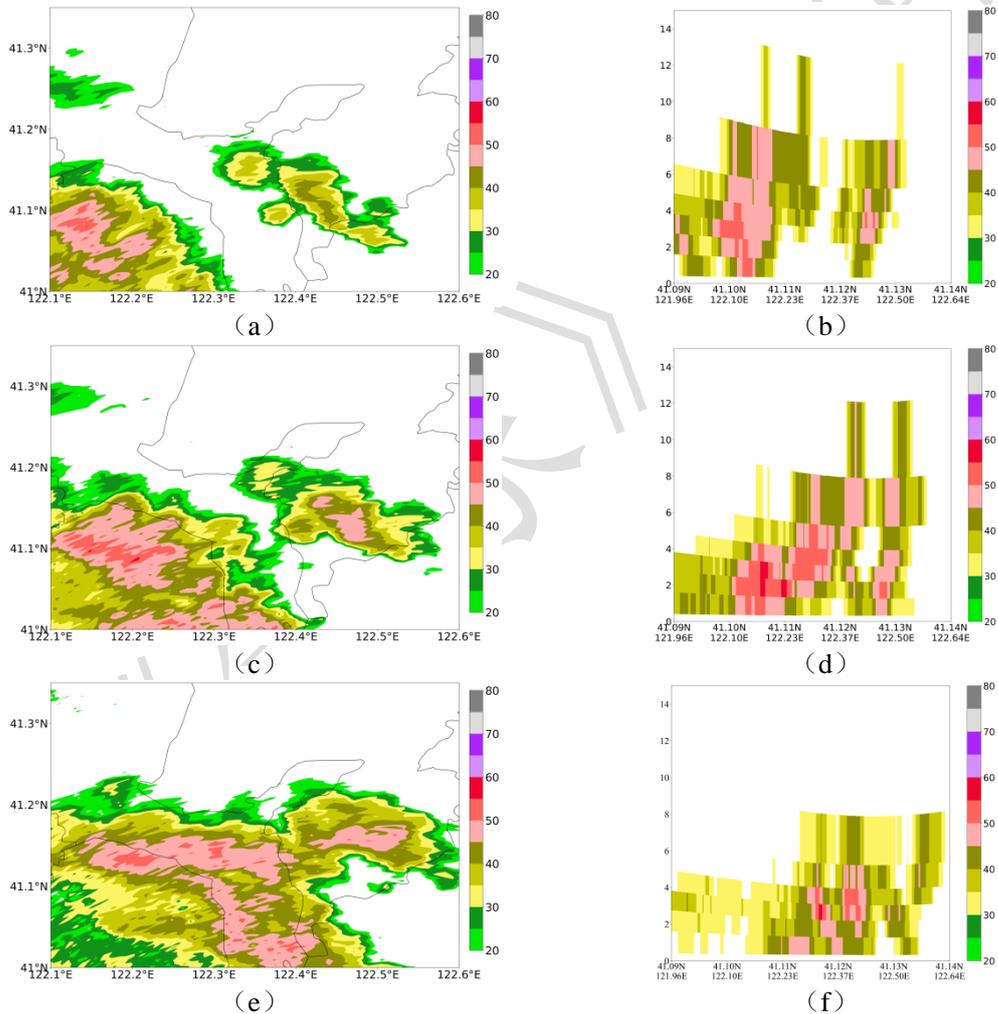
217 4.2 合并型弓状回波导致大风再次增多

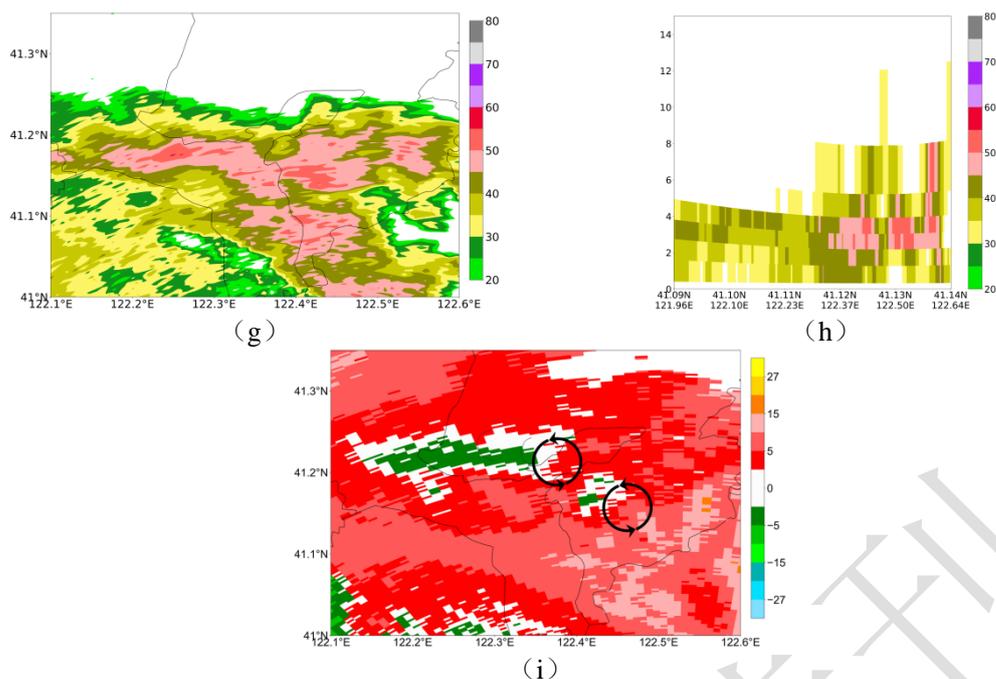
218 4.2.1 风暴合并后出现MV

219 01:23 (图 4a, 4b), 在飗线的北端、移动方向的前侧存在着孤立风暴。01:29—01:40
 220 (图 4c~4h), 飗线和孤立风暴在 2~4 km 处快速合并。从 01:40 雷达图像可见 (图 4g),
 221 合并风暴尽管没有出现弓状结构, 但在风暴合并处出现两个逆时针旋转的MV (图 4i)。其

222 中南侧的 MV 旋转速度较弱，持续时间也较短，而北侧 MV 的旋转更强，初始旋转速度为
223 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，尺度为 8.6 km ，顶高为 3.3 km ，低高为 1.8 km ，厚度仅为 1.5 km ，极其浅薄。
224 MV 初生阶段的旋转强度和垂直厚度均未达到中气旋的标准（Yu et al, 2012）。

