2021年吉林中部一次极端雷暴大风的中尺 1 度成因分析 2 朱文剑²⁾姚凯¹⁾ 全思航¹⁾ 毕潇潇¹⁾ 姚瑶¹⁾ 王婷婷¹⁾ 3 ¹⁾(吉林省气象台,长春,130062) 4 5 2)(国家气象中心,北京,100081) 6 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 ER45 再分析资料等,对 2021 7 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: 8 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 9 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 10 迅速增强,临近时刻 CAPE 值超过 1600 J.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 11 20 m.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中-γ尺度涡旋附近, 12 但涡旋附近两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 13 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 14 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 15 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; 中小尺度涡旋; 辐合上升气流 16 17 Mesoscale Analysis of an Extreme Thunderstorm Gale in Central Jilin 18 Province in 2021 19 Zhu Wenjian²⁾, Yao Kai¹⁾, Quan Sihang¹⁾, Bi Xiaoxiao¹⁾, Yao Yao¹⁾ Wang Tingting¹ 20 21 1) Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062; 22 2) National Meteorological Center, Beijing 100081 23 Abstract 24 Based on conventional observation data, densely-distributed automatic weather station, 25 Doppler weather radar data and ERA5 reanalysis data, the mesoscale cause of a rare extreme 26 thunderstorm gale in Central area of Jilin Province on the morning of September 9,2021 was 27 analyzed in detail. The results showed that: The squall line system that produced thunderstorm **资助项目:** 吉林省气象局自立科研项目 (2015002) ·作者:王婷婷,硕士,副高级工程师,主要从事强对流预报业务和技术方法研究.E-mail: tingting1985511@163.com

28 was formed by the deep northeast cold vortex and the large-scale frontogenesis at the tail of the 29 cold front. The strong dry air in middle layer and the temperature decreasing rate closed to dry 30 adiabatic below the inversion layer were conducive to the generation of severe wind. The 31 existence of dry and warm cover leaded to rapid enhancement of low-level warm and humid air, and the CAPE value was more than 1600 J.kg⁻¹ near the moment, which were conducive to the 32 stratification becoming extremely unstable in a short period of time. The average wind speed in 33 the entrainment layer was above 20 m.s⁻¹, and the downward momentum transfer was beneficial to 34 35 the enhancement of ground wind speed. The extreme thunderstorm gale occurred near the γ -scale vortex in the tail front of squall line after fracture, but the causes of severe wind at the two stations 36 near the vortex were obviously different. The severe wind at Nongda station occurred when the air 37 pressure dropped sharply, the temperature rose sharply and the minute precipitation was weak. It 38 was caused by the strong sinking divergent airflow (cold pool outflow) in front of the squall line 39 accelerating into the vortex under the action of strong southerly airflow, and the convergence 40 updraft was rapidly enhanced. It was significantly different from the extreme thunderstorm gale 41 caused by the strong sinking divergent airflow formed by the drag of precipitation particles at the 42 43 nearby Nongboyuan Station and Changchun Station.

44 Key words: extreme thunderstorm gale: squall line; meso- γ scale vortex; convergent updraft 45 $\vec{\beta}$

46 2021年9月9日白天,吉林省中东部地区遭遇入汛以来最强一次飑线过程。飑线由内
47 蒙古通辽地区进入四平西部后,快速向东移动并发展,吉林省中东部出现大范围的雷暴大风、
48 短时强降水、冰雹等强对流天气(图1a),11时经过长春市上空时风速突然加大,有2站风
49 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。

