

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 T T,Zhu W J,Yao K,et al,2023. Mesoscale analysis of an extreme thunderstorm gale in central Jilin Province in 2021[J]. Meteor Mon,49(10):1215-1226(in Chinese).

# 2021 年吉林中部一次极端雷暴大风的中尺度成因分析<sup>\*</sup>

王婷婷<sup>1</sup> 朱文剑<sup>2</sup> 姚 凯<sup>1</sup> 全思航<sup>1</sup> 毕潇潇<sup>1</sup> 姚 瑶<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 吉林省气象台,长春 130062

<sup>2</sup> 国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 基于常规观测资料、地面加密自动气象观测站、多普勒天气雷达和 ERA5 再分析资料等,对 2021 年 9 月 9 日上午发生在吉林省中部一次罕见的极端雷暴大风的中尺度成因进行了详细分析。结果表明:产生雷暴大风的飑线系统是在深厚的东北冷涡配合大尺度锋生作用在冷锋尾部激发形成的。中层较强干空气和逆温层以下接近干绝热的温度递减率有利于极端雷暴大风产生。干暖盖的存在导致低层暖湿空气迅速增强,临近时刻 CAPE 值超过  $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,层结在短时间内变为极不稳定结构,夹卷层平均风达到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,动量下传有利于地面风速增强,极端雷暴大风发生在断裂后飑线尾部前沿  $\gamma$  中尺度涡旋附近,但涡旋附近 2 个站点极端雷暴大风形成原因明显不同,其中农大站极端雷暴大风发生时气压陡降,气温陡升且分钟降水量弱,是由飑线前侧强下沉辐散气流(冷池出流)在较强的偏南风气流作用下加速流入涡旋内部、辐合上升气流迅速增强导致,与其附近农博园站和长春站由降水粒子拖曳作用形成的强下沉辐散气流导致的极端雷暴大风明显不同。

**关键词:** 极端雷暴大风,飑线, $\gamma$  中尺度涡旋,辐合上升气流

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.083102

## Mesoscale Analysis of an Extreme Thunderstorm Gale in Central Jilin Province in 2021

WANG Tingting<sup>1</sup> ZHU Wenjian<sup>2</sup> YAO Kai<sup>1</sup> QUAN Sihang<sup>1</sup> BI Xiaoxiao<sup>1</sup> YAO Yao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062

<sup>2</sup> National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on conventional observation data, frequently observed data of automatic weather station, Doppler weather radar data and ERA5 reanalysis data, the mesoscale causes for a rarely-seen extreme thunderstorm gale in the central part of Jilin Province on the morning of 9 September 2021 is analyzed. The results show that the squall line system that produced thunderstorm was formed by the deep northeast cold vortex and the large-scale frontogenesis at the tail of the cold front. The strong dry air in middle layer and the temperature lapse rate closed to dry adiabatic below the inversion layer were conducive to the generation of extreme thunderstorm gale. The existence of dry and warm cover led to rapid enhancement of low-level warm and humid air, and the CAPE value surpassed  $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  at the nearing moment, which made the stratification become extremely unstable in a short period of time. The average wind speed in the entrainment layer was above  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the downward transfer of momentum was beneficial to the enhancement of ground wind speed. The extreme thunderstorm gale occurred near the meso- $\gamma$  scale vortex in

<sup>\*</sup> 吉林省气象局自立科研项目(2015002)资助

2022 年 10 月 26 日收稿; 2023 年 8 月 21 日收修定稿

第一作者:王婷婷,主要从事强对流预报业务和技术方法研究. E-mail:tingting1985511@163.com

the tail front of squall line after fracture, but the causes for the extreme thunderstorm gale at the two stations near the vortex were obviously different, of which the thunderstorm gale at Nongda Station occurred when the air pressure dropped sharply, the temperature rose sharply and the minute precipitation was weak. Thus, it was caused by the strong sinking divergent airflow (cold pool outflow) in front of the squall line accelerating into the vortex under the action of strong southerly airflow, and the convergence updraft was rapidly enhanced. It was significantly different from the extreme thunderstorm gale caused by the strong sinking divergent airflow formed by the drag of precipitation particles at the nearby Nongboyuan Station and Changchun Station.

**Key words:** extreme thunderstorm gale, squall line, meso- $\gamma$  scale vortex, convergent updraft

## 引 言

极端雷暴大风是指阵风风速 $\geq 10$ 级( $\geq 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )且伴有雷电的强对流天气,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,如 2015 年湖北监利“东方之星”翻沉事件(郑永光等,2016),2019 年 3 月 21 日广西桂林临桂县 17 级极端雷暴大风(李彩玲等,2021)等。由于该类型天气往往具有局地性和突发性强、生命史短等特点,产生大风的对流风暴常出现在比普通雷暴更干的环境下,雷暴大风尤其是致灾大风的可预报性更低,预报预警难度极大。

2021 年 9 月 9 日白天,吉林省中东部地区遭遇当年入汛以来最强一次飏线过程。飏线由内蒙古通辽地区进入四平西部后,快速向东移动并发展,11 时(北京时,下同)经过长春市上空时风速突然加大,有 2 个站风力超过 11 级,达到极端雷暴大风强度,致使多人受伤并一人伤亡。极端雷暴大风发生在飏线前沿  $\gamma$  中尺度涡旋附近,且邻近 2 个测站极端雷暴大风发生时气象要素变化和形成机理明显不同。关于极端雷暴大风,王秀明等(2012;2023)详细分析了下击暴流形成机理,认为风暴强下沉辐散气流、强冷池造成的冷池密度流、降水粒子的蒸发效应等因素的共同作用造成了地面极端雷暴大风产生,且对地面极端雷暴大风的增幅作用几乎相当;康岚等(2018)对四川盆地一次极端雷暴大风成因进行详细分析后指出中空干层、大的温度直减率、高低空急流耦合区、低层温度脊附近是利于极端雷暴大风出现的潜势区域;沈杭锋等(2019)指出飏线经过时气压涌升所形成的雷暴高压、强气压梯度以及飏线的快速移动均有利于地面极端雷暴大风的出现;盛杰等(2019)发现飏线后侧中层干后向入流促使降水粒

子相变,剧烈降温形成的强下沉运动是导致极端大风产生的主要原因;侯淑梅等(2022)指出阵风锋移动速度快、持续时间长,是造成山东近海一次 10 级以上雷暴大风的直接原因,冷池与日照暖温度脊之间产生的密度流与变压风叠加造成地面大风强度增强。关于中尺度涡旋,Zhang et al(1991)指出中尺度涡旋在多普勒天气雷达速度图上的典型标志是一对距离近、符号相反且闭合的速度等值线;Wakimoto et al(2006)基于机载多普勒雷达观测资料结合地面灾害调查结果,发现中涡旋的涡旋流与强环境背景流叠加能够产生 F0~F1 级强度的地表灾害性大风;Wheatley et al(2006)借助观测证实了中涡旋与地表灾害性直线大风存在密切关联。目前,国内学者对于中涡旋研究大多集中于中涡旋结构及引起暴雨或冰雹成因(张京英和漆梁波,2008;方纯纯和关春玲,2014;焦宝峰等,2022),涡旋的时空分布特征和大小、位置、强度等(Tang et al,2020;居圆圆等,2022),对于中涡旋的形成机制和涡旋对极端雷暴大风形成的作用等研究较少。