225 MV 生成于风暴合并期间，生成位置也位于合并处。风暴合并常会造成更强的上升气流，
226 在强上升气流扭曲作用下，将此区域的水平涡度扭曲形成 MV 的初始涡旋（Lee et al, 2006；
227 French and Parker, 2012），这和华南合并型弓形回波过程 MV 形成特征相似（Zhou et al,
228 2020；Liu et al, 2023）。在以往风暴合并过程中，也出现过在风暴合并高度处生成 γ 中尺
229 度涡旋的现象（易笑园等, 2012；Zeng and Wang, 2022；杨磊等, 2023），以上研究均说
230 明风暴合并对 MV 的形成起到重要作用。另外，在 MV 生成的初始阶段，MV 附近没有出现
231 出现大风，合并风暴内 RIJ 呈现出明显的减弱趋势（图 3e），此阶段 5 min 雷暴大风站次出现
232 减少的现象（图 1b）。





注：图 i 中黑色实线圈内为 γ 中尺度涡旋，简称为 MV。

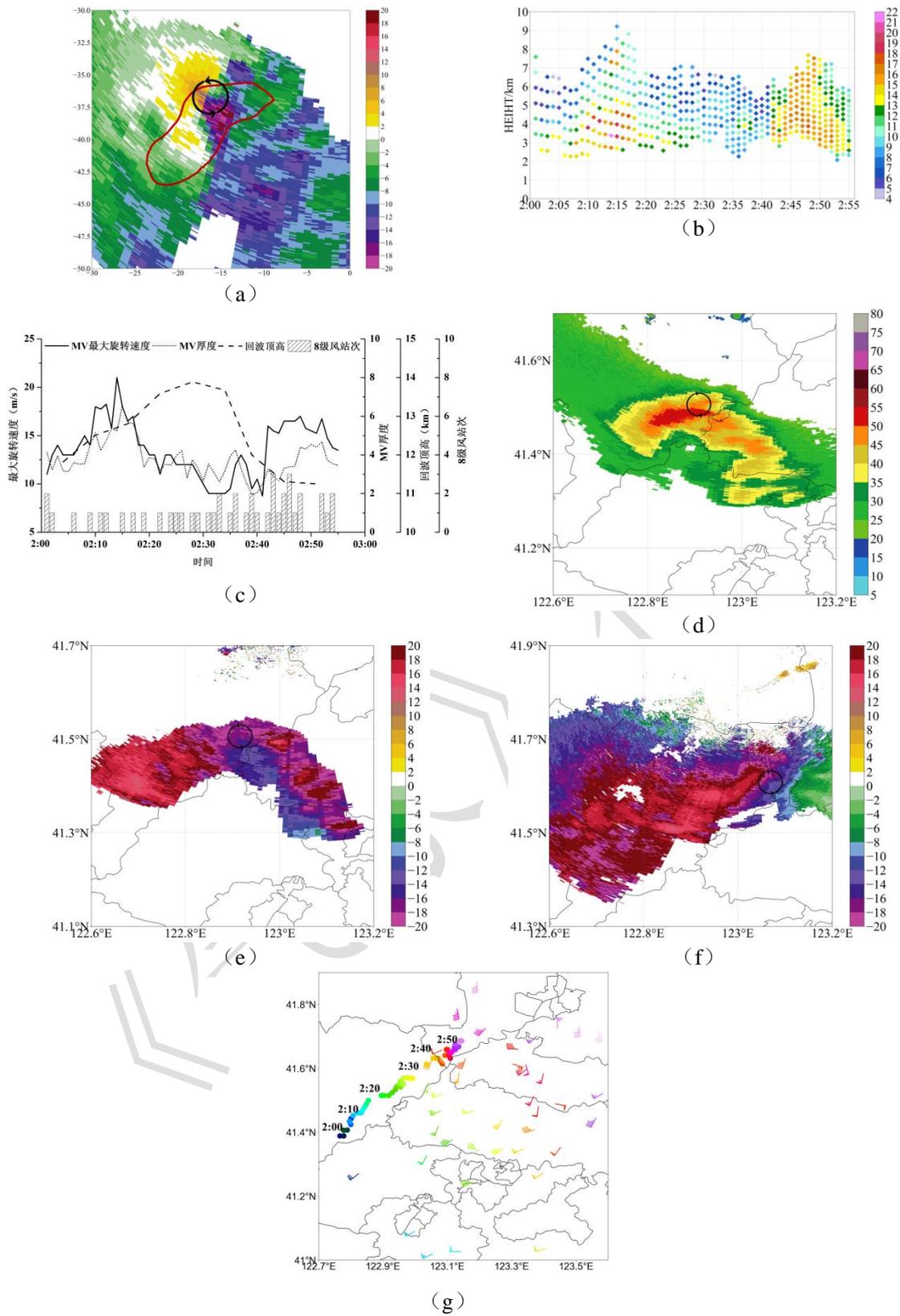
233
234 图 4 2023 年 7 月 7 日 (a, b) 01:23、(c, d) 01:29、(e, f) 01:35 和 (g, h) 01:40 (a, c, e) 反射率
235 因子图和 (b, d, h) 沿着图 3a 中蓝色直线的反射率垂直剖面；(i) 01:40 2.4° 仰角营口雷达径向速度 (单
236 位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

237 Fig. 4 The radar reflectivity and vertical cross section of radar reflectivity (unit: dBZ) (a) at 1:23 (a-b)、1:29
238 (c-d)、1:35 (e-f) and 1:40 (g-h) BT 7 July 2023 along the white line in Fig. 3a; the radial velocity (unit:
239 m/s) (i) at 2.4° elevation angle at 1:40 BT 7 July 2023 (the solid circle is mesovortex, MV)

241 4.2.2 相控阵雷达观测到的 MV 精细特征

242 随着合并风暴向东北方向移动, MV 始终位于其北端 (图略)。7 日 02:00 后, 合并风
243 暴进入位于沈阳西南侧的辽中区, 上文提到的位置偏北、旋转更强的 MV (图 4i) 开始被沈
244 阳相控阵雷达监测到。该 MV 位于反射率因子 > 35 dBZ 回波的北侧 (图 5a)。从相控阵雷
245 达观测到的 MV 的分钟级演变特征可见 (图 5b, 5c), 02:00—02:10 期间, MV 主要位于 2~6
246 km。随后 MV 存在两次加强的特征, 其中在 02:10 开始出现第一次旋转加强且向上垂直伸
247 展的特征, 02:15 发展最强盛, 顶高达到 9.2 km, 底高为 2.8 km, 厚度达到 6.4 km, 其中低
248 层 3~5 km 范围内旋转速度更强, 达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 满足中等强度中气旋的标准 (Yu et al,
249 2012)。而第二次发生在 02:47 后, 厚度最强仅 4.6 km, 最强旋转速度 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 第二次加
250 强特征较第一次弱。