本文主要基于地面加密自动气象观测站、多普勒天气雷达、探空等多源实况观测资料和欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料(空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为 1 h)等,从  $\gamma$  中尺度涡旋演变特征和有利于雷暴大风形成的关键要素(动量下传、冷池出流、辐合上升气流等)对此次极端雷暴大风的形成机制进行详细分析和探讨。

## 1 强对流实况

2021 年 9 月 9 日 08 时开始,一条东北—西南向的飏线由内蒙古通辽进入到吉林省四平地区并继续东移发展,造成吉林省中东部先后出现短时强降水、雷暴大风和冰雹等强对流天气(图 1a)。强降水

主要集中在长春南部、四平东部和辽源地区部分乡镇,最大小时降水量达 41 mm(九台区常家村)。3 个国家级气象观测站和 48 个自动气象站记录了 8 级以上雷暴大风,其中长春市区东南部净月吉林农大站(简称农大站)和净月农博园站(简称农博园站)先后于 11:07 和 11:12 出现 12 级(瞬时极大风速达  $35.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和 11 级(瞬时极大风速达  $31.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )极端雷暴大风,大风造成长春市区多个工地彩钢房倾斜,写字楼广告牌掉落等,并致使多人受伤。2015 年以来吉林省雷暴大风统计表明,雷暴大风多发生于 6—7 月,总占比约为 79.2%,其中 9 月最少,仅发生过 3 次,占比仅为 3.0%,且风力不超过 9 级。因此,此次对流过程发生时间明显偏晚,强度显著偏强。

从农大站和农博园站地理位置来看(图 1b),2 个站位于长春站东南侧 18 km 处,其直线距离为 1.3 km。当飊线自西向东移动先后经过长春站、农大站和农博园站时,3 个站均出现风向突变(偏东风转为偏西风),风速递增,气压涌升,气温下降和降水量增大等飊线过境特征(图 2),但农大站和农博园站 2 min 平均风速明显比长春站更强,且在飊线过境前(11:07 左右)出现气压下降,气温上升或变化不大,降水量下降等与飊线过境完全相反的特征,风向由偏东风转为偏南风,强风的产生可能有与强上升气流有关,其形成原因值得探寻。此外,农大站在该时段气象要素变化更剧烈,5 min 内气温升高  $8.9^\circ\text{C}$ ,4 min 内气压下降 5 hPa,风速更强,在 11:07 达到极值(2 min 平均风速为  $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,瞬时极大风速达  $35.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),而农博园站在 11:12 飊线

过境时风速达到极值(2 min 平均风速为  $18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,瞬时极大风速达  $31.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

## 2 天气背景和环境条件分析

### 2.1 环流背景

9 月 9 日 08:00(图 3a),贝加尔湖东侧有一深厚东北冷涡缓慢东移南压,后部有明显干冷空气侵入,925 hPa 切变线位于 500 hPa 槽前,大气斜压性较强,易产生锋生作用,500 hPa 急流出口区右侧风速辐合线叠加在 925 hPa 切变线之上,为飊线形成提供了较强的动力抬升条件。长春站位于冷涡东南象限,低层暖舌伸至该地区上空,850 hPa 和 500 hPa 温差达  $28^\circ\text{C}$ ,热力条件好,925 hPa 露点温度不足  $8^\circ\text{C}$ ,但湿舌随低空西南风急流增强显著北伸(图 3b),至 11:00 长春站位于急流出口区湿舌附近,提供了有利的动力抬升和水汽输送(925 hPa 比湿值达  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

地面图中(图 3c,3d),08:00 在天气尺度锋生作用下冷锋尾部位于高空风速辐合区和近地面层温度梯度大值区附近,多尺度叠加作用下对流云团激发并形成飊线,在低层暖舌和地面增温作用下飊线前侧入流即偏南风气流显著增强,有利于飊线东移过程中维持和发展,至 11:00,长春站北侧正变压增强并构成小尺度雷暴高压,偏北风与偏南风在长春站附近形成较强辐合,为产生极端雷暴大风的对流发展提供了局地强上升运动。

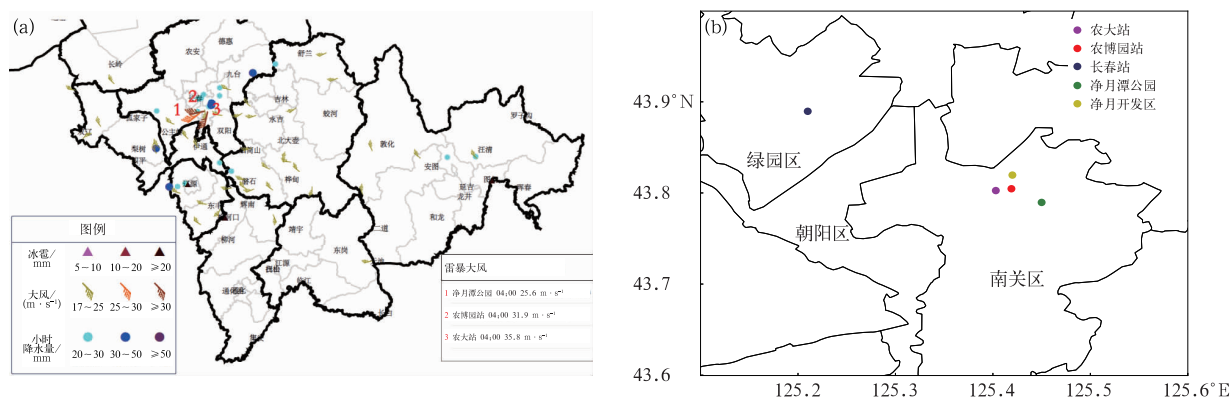


图 1 (a)2021 年 9 月 9 日 08—20 时吉林省强对流实况监测和(b)长春市部分气象站地理位置示意图

Fig. 1 (a) The monitoring map of severe convection in Jilin Province from 08:00 BT to 20:00 BT 9 September 2021 and (b) the geographical location diagram of some meteorological stations in Changchun City

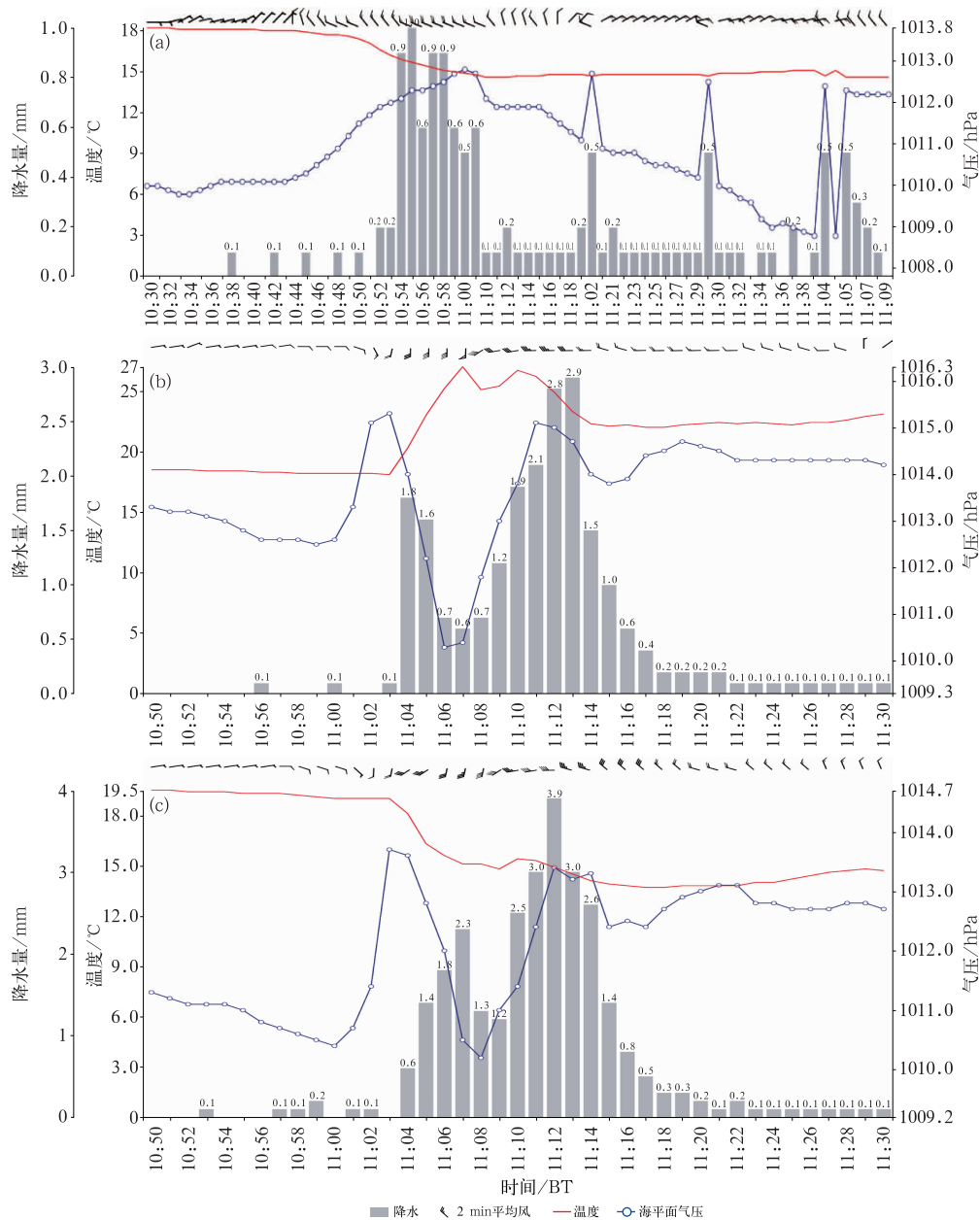


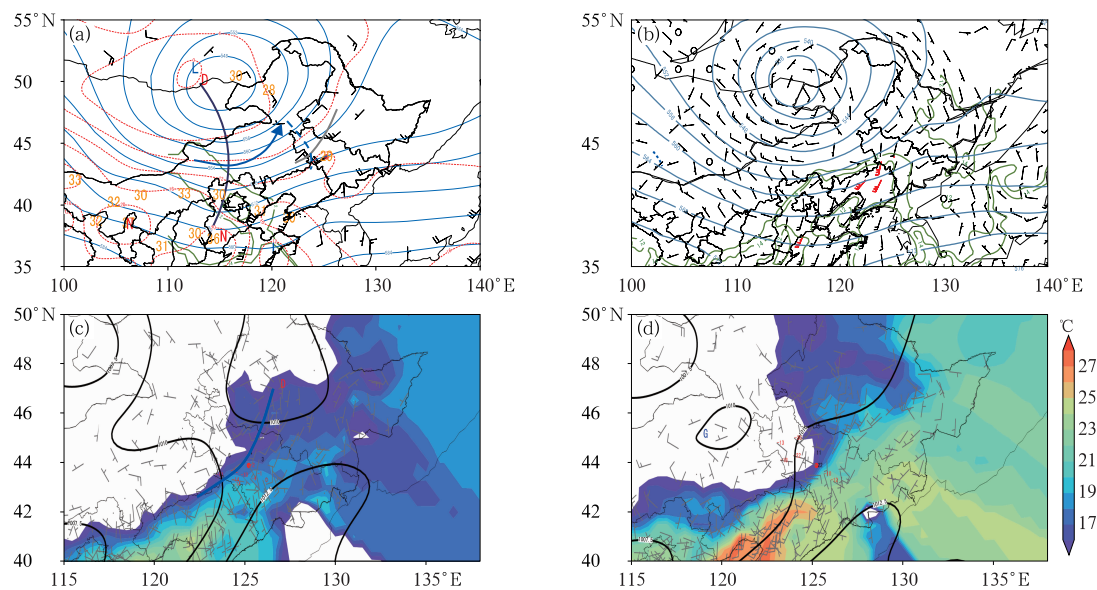
图 2 2021 年 9 月 9 日 (a) 长春站, (b) 农大站和 (c) 农博园站分钟级地面气象要素变化  
Fig. 2 Minute-level changes of ground meteorological elements at (a) Changchun Station, (b) Nongda Station and (c) Nongboyuan Station on 9 September 2021

## 2.2 对流环境条件

9 日 08:00 长春站探空图(图 4a)和物理要素值(表 1)显示,对流不稳定能量 CAPE 值较小,仅为  $10.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但 925 hPa 以下有明显逆温层,有利于不稳定能量累积,且 850 ~ 500 hPa 温度差 ( $\Delta T_{85 \sim 50}$ ) 达  $28.6^\circ\text{C}$ ; 1 km 以下有湿层,925 hPa 比湿为  $8.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,叠加在中层较强干空气(700 ~ 400 hPa 平均温度露点差,即干层强度达  $16.7^\circ\text{C}$ )之