251 本次 MV 生成的高度约在 2~3 km, 形成初期较为浅薄, 强烈旋转的位置位于 MV 的低
252 层, 这与以往位于经典弓状回波头部、形成于低空且旋转中心常位于低层的 MV 一致 (Trapp
253 and Weisman, 2003; Atkins et al, 2009a; 2009b), 但是本次 MV 垂直伸展厚度要显著高于
254 以上经典型弓形回波 MV, 另外本次 MV 的底高要高于华南合并型弓形回波过程 (Zhou et al,
255 2020; Liu et al, 2023), 这也可能是 MV 旋转加强后地面没有立刻出现大风的原因。



257 注：图 5a 中红色线为反射率因子为 35 dBz 等值线；图 a、图 d~图 f 中黑色圆圈内为相应仰角 MV。
 258 图 5 2023 年 7 月 7 日 (a) 02:15:54 仰角沈阳相控阵雷达径向速度图，(b) 02:00-02:55 不同高度上 MV
 259 旋转速度的时间演变，(c) 02:00—02:55 逐分钟 MV 最大旋转速度（单位: km）、厚度（单位: km）、MV

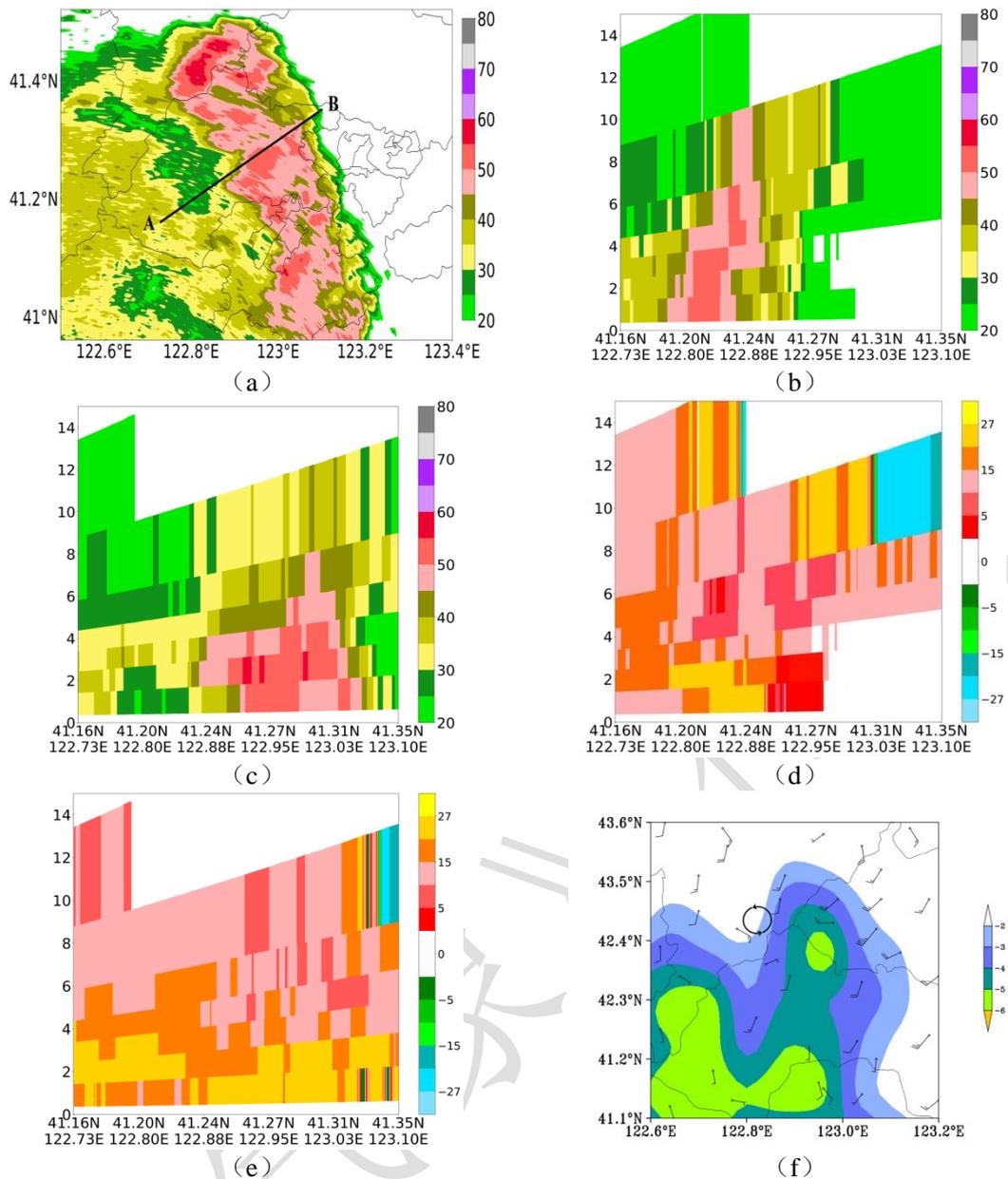
260 处回波顶高 (单位: km) 和逐分钟 8 级以上雷暴大风出现站次 (单位: 个) 的时间演变, (d) 02:22 8.1° 仰
261 角反射率因子 (单位: dBz); (e) 02:15 和 (f) 02:40 0.9° 仰角径向速度图 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (g) 02:00—03:00 MV
262 和雷暴大风的分布 (MV 和雷暴大风的颜色相同时表示发生时刻一致)

263 Fig. 5 The radial velocity (unit: m/s) at 2.4° elevation angle Shenyang X-band dual-polarization phased-array
264 radar at 2:15 BT 7 July 2023 (the thick black line is the contour with a reflectivity factor of 35 dBz) (a); Time
265 —height evolution of the MV rational velocity from 2:00 BT to 2:55 BT (b); Time evolution of MV maximum
266 rotation speed (unit: km), MV thickness (unit: km), echo top at MV (unit: km), and 1-min thunderstorm gusts
267 number from 2:00 to 2:55 (c); The radar reflectivity (unit: dBz) at 8.1° elevation angle at 2:22 BT 7 July 2023
268 (d); The radial velocity at 0.9° elevation angle at 2:15 BT (e) and 2:40 BT (f) (unit: m/s) (the solid circle
269 is mesovortex, MV); The distribution of MV and thunderstorm gales from 2:00 to 2:55 BT 7 July 2023 (g)