下,层结不稳定,且逆温层以下温度直减率接近干绝热递减率( $8.21^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ ),环境条件有利于雷暴大风产生。利用农博园站对流发生前 10:10 的地面气温( $20.2^\circ\text{C}$ )和露点温度( $16.8^\circ\text{C}$ )对探空层结进行订正(图 4b),结果显示订正后 CAPE 值超过  $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对流抑制能 CIN 降至  $0.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,层结不稳定性在短时间内迅速增强,为极端雷暴大风的产生提供了强有利的不稳定条件。此外,大风指数达 23.8(吉林省雷暴大风阈值为 20),DCAPE 超过





注:红色圆点为长春站;蓝色和黑色等值线分别为 500 hPa 高度场(单位:dagpm)和海平面气压场(单位:hPa);黑色风羽为 925 hPa 或地面风场,超过  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速标记为红色;填色表示地面温度。图 a 中红色虚线为 850 hPa 温度场(单位:°C),加粗箭头和虚线分别为 500 hPa 急流轴和风速辐合线,灰色实线为 925 hPa 切变线,橙色数字为 850 hPa 和 500 hPa 温差(单位:°C);图 b 中绿色实线为 925 hPa 露点温度(单位:°C);图 c 中蓝色实线为冷锋;图 d 中红色和黑色数字分别为 3 h 负、正变压(单位: $10^{-1} \text{ hPa}$ )。11:00 高空图来自于 ERA5 再分析资料,其余均为实况资料。

图 3 2021 年 9 月 9 日(a,c)08:00,(b,d)11:00 的(a,b)高空和(c,d)地面形势场  
Fig. 3 (a, b) High-altitude and (c, d) surface situation fields at (a, c) 08:00 BT and (b, d) 11:00 BT 9 September 2021

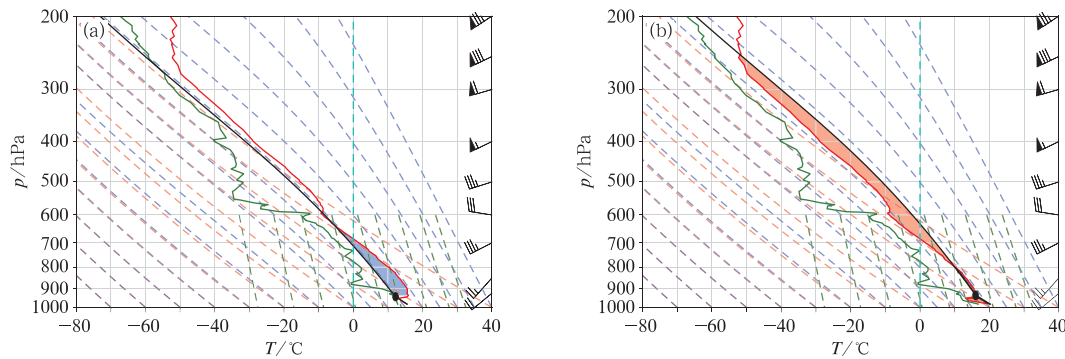


图 4 2021 年 9 月 9 日长春站(a)08:00 和(b)订正后探空层结图  
Fig. 4 Sounding stratification diagram at (a) 08:00 BT and (b) corrected at Changchun Station on 9 September 2021

表 1 2021 年 9 月 9 日 08:00 长春站探空物理量

Table 1 Sounding physical quantities at Changchun Station at 08:00 BT 9 September 2021

CAPE/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CIN/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	600 hPa 起始 DCAPE/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\Delta T_{85 \sim 50}$ / °C	925 hPa 比湿/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	PWAT/ mm	大风 指数	0~3 km 垂直 风切变/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0~6 km 垂 直风切变/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	干层强度/ °C
10.8/1689.0*	487.2/0.4*	677.4	28.6	8.76	22.0	23.8	11.4	14.5	16.7

注: \* 为订正后探空数据。

$670 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 对雷暴大风的潜势预报有一定指示作用;  $429 \sim 400 \text{ hPa}$  夹卷层平均风风速超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在不稳定层结下高层动量下传有利于地面风速增大; 整层大气水汽含量达  $22.0 \text{ mm}$ , 有利于湿下击暴流产生;  $0 \sim 3 \text{ km}$  垂直风切变和  $0 \sim 6 \text{ km}$  垂直风切变达到或接近中等强度 ( $\geq 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 有利于对流风暴即飚线的组织和发展。

### 3 飚线系统演变特征

从松辽流域雷达回波拼图可见(图5), 9日08:00起, 先后有2个飚线经过并影响吉林省中东部地区。其中第一条飚线强度较强, 移速较快且维持时间较长, 东移进入吉林省后移速约为  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 结构较均匀, 产生的雷暴大风较分散且风力较小(共计9个测站风力达8~10级), 10:30开始, 飚线断裂成两段, 其北段飚线前沿有 $\gamma$ 中尺度涡旋生成并发展, 11:00经过长春市区南部时农大站和农博园站瞬时风力超过11级, 随后飚线东移进入高压区外围辐散区, 强度减弱并逐渐解体; 第二条飚线形成于冷涡槽线尾部附近, 13:00开始进入吉林省中南

部地区后受不利的环境条件和地形摩擦影响强度减弱较快, 持续时间较短, 至15:30线状结构解体。

## 4 极端雷暴大风成因分析

飚线前沿 $\gamma$ 中尺度涡旋经过长春市区南部时, 有2个测站(农大站和农博园站)出现并达到极端雷暴大风强度。因此主要基于 $\gamma$ 中尺度涡旋的演变特征, 结合地面加密自动站和ERA5等资料重点分析并探讨2个测站, 特别是农大站极端雷暴大风产生的根本原因。

### 4.1 $\gamma$ 中尺度涡旋演变特征

形成发展阶段: 10:35(图6a<sub>1</sub>), 飚线断裂成两段, 断裂处公主岭尖山站附近前侧下沉辐散气流(偏西风, 负速度, 10:30瞬时极大风速达  $21.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )与飚线前沿偏东风(正速度)在近地面层强烈辐合,  $400 \text{ m}$ 以下正负径向速度差值(辐合强度)达到  $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 距离接近  $2.5 \text{ km}$ , 辐合高度接近  $2.5 \text{ km}$ (图6d<sub>1</sub>距起始点A水平距离  $11 \text{ km}$ 处), 多个新生单体在尖山站附近迅速发展并构成了 $\gamma$ 中尺度涡旋, 超

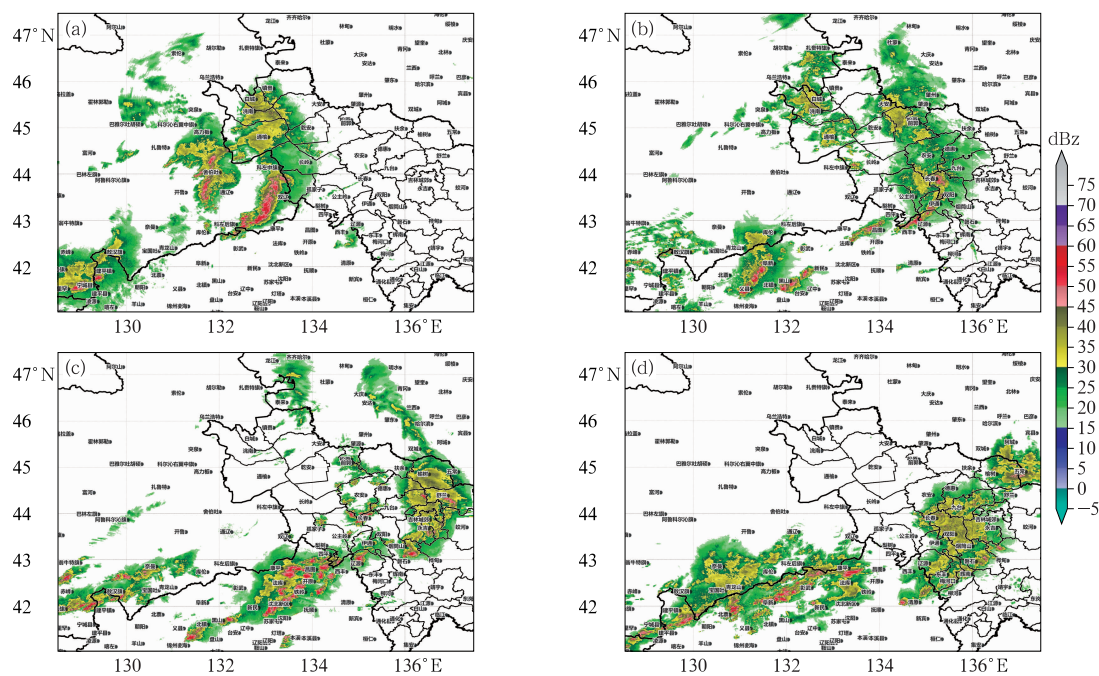


图5 2021年9月9日(a)08:00, (b)11:00, (c)13:00, (d)15:30东北松辽流域组合反射率因子拼图

Fig. 5 Radar composite reflectivity factor mosaic of Songliao Basin in Northeast China at

(a) 08:00 BT, (b) 11:00 BT, (c) 13:00 BT, (d) 15:30 BT 9 September 2021

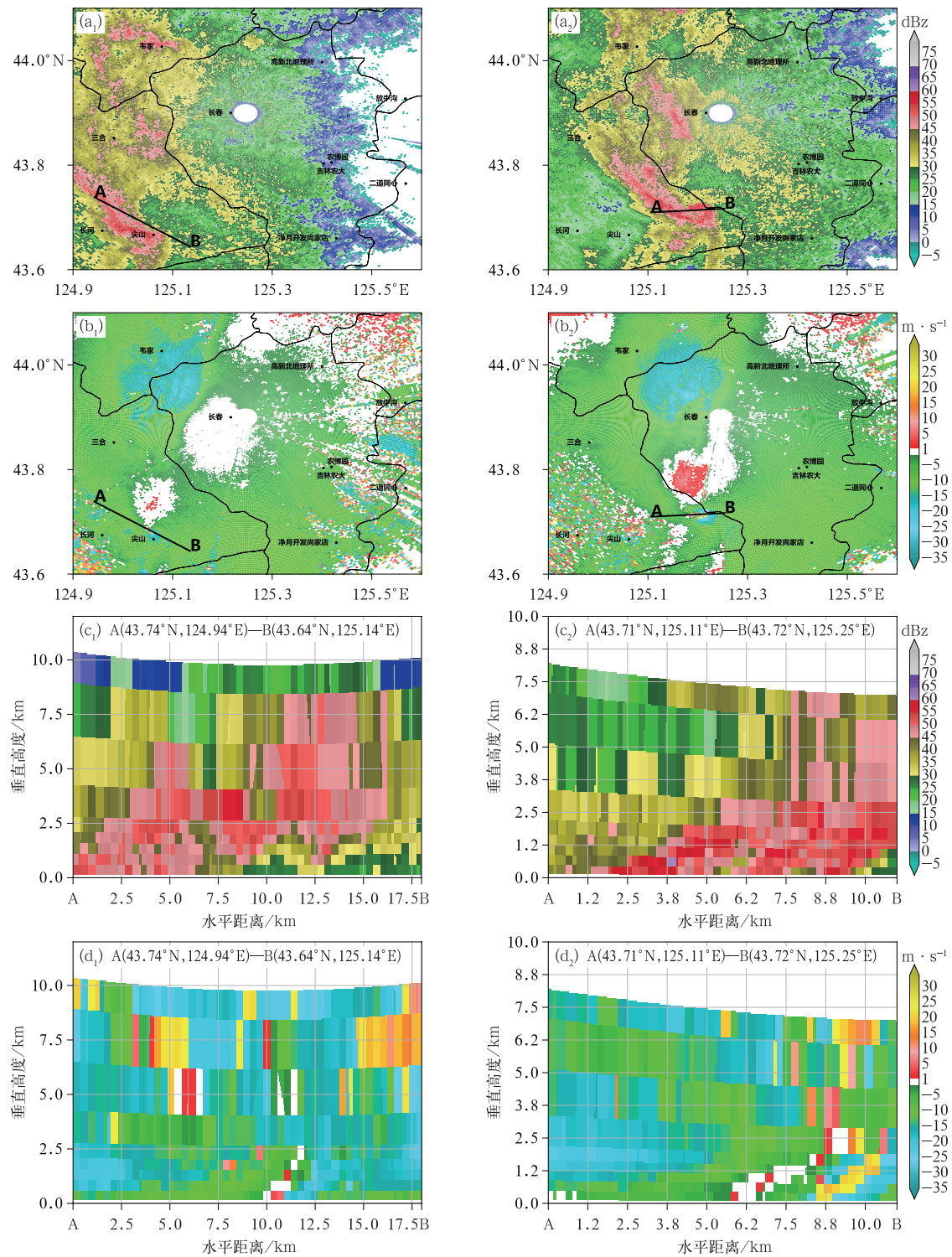


图6 2021年9月9日长春站C波段雷达(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>)10:35和(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>)10:45的  
(a)1.5°仰角反射率因子, (b)0.5°仰角基本径向速度; (c, d)分别沿图6a, 6b中AB线的  
(c)反射率因子回波剖面 and (d)径向速度剖面

Fig. 6 (a) Reflectivity factor at 1.5° elevation, (b) basic radial velocity at 0.5° elevation,  
(c, d) vertical profiles of (c) reflectivity factor echo along AB line in Fig. 6a and (d) radial velocity  
along AB line in Fig. 6b at (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 10:35 BT and (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 10:45 BT  
of C-Band Radar at Changchun Station on 9 September 2021