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

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

283 综上, MV 首次加强发生在合并风暴演变为弓状回波并导致雷暴大风发生前, 对雷暴大
284 风再次增加有指示意义, 因此有必要分析首次加强的原因。在 02:04—02:10 (图 6a~6c),
285 距离 MV 南侧约 17 km 处, >50 dBz 的回波顶高从 7 km 快速下降到 5 km 处; 径向速度图
286 上 (图 6d~6e), 在强回波下降区域, $>21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流出速度区域存在增加的现象, 以上雷
287 达特征说明此处出现下击暴流 (王秀明等, 2023)。下击暴流在地面形成较之前更强的冷池,
288 1 h 变温最大达到 -5°C (图 6f), MV 恰好位于该冷池移动方向的前侧的北边界。

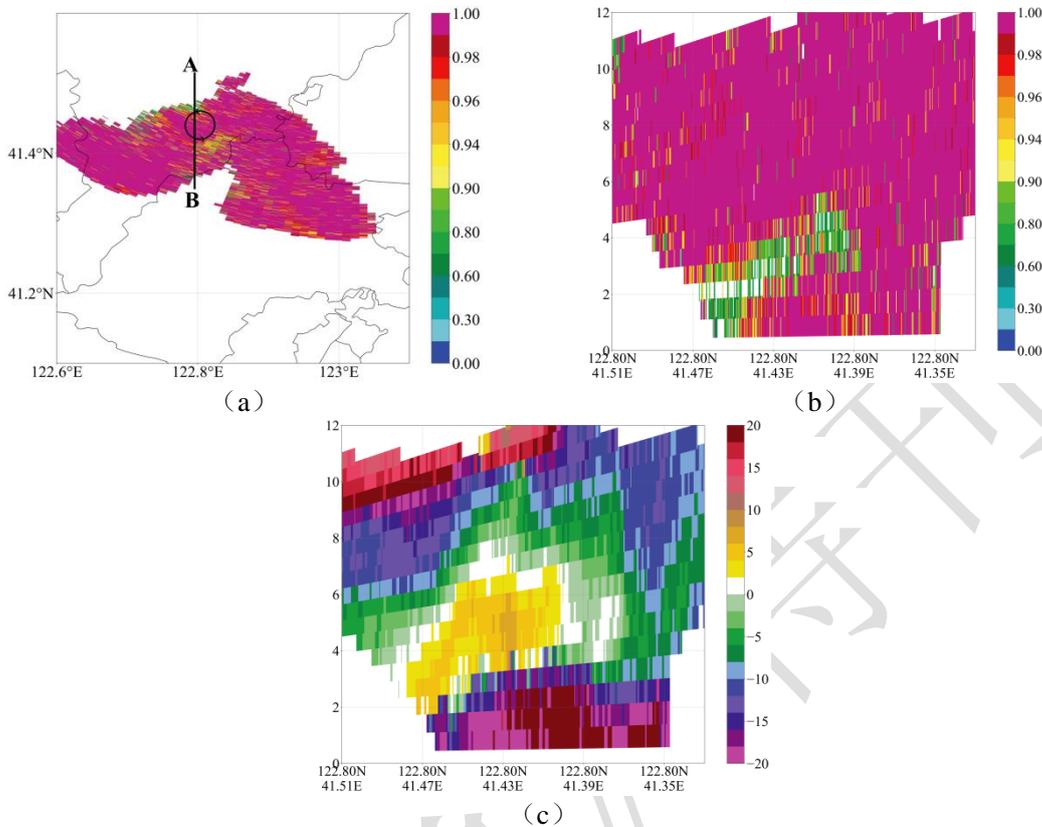


289 图 6 2023 年 7 月 7 日 (a) 02:10 营口 SA 雷达 0.5° 仰角反射率因子图；(b) 02:04、(c) 02:10 沿着图
 290 6a 中黑色直线的反射率垂直剖面；(e) 02:04、(f) 02:10 沿着图 6a 中黑色直线的径向速度垂直剖面；(f)
 291 02:15 地面 1 h 变温（填色，单位：°C）和风场（风向杆）

292 Fig. 6 Radar reflectivity (unit: dBz) at 0.5° elevation angle at 2:10 BT 7 July 2023 (a); The vertical cross
 293 section of radar reflectivity at 2:04 BT (b) and 2:10 BT (c) along the white line in Fig. a; The vertical cross
 294 section of radial velocity at 2:04 BT (d) and 2:10 BT (e) along the white line in Fig. a; 1-hour temperature
 295 variation (shading, unit: °C) and wind at surface (barb) at 2:15 BT (f);

296 02:10 的相控阵雷达资料显示（图 7a, 7b），在风暴移动前侧存在 CC 低值区，CC 仅
 297 为 0.7，CC 低值区向上伸展到 5 km 附近，并向合并风暴的后侧倾斜。其中近地面 CC 低值
 298 区位于冷池边缘，该 CC 低值区的出现表征更强冷池前侧形成强上升气流，将近地层的树叶、
 299 杂草、昆虫等碎屑卷入到空中，进而形成 CC 低值区（Kumjian and Ryzhkov, 2008）。而 2~5
 300 km 处，径向速度剖面图（图 7c）显示此区域存在风场辐合特征，表征风暴移动前侧存在上

301 升气流，此区域也常存在 CC 低值区。因此，风暴移动前侧近地面到 5 km 的低值区是由冷
 302 池边缘的上升气流和风暴内原本存在上升气流的共同作用导致，在上升气流的拉伸作用下，
 303 MV 得以垂直发展（图 5b, 5c）。