过 50 dBz 回波发展至 6 km 附近(图 6c<sub>1</sub>)。随后涡旋随中层西南风引导气流向东北方向移动,925 hPa 西南风急流北伸,偏南风迅速增强,10:45 左右 0.5° 仰角速度图中负速度区出现速度模糊(图 6b<sub>2</sub>),退模糊后速度值为  $-32.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,近地面层正负速度中心距离增加至 4 km,辐合强度超过  $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,辐合高度超过 5 km(图 6d<sub>2</sub> 距起始点 A 水平距离 6~10 km 附近)。

成熟阶段:11:01 左右飏线主体移入长春市上空,涡旋尺度小移速快,与飏线尾部脱离并移入到长春站东南部,2 个测站(农大站和农博园站)位于涡旋右侧,风向由偏东风转为偏南风。此时涡旋辐合范围和强度明显扩大或增强,近地面层正负速度中心距离超过 7 km,辐合强度超过  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,辐合区发展至 5 km 以上(图 7d<sub>1</sub>),涡旋发展至成熟阶段,但涡旋内 50 dBz 以上回波下降至 2 km 附近(图 7c<sub>1</sub>)。下一时刻(11:07),涡旋继续东移,2 个测站位于涡旋左侧入流区附近(图 7a<sub>2</sub>),涡旋辐合强度和范围进一步扩大,近地面层正负速度中心距离超过 10 km,1.2 km 附近辐合强度超过  $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。涡旋辐合增强主要与涡旋左侧正速度(流入速度)迅速增加有关。受飏线过境影响,涡旋西北侧 0.5° 仰角正速度接近  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b<sub>2</sub>),强下沉辐散气流在涡旋强辐合作用下加速流入涡旋内部,2 个测站地面风速迅速增加并出现速度模糊,退模糊后速度值超过  $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显高于飏线主体附近风速值,此时农大站瞬时极大风速达到  $35.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级)并伴有气温陡升、气压下降等特征,且风速明显强于农博园站。

减弱消散阶段:随后,涡旋移出测站上空,强下沉辐散气流流入涡旋内部并阻碍涡旋前侧暖湿气流的流入,涡旋回波强度继续减弱,结构迅速解体并进入减弱消散阶段(图略)。此时 2 个测站主要受飏线过境影响出现第二阶段强风,其中农博园站风速更大,瞬时极大风速达到  $31.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11 级),同时伴有气温下降,气压涌升等特征。

## 4.2 农大站极端雷暴大风成因

### 4.2.1 层结不稳定和动量下传

从农大站假相当位温、比湿和风场沿 43.8°N 垂直剖面可以清楚看到(图 8a),08:00 123°E 附近

低层受冷锋(假相当位温梯度大值区)强迫动力抬升作用明显加强,有利于上游线状对流移至该处时继续发展并形成飏线,至 11:00(图 8b)锋区随高空槽略向东移动,在其前方形成次级环流,农大站附近上升运动明显增强。此外受低空急流北伸影响,低层假相当位温显著增加,近地面层最大值超过 326 K,增幅在 20 K 左右,比湿值超过  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,低层迅速增强的暖湿空气叠加在高层干冷空气之下,层结在短时间内变为极不稳定结构进而产生极端天气。在不稳定层结下,中高层动量( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上)逐渐减小,低层动量逐渐增强,11:00 农大站上空 800 hPa 附近风速增至  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大风速轴明显下移,有明显动量下传现象。

### 4.2.2 冷池出流和辐合上升气流

从地面温压风观测场可以清楚看到,10:00 开始(图 9b),飏线后部(四平西部)有小尺度雷暴高压和冷池生成,冷池中心温度接近 12℃ 并逐渐向东向南扩展,至 11:00(图 9d),飏线移至长春站附近,其后部雷暴高压中心强度超过 1012 hPa,3 h 正变压超过 2.2 hPa,而飏线前部由偏南风暖湿气流构成的小尺度暖低压中心强度为 1010 hPa,3 h 负变压达 -1.2 hPa,飏锋前后温差较大且气压梯度较强,冷池密度流加强,有利于飏锋及前沿地面风速增加,11:07 的 0.5° 仰角速度图中退模糊后正速度值达  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右(图 7b<sub>2</sub>)。当飏线过境时(11:12 左右)2 个测站风速再次加强,受风暴内部降水粒子拖曳(强风出现在降水量增加的时刻)和冷池密度流的共同作用,农博园站出现强风并达到极端雷暴大风强度。

11:07,涡旋东移至农大站和农博园站上空并位于飏线前侧温度梯度区附近,离冷池中心较远,由前面分析可知此时涡旋发展至成熟阶段,涡旋西北侧强下沉辐散气流在涡旋旋转作用下加速流入涡旋内部并构成一支辐合上升气流,辐合强度达到最强,测站气压迅速下降,气温升高或保持不变,其中农大站于 11:10 气温迅速升高至 27℃,形成小尺度暖中心(图 9e),对涡旋辐合强度增强或维持有一定增幅作用。在涡旋强辐合作用下偏南风风速迅速增加并出现速度模糊,且农大站相对于农博园站更靠近涡旋边缘,气温、气压和风速等气象要素变化更剧烈,风速更强,瞬时风速达到极端雷暴大风强度。