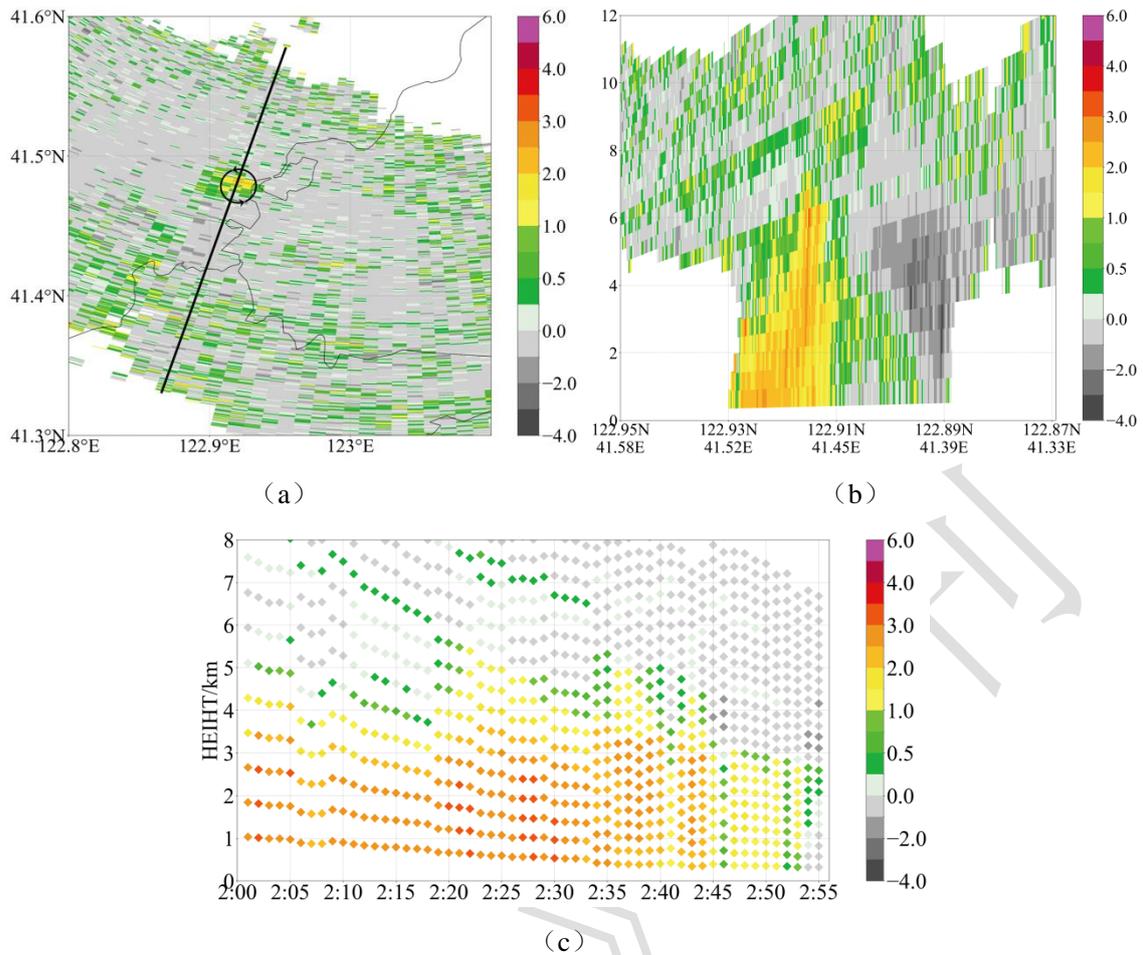
304 图 7 2023 年 7 月 7 日 02:11 (a) 沈阳相控阵雷达 0.9 仰角相关系数分布及 (b) CC、(c) 径向速度沿图
 305 7a 黑色直线的垂直剖面

306 Fig. 7 The distribution of CC at 0.9° elevation angle (a), the vertical profile of CC(b) and radial velocity(c)
 307 along the black line in Fig.a at 2:11 BT 7 July 2023

308 4.2.3 MV 对雷暴大风的影响机制

309 MV 第一次加强后,02:16 的相控阵雷达监测到 MV 处出现 Z_{DR} 加强的特征,达到 2~3 dB
 310 (图 8a), $Z_{DR} > 1$ dB 的伸展高度可达 5 km (图 8b), 发展高度超过 0°C 层 (图 2b), 满
 311 足 Z_{DR} 柱的标准,表征风暴在此区域存在强的上升气流 (Illingworth et al, 1987; Bringi et al,
 312 1991)。这证实旋转加强的 MV 形成更强上升运动,将暖湿气流输送到风暴中,进而导致
 313 风暴加强,所以上文发现 MV 旋转加强后,合并风暴的回波顶高最高处出现在 MV 上空并
 314 逐渐升高的现象 (图 5c)。MV 处的风暴发展更加旺盛,具有更长的生命史,进而延长雷
 315 暴大风的持续时间。

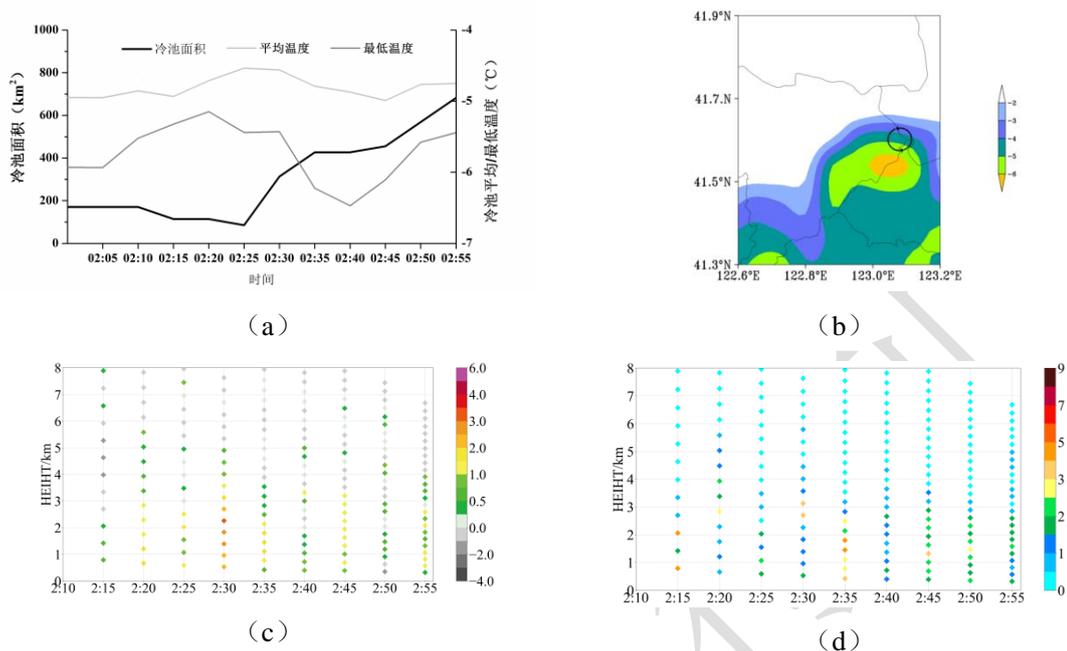
316 另外,图 8c 给出 MV 处 Z_{DR} 垂直廓线的演变。在 MV 旋转最强的 02:15 时,其上空也
 317 没有出现 Z_{DR} 加强的现象,而是在 4 min (即 02:19) 后, MV 处才出现 Z_{DR} 增加的现象。 Z_{DR}
 318 在 02:22 伸展高度最高,达到 5.5 km,随后 MV 处 Z_{DR} 柱出现降低的现象。结合 MV 旋转特
 319 征发现,在 MV 伸展高度达到最高 (02:15) 的 7 min 后, MV 处的 Z_{DR} 柱伸展高度最高。



320 图 8 2023 年 7 月 7 日 (a) 02:16 分 9.9° 仰角差分反射率因子水平分布图和 (b) 沿着图 8a 黑色直线剖面
 321 (单位: dB) ; (c) 02:00—2:55 MV 处 Z_{DR} 平均值的时间演变 (单位: dB)
 322 Fig.8 Z_{DR} (unit: dB) at 9.9° elevation angle (a) and the vertical cross section of Z_{DR} (b) along the white
 323 line in Fig. a at 2:16 BT 7 July 2023; Time evolution of ZDR average at MV from 2:00 BT to 2:55 BT 7 July 2023
 324 (unit: dB) (c)

326 另外, 从 MV 附近冷池特征的时间演变来看 (图 9a), 在 MV 第一次旋转加强
 327 (02:10—02:15) 和 MV 处 Z_{DR} 加强 (02:20—02:25) 期间, 冷池特征均较弱, 冷池面积 <
 328 200 km^2 , 平均温度和最低温度反而出现升高的现象。而在 Z_{DR} 特征减弱后, 冷池出现迅速
 329 加强的特点, 首先冷池面积迅速扩大, 在 02:25—02:35 期间, 冷池面积从 170 km^2 迅速增加
 330 到 426 km^2 , 随后继续扩大, 而最低温度和平均温度在 02:30 出现迅速降低的现象, 分别在
 331 02:40 和 02:45 达到最低值, 为 -6.5°C 和 -5.0°C (图 9b)。强的冷池有利于 RIJ 的形成, 上文
 332 提到也是在 02:40 后 MV 移动方向的后侧出现 RIJ (图 5f)。而冷池的形成与风暴内微物理
 333 过程有关, 从冷池偏振参量特征来看 (图 9c, 9d), 在 MV 形成强上升气流的时段后, 冷
 334 池上空 Z_{DR} 和 K_{DP} 分别在 02:30 和 02:35 出现迅速增大的现象, 达到 $1\sim 4 \text{ dB}$ 和 $2.5\sim 5 \text{ }^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,
 335 意味着冷池上空出现数量更多、尺度更大的降水粒子。但是在 02:40 均出现迅速减小的现象,
 336 5 min 内 Z_{DR} 和 K_{DP} 分别减小到 $0.25\sim 1 \text{ dB}$ 和 $0\sim 1 \text{ }^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 说明冷池上方水凝物的数量和

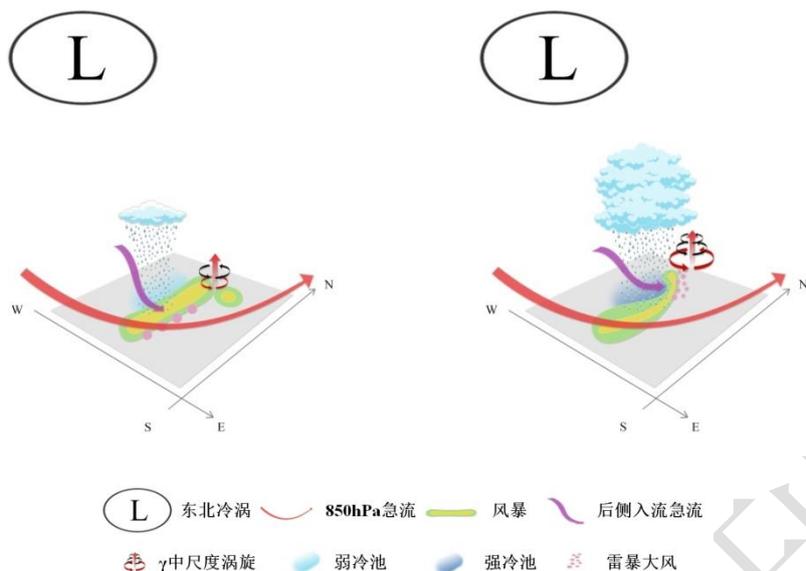
337 尺度均在快速减小，水凝物的升华、融化和蒸发会吸收大气中的热量，进而导致 02:40 后出
 338 现冷池加强，并促进 RIJ 的形成 (Mahoney and Lackmann, 2011; Adams-Selin and Johnson,
 339 2013; Zhou et al, 2020)。



340 图9 2023年7月7日02:00—02:55 (a)冷池特征演变, (b)02:40地面温度1h变化量(单位: °C)分
 341 布(圆圈为MV); (c)冷池上空差分反射率因子(单位: dB)和(d)差分传播相移率(单位: °·km⁻¹)
 342 时间演变

343 Fig. 9 Time Evolution of the characteristics of cold pool from 2:00 BT to 2:55 BT 7 July 2023 (unit: dB) (a);
 344 1-hour temperature variation (shading, unit: °C) at 2:40 BT (the solid circle is MV) (b); Time evolution of ZDR
 345 (unit: dB) (c) and K_{DP} (unit: °/km) (d) of cold pool from 2:10 BT to 2:55 BT 7 July 2023

346 本次过程MV的底高由于高于经典弓形回波内的MV (Schenkman and Xue, 2016) 和
 347 华南合并型弓形回波过程 (Zhou et al, 2020; Liu et al, 2023), 不会直接造成地面出现大
 348 风, 但会通过影响风暴内部动力和微物理过程, 导致强的冷池和RIJ, 进而其下方出现更多
 349 的雷暴大风, 总结形成过程的概念模型(图10): 风暴合并初期(图10a), 由于夜间近地
 350 面相对湿度并没有白天那么低, 所以地面冷池较弱, 风暴没有出现弓形特征; 尽管合并过程
 351 形成MV, 但是RIJ出现减弱的现象, 造成的大风站次逐渐减少. MV旋转加强后(图10b),
 352 形成更强的上升运动, 导致风暴内出现数量更多、尺度更大的降水粒子, MV处的风暴出现
 353 弓形特征; 当上升气流减弱后, 这些降水粒子在下落过程中通过蒸发作用导致地面冷池强度
 354 加强、面积扩大, MV下方的RIJ也迅速加强, 最终在MV的后侧、加强冷池和RIJ的区域
 355 集中出现更多站次的雷暴大风。