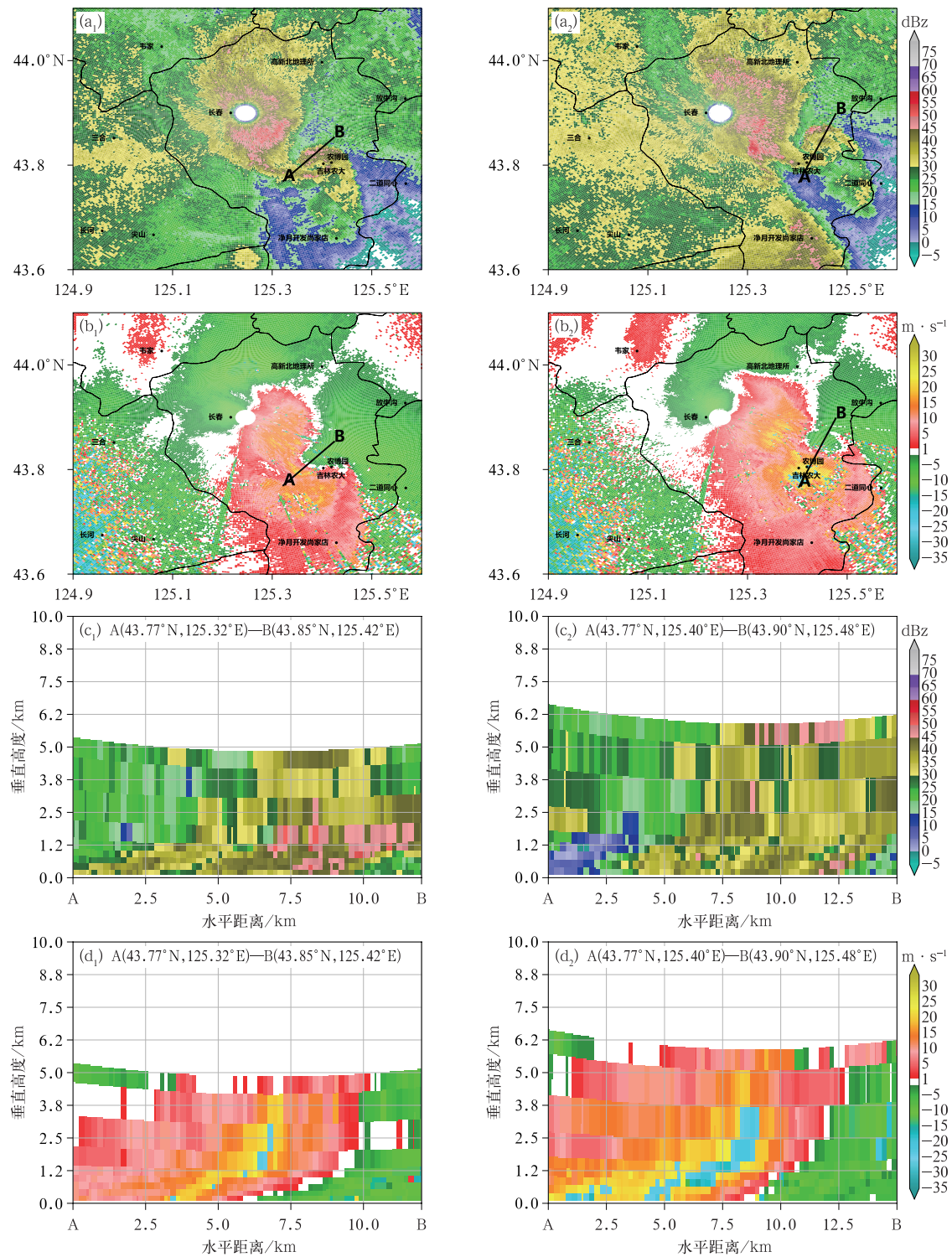


图7 2021年9月9日长春站C波段雷达(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>)11:01和(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>)11:07的  
(a<sub>1</sub>)1.5°仰角反射率因子, (b<sub>1</sub>)0.5°仰角基本径向速度; (c, d)分别沿图7a, 7b中AB线的  
(c)反射率因子回波剖面 and (d)径向速度剖面

Fig. 7 (a) Reflectivity factor at 1.5° elevation, (b) basic radial velocity at 0.5° elevation,  
(c, d) vertical profiles of (c) reflectivity factor echo along AB line in Fig. 7a and (d) radial velocity  
along AB line in Fig. 7b at (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 11:01 BT and (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 11:07 BT  
of C-Band Radar at Changchun Station on 9 September 2021

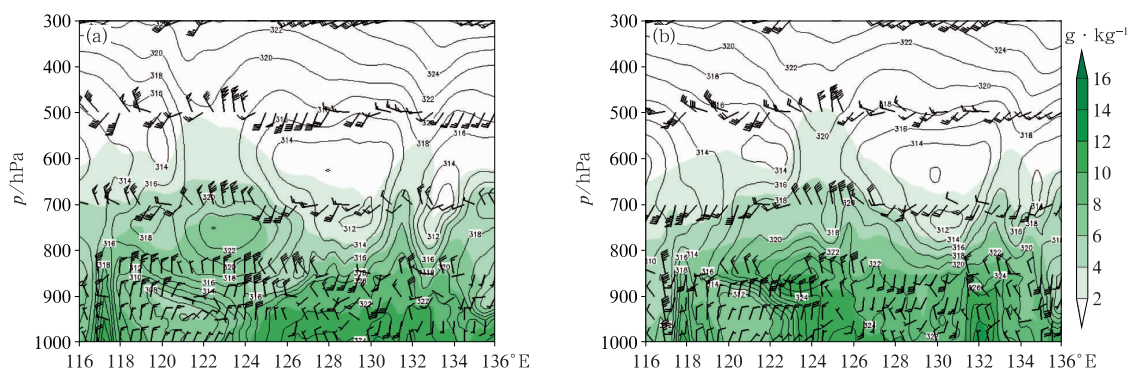


图 8 2021 年 9 月 9 日 (a)08:00, (b)11:00 沿  $43.8^{\circ}\text{N}$  假相当位温(黑色等值线,单位:K)、比湿(填色)和风向(风羽)垂直剖面

Fig. 8 Vertical profiles of pseudo-equivalent potential temperature (black isolate, unit: K), specific humidity (colored) and wind field (barb) along  $43.8^{\circ}\text{N}$  at (a) 08:00 BT, (b) 11:00 BT 9 September 2019

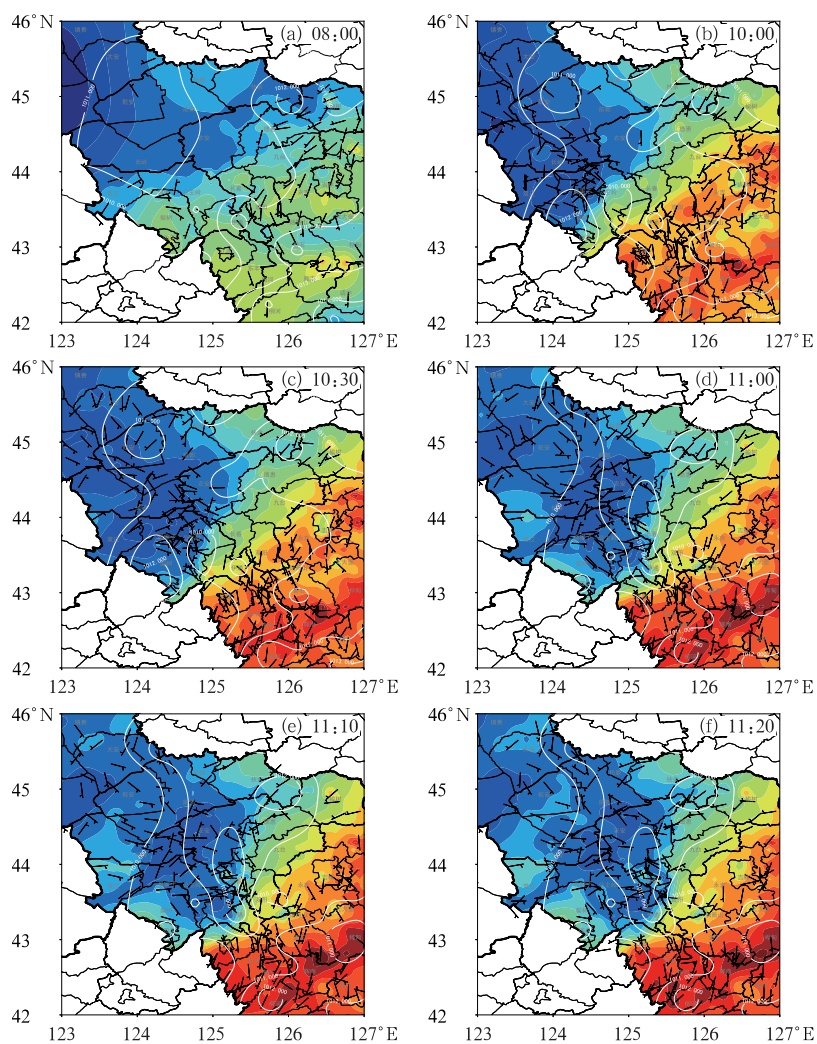


图 9 2021 年 9 月 9 日 08:00—11:20 加密自动站风场(风羽)、温度场(填色)和逐小时气压场(白色实线)叠加图

Fig. 9 Superposition of wind field (barb), temperature field (colored) and hourly pressure field (white solid line) of encrypted automatic weather stations from 08:00 BT to 11:20 BT 9 September 2021