356

357

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

359 Fig.10 Schematic diagram of the impact mechanism of MV on merged bow echoes and thunderstorm winds

360

(a) Early stage of MV formation; (b) MV enhancement

361 5. 结论与讨论

362 本次针对东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋对合并型弓状回波过程的影响机制进行分析, 得
363 到以下结论:

364 (1) 辽宁位于东北冷涡东南象限, 受低空切变线和低空急流影响, 具有极端的 850 hPa
365 与 500 hPa 温度差等有利条件, 因此辽宁出现了雷暴大风天气。但是夜间近地面相对湿度接
366 近 70%, 所以飚线初期并没有形成强冷池, 也没有弓状特征, 造成的大风较为分散。

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

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

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

378 本次过程中, MV 主要通过影响风暴的热动力和微物理过程, 进而造成更强的雷暴大风。
379 本文仅是对东北冷涡背景下合并型弓状回波的个例进行研究, 东北冷涡背景下常会生成多个
380 风暴, 也常发生风暴合并的现象, 风暴合并有利于风暴加强并出现不同类型 γ 中尺度涡旋,

381 因此今后需要加强东北冷涡背景下风暴合并过程 γ 中尺度涡旋观测特征的统计研究, 并加强
382 利用相控阵雷达和自动气象站等资料研究不同类型 γ 中尺度涡旋及环境条件相互作用对大
383 风的影响机制, 同时研发 γ 中尺度涡旋和冷池观测特征的客观识别分析技术, 以便提升极端
384 天气的预警能力。

385 参考文献:

- 386 蒋超, 陈传雷, 张凯, 等, 2024. 辽宁地区飑线特征和形成条件[J]. 气象, 50(7): 791-803. Jiang C, Chen C L,
387 Zhang K, et al, 2024. Squall line characteristics and formation conditions in Liaoning Province[J]. Meteor
388 Mon, 50(7): 791-803 (in Chinese).
- 389 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和應用[J]. 气象科技进展, 6(3):
390 28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and
391 phased-array radar[J]. Advances in Met S&T, 6(3): 28-33 (in Chinese).
- 392 曲晓波, 王建捷, 杨晓霞, 等, 2010. 2009 年 6 月淮河中下游三次飑线过程的对比分析[J]. 气象, 36(7):
393 151-159. Qu X B, Wang J J, Yang X X, et al, 2010. Contrast analysis of three squall lines in middle and lower
394 reaches of the Huaihe River in June 2009[J]. Meteor Mon, 36(7): 151-159 (in Chinese).
- 395 孙继松, 2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J]. 气象, 49(1): 1-11. Sun J S, 2023.
396 The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear
397 convective gales[J]. Meteor Mon, 49(1): 1-11 (in Chinese).
- 398 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气
399 象, 38(10): 1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21
400 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon,
401 38(10): 1267-1277 (in Chinese).
- 402 孙敏, 赵畅, 吴君靖, 等, 2023. 一次夜间 β 中尺度弓形回波形成机制机理研究[J]. 气象, 49(10): 1187-1202.
403 Sun M, Zhao C, Wu J J, et al, 2023. Study on the formation mechanism of a nocturnal meso- β scale bow
404 echo[J]. Meteor Mon, 49(10): 1187-1202 (in Chinese).
- 405 王秀明, 俞小鼎, 费海燕, 等, 2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. 气象, 49(2): 129-145. Wang
406 X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon,
407 49(2): 129-145 (in Chinese).
- 408 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
409 象学报, 81(2): 205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused
410 by two types of weather storms during a strong convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 205-217 (in
411 Chinese).
- 412 许长义, 章丽娜, 肖琨, 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):
413 40-57. Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, et al, 2023. Case analysis of damaging high winds generated by bow
414 echoes in the presence of a cold vortex over the North China Plain[J]. Acta Meteor Sin, 81(1): 40-57 (in
415 Chinese).
- 416 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.
417 Yang L, Zheng Y G, 2023. Observational characteristics of thunderstorm gusts in Northeast China and their
418 association with the Northeast China Cold Vortex[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 416-429 (in Chinese).
- 419 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
420 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

421 vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing
422 mechanisms[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(1): 19-39 (in Chinese).

423 易笑园, 张义军, 沈永海, 等, 2012. 一次海风锋触发的多单体雷暴及合并过程的观测分析[J]. *气象学报*,
424 70(5): 974-985. Yi X Y, Zhang Y J, Shen Y H, et al, 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm
425 triggered by a sea-breeze front and its merging process[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(5): 974-985 (in Chinese).

426 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 120. Yu X D, Wang X M,
427 Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological
428 Press: 120 (in Chinese).

429 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*,
430 39(2): 218-229. Zhang Y, Chen B H, Zeng L, et al, 2023. X-band dual-polarization phased-array radar
431 observations of a supercell[J]. *J Trop Meteor*, 39(2): 218-229 (in Chinese).

432 郑永光, 宋敏敏, 2021. 冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J]. *热带气象学报*, 37(5-6): 710-720.
433 Zheng Y G, Song M M, 2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective high winds
434 and hail in China[J]. *J Trop Meteor*, 37(5-6): 710-720 (in Chinese).

435 Adams-Selin R D, Johnson R H, 2010. Mesoscale surface pressure and temperature features associated with bow
436 echoes[J]. *Mon Wea Rev*, 138(1): 212-227.

437 Adams-Selin R D, Johnson R H, 2013. Examination of gravity waves associated with the 13 March 2003 bow
438 echo[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11): 3735-3756.

439 Atkins N T, Laurent M S, 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging
440 potential[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1497-1513.

441 Atkins N T, Laurent M S, 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5):
442 1514-1532.

443 Bluestein H B, Parker S S, 1993. Modes of isolated, severe convective storm formation along the dryline[J]. *Mon*
444 *Wea Rev*, 121(5): 1354-1372.

445 Bringi V N, Burrows D A, Menon S M, 1991. Multiparameter radar and aircraft study of raindrop spectral
446 evolution in warm-based clouds[J]. *J Appl Meteor*, 30(6): 853-880.