## 5 结论与讨论

综合利用多源观测资料对 2021 年 9 月 9 日吉林省中东部一次飑线过程,特别是长春站东南部 2 个测站(农大站和农博园站)极端雷暴大风的形成机理进行详细分析和探讨,结论如下:

(1)飑线是在东北冷涡背景下中层急流辐散区、低空西南急流轴前端、冷涡南侧的暖区之中发展起来的,大尺度锋生作用在冷锋尾部激发对流形成飑线,低层暖舌和低空西南急流的存在或加强为长春站附近雷暴大风的产生提供了热力不稳定和水汽输送,飑线附近变压风与偏南风暖湿气流的辐合为产生极端雷暴大风的对流发展提供了局地强上升运动。

(2)环境条件有利于极端雷暴大风产生:逆温层以下温度递减率接近干绝热,临近时刻 CAPE 值超过  $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,层结在短时间内变为极不稳定结构,大风指数和 DCAPE 对极端雷暴大风的潜势预报有一定指示作用,接近或达到中等强度的整层和低层垂直风切变有利于飑线的组织和发展。

(3)飑线前沿  $\gamma$  中尺度涡旋在长春站上游生成并发展,东移至两测站上空时,涡旋后部强下沉辐散气流(冷池流出)在涡旋旋转作用下加速流入涡旋内部并构成一支辐合上升气流,涡旋辐合强度达到最强,在涡旋强辐合作用下 2 个测站测得偏南风风速迅速增加,且农大站更靠近涡旋左侧入流边缘,加上高层动量下传作用,气温、气压和风速等气象要素变化更剧烈,风速更强并达到极端雷暴大风强度。农博园站随后受飑线过境影响,在风暴内降水粒子拖曳和冷池密度流加强的共同作用下,地面风速再次加强并达到极端雷暴大风强度。

可见,农大站极端雷暴大风与以往雷暴大风形成原因明显不同,强风发生时气压下降,气温陡升,且发生在分钟级降水量下降时刻,主要由  $\gamma$  中尺度涡旋近地面层强辐合上升气流导致,十分罕见。此外,对于  $\gamma$  中尺度涡旋未产生龙卷的原因,仍有待后续进一步分析和探讨。

**致谢:**感谢俞小鼎、王秀明和赵坤教授的指导和帮助。

## 参考文献

- 方纯纯,关春玲,2014. 东北冷涡内部中尺度涡旋引起的冰雹天气数值模拟[J]. 气象与环境学报,30(1):8-14. Fang C C, Guan C L, 2014. Numerical simulation on hail weather caused by meso-scale vortex inside cold vortex over northeastern China[J]. J Meteor Environ,30(1):8-14(in Chinese).
- 侯淑梅,李昱薇,张鹏,等,2022. “4·29”山东近海 10 级以上雷暴大风的成因分析[J]. 气象,48(10):1242-1256. Hou S M, Li Y W, Zhang P, et al, 2022. Cause of a thunderstorm gale event over grade 10 along the Shandong Coast on 29 April 2021[J]. Meteor Mon,48(10):1242-1256(in Chinese).
- 焦宝峰,冉令坤,李舒文,等,2022. 一次暴雨中尺度涡旋发展机制诊断分析研究[J]. 大气科学,46(3):762-774. Jiao B F, Ran L K, Li S W, et al, 2022. Diagnosis of the mesoscale vortex development mechanism in a heavy rain event[J]. Chin J Atmos Sci,46(3):762-774(in Chinese).
- 居圆圆,徐昕,唐滢,2022. 华南“4.21”弓状回波的  $\gamma$ -中尺度涡旋雷达观测分析[J]. 南京大学学报(自然科学),58(5):780-788. Ju Y Y, Xu X, Tang Y, 2022. Radar observation analysis of meso- $\gamma$ -scale vortices in bow echo on 21 April in South China[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci),58(5):780-788(in Chinese).
- 康岚,刘炜桦,肖逸祥,等,2018. 四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J]. 气象,44(11):1414-1423. Kang L, Liu W H, Xiao D X, et al, 2018. Analysis on formation reason and forecast of an extreme gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon,44(11):1414-1423(in Chinese).
- 李彩玲,蔡康龙,黄先香,等,2021. 桂林一次强下击暴流成因分析[J]. 气象,47(2):242-252. Li C L, Cai K L, Huang X X, et al, 2021. Cause analysis of a severe downburst in Guilin[J]. Meteor Mon,47(2):242-252(in Chinese).
- 沈杭锋,方桃妮,蓝俊倩,等,2019. 一次强飑线过程极端大风的中尺度分析[J]. 气象学报,77(5):806-822. Shen H F, Fang T N, Lan J Q, et al, 2019. Mesoscale analysis of the extremely damaging gale in a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin,77(5):806-822(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon,45(2):141-154(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,费海燕,等,2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. 气象,49(2):129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon,49(2):129-145(in Chinese).
- 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 X M, Yu X D, Zhou X G, et al, 2012. Study on the formation and evolution of “6·3” damage wind[J]. Plateau Meteor,31(2):504-514(in Chinese).
- 张京英,漆梁波,2008. 一次强对流天气中尺度涡旋结构和冰雹落区分析[J]. 气象科技,36(3):293-299. Zhang J Y, Qi L B, 2008.

- Analysis of mesoscale vortex structure and hail-falling area in a severe convective weather event[J]. Meteor Sci Technol, 36(3): 293-299(in Chinese).
- 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 Y G, Tian F Y, Meng Z Y, 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]. Meteor Mon, 42(1): 1-13(in Chinese).
- 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.
- Wakimoto R M, Murphey H V, Nester A, et al, 2006. High winds generated by bow echoes. Part I: overview of the Omaha bow echo 5 July 2003 storm during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2793-2812.
- 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.
- Zhang P F, Ge R S, Liu E Q, 1991. A technique to recognize and estimate severe storm by using single Doppler weather radar[J]. J Meteor Res, 5(3): 274-284.

(本文责编: 俞卫平)