447 Burke P C, Schultz D M, 2004. A 4-Yr climatology of cold-season bow echoes over the continental United
448 States[J]. *Wea Forecasting*, 19(6): 1061-1074.

449 Coniglio M C, Corfidi S F, Kain J S, 2012. Views on applying RKW theory: An illustration using the 8 May 2009
450 derecho-producing convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 140(3): 1023-1043.

451 Doswell III C A, Evans J S, 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of
452 similarities and differences[J]. *Atmos Res*, 67-68: 117-133, doi: 10.1016/S0169-8095(03)00047-4.

453 Finley C A, Cotton W R, Pielke Sr R A, 2001. Numerical simulation of tornadogenesis in a high-precipitation
454 supercell. Part I: storm evolution and transition into a bow echo[J]. *J Atmos Sci*, 58(13): 1597-1629, doi:
455 10.1175/1520-0469(2001)058<1597:NSOTIA>2.0.CO;2.

456 French A J, Parker M D, 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell
457 thunderstorms[J]. *Wea Forecasting*, 27(2): 255-278, doi: 10.1175/WAF-D-11-00058.1.

458 French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell
459 merger[J]. *Mon Wea Rev*, 142(12): 4791-4822.

460 Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago: Satellite and
461 Mesometeorology Research Project, University of Chicago.

462 Illingworth A J, Goddard J W F, Cherry S M, 1987. Polarization radar studies of precipitation development in
463 convective storms[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113(476): 469-489.

464 Klimowski B A, Bunkers M J, Hjelmfelt M R, et al, 2003. Severe convective windstorms over the northern High
465 Plains of the United States[J]. *Wea Forecasting*, 18(3): 502-519.

466 Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J, 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes[J].
467 *Wea Forecast*, 19(4): 727-734.

468 Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*,
469 47(7): 1940-1961.

470 LaPenta K D, Bosart L F, Galarneau T J, et al, 2005. A multiscale examination of the 31 May 1998 Mechanicville,
471 New York, Tornado[J]. *Wea Forecasting*, 20(4): 494-516, doi: 10.1175/WAF875.1.

472 Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: cell mergers and
473 associated tornado incidence[J]. *Wea Forecasting*, 21(4): 449-464, doi: 10.1175/WAF943.1.

474 Liu Q Q, Xu X, Zhao K, et al, 2023. A merger-formation bow echo caused by low-level mesovortex in South
475 China[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 128(8): e2022JD037954, doi: 10.1029/2022JD037954.

476 Mahoney K M, Lackmann G M, 2011. The sensitivity of momentum transport and severe surface winds to
477 environmental moisture in idealized simulations of a mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 139(5):
478 1352-1369, doi: 10.1175/2010MWR3468.1.

479 Meng Z Y, Zhang F Q, Markowski P, et al, 2012. A modeling study on the development of a bowing structure and
480 associated rear inflow within a squall line over South China[J]. *J Atmos Sci*, 69(4): 1182-1207.

481 Schenkman A D, Xue M, 2016. Bow-echo mesovortices: a review[J]. *Atmos Res*, 170: 1-13.

482 Siggia A D, Passarelli Jr R E, 2004. Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter
483 cancellation and moment calculation[C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Radar in
484 Meteorology. Visby: ERAD: 67-73.

485 Skamarock W C, Weisman M L, Klemp J B, 1994. Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall
486 lines[J]. *J Atmos Sci*, 51(17): 2563-2584.

487 Smull B F, Houze Jr R A, 1987. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation[J]. *Mon Wea Rev*,
488 115(12): 2869-2889.

489 Tao W, Zheng L L, Hao Y, et al, 2023. An extreme gale event in East China under the Arctic potential vorticity
490 anomaly through the Northeast China cold vortex[J]. *Adv Atmos Sci*, 40(12): 2169-2182.

491 Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: their genesis
492 and implications[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2804-2823.

493 Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind
494 shear and buoyancy[J]. *Mon Wea Rev*, 110(6): 504-520.

495 Weisman M L, Trapp R J, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: overview
496 and dependence on environmental shear [J]. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2779-2803.

497 Wolf P L, 1998. WSR-88D radar depiction of supercell-bow echo interaction: unexpected evolution of a large,
498 tornadic, “comma - shaped” supercell over eastern Oklahoma[J]. *Wea Forecasting*, 13(2): 492-504.

499 Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, 2024a. Evolution characteristics and mechanism of meso- γ -scale vortex in an atypical
500 bow echo in the North China Plain[J]. *Atmos Res*, 311: 107657, doi: 10.1016/j.atmosres.2024.107657.

501 Xu X, Xue M, Wang Y, 2015a. The Genesis of mesovortices within a real-data simulation of a bow echo system[J].
502 *J Atmos Sci*, 72(5): 1963-1986, doi: 10.1175/JAS-D-14-0209.1.

503 Xu X, Xue M, Wang Y, 2015b. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the Central United States:
504 analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model
505 simulation[J]. *Mon Wea Rev*, 143(6): 2266-2290, doi: 10.1175/MWR-D-14-00234.1.

506 Xu X, Ju Y Y, Liu Q Q, et al, 2024b. Dynamics of two episodes of high winds produced by an unusually long-lived
507 quasi-linear convective system in South China[J]. *J Atmos Sci*, 81(8): 1449-1473.

-
- 508 Yu X D, Wang X, Zhao J, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm
509 characteristics[C]//Preprints, 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: AMS.
- 510 Zeng Z L, Wang D H, 2022. On the local rain-rate extreme associated with a mesovortex over South China:
511 observational structures, characteristics, and evolution[J]. *Mon Wea Rev*, 150(5): 1075-1096.
- 512 Zhang L N, Sun J Z, Ying Z M, et al, 2021. Initiation and development of a squall line crossing Hangzhou Bay[J].
513 *J Geophys Res-Atmos*, 126(1): e2020JD032504.
- 514 Zhou A, Zhao K, Lee W C, et al, 2020. VDRAS and polarimetric radar investigation of a bow echo formation after
515 a squall line merged with a preline convective cell[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 125(7): e2019JD031719, doi:
516 10.1029/2019JD031719.
- 517 Zhou A, Zhao K, Xu X, et al, 2023. A climatological study on the two types of bow echoes over South China[J]. *J*
518 *Geophys Res-Atmos*, 128(18): e2023JD038720, doi: 10.1029/2023JD038720.