50 极端雷暴大风是指阵风风速大于等于 10 级 (≥25 m.s⁻¹) 且伴有雷电的强对流天气,
51 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
52 县"6.1 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
53 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
54 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
55 的可预报性更低,预报预警难度极大。此次过程是一次典型飑线,但极端雷暴大风发生在飑
56 线前沿中-γ尺度涡旋附近,且临近两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(2012,2022)详细分析了下击暴流形成机理,认为风 57 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 58 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 59 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 60 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)指出飑 61 线经过时气压涌升所形成的雷暴高压、强气压梯度以及飑线的快速移动均有利于地面极端雷 62 暴大风的出现;盛杰等(2019)发现飑线后侧中层干后向入流促使降水粒子相变,剧烈降温 63 64 形成的强下沉运动是导致极端大风的主要原因; 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 65 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) 66 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 67 度等值线; Wakimoto et al (2006) 基于机载多普勒雷达结合地面灾美调查结果发现中涡旋 68 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) 69 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 70 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, 71 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; 72 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。 73 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 74 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 %0.25 %时间分辨率为1 h) 75 等,从中-v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 76 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。 77

78 1 强对流实况

79 2021年9月9日08时开始,一条东北—西南向的飑线由内蒙古通辽进入到吉林省四平
地区并继续东移发展(图 5),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
82 时雨强达41 mm(九台区常家村),有3个国家气象观测站和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时和11:12时出现12级(瞬时极大风速35.8 m.s⁻¹)和11级(瞬
85 时极大风速31.9 m.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

86 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,吉林省雷暴大风多
87 发生于 6-7 月,总占比约 79.2 %,其中 9 月份最少,仅发生过 3 次,占比仅为 3.0 %,且
88 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),两站位于长春站东南侧 18 km 处,直线距 89 90 离为 1.3 km。当飑线自西向东移动先后经过长春站、农大站和农博园站时,三站均出现风向 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飑线过境特征 91 (图 2),但农大站和农博园站 2 分钟平均风速明显比长春站更强,且在飑线过境前(11:07 92 93 时左右)出现气压下降,气温上升或变化不大,降水量下降等与飑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 94 外,农大站在该时段气象要素变化更剧烈,5分钟内气温升高8.9℃,4分钟内气压下降5hPa, 95 风速更强,在11:07时达到极值(2分钟平均风速22.2 m.s⁻¹,瞬时极大风速达35.8 m.s⁻¹), 96 而农博园站在11:12时飑线过境时风速达到极值(2分钟平均风速18.9 m.s-1,瞬时极大风速 97 达 31.9 m.s⁻¹)。 98



(a) and the geographical location diagram of some meteorological stations in Changchun City (b)

103

104



116 流出口区右侧风速辐合线叠加在 925 hPa 切变线之上,为飑线形成提供了较强的动力抬升条

117 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 ℃,
118 热力条件好,925 hPa 露点温度不足 8 ℃,但湿舌随低空西南风急流增强显著北伸(图 3b),
119 至 11 时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
120 值达 10 g.kg⁻¹)。

121 地面图中(图 3c 和 d),08时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
122 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飑线,在低层暖舌和地
123 面增温作用下飑线前侧入流即偏南风气流显著增强,有利于飑线东移过程中维持和发展,至
11 时,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
125 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。



134

135 (红色圆点为长春站;蓝色和黑色等值线分别为 500 hPa 高度场和海平面气压场,单位:位势米;红色虚线为 850 hPa 温度场, 136 单位:℃;黑色风向杆为925 hPa 或地面风场;绿色实线为925 hPa 露点温度,值用绿色数字标记,单位:℃;蓝色箭头和虚线分 137 别为 500 hPa 急流轴和风速辐合线,灰色实线为 925 hPa 切变线,蓝色实线为冷锋;高空图中橙色数字为 850 hPa 和 500 hPa 温 138 差,单位:℃;地面图中红色数字为3小时负变压,黑色数字为3小时正变压,单位:10⁻¹hPa;阴影表示地面温度,单位:℃) 139 (The red dot in the picture was Changchun City; The blue and black contours were 500hPa height field and sea 140 level pressure field, respectively, unit:gpm; The red dotted line was 850 hPa temperature field, unit: ℃; The black 141 wind direction bar was 925 hPa or surface wind field; The green solid line was 925 hPa dew point temperature, 142 marked with green numbers, unit: °C; The blue arrow and dotted line were the 500 hPa jet axis and the wind speed convergence line, respectively; The gray solid line was the 925 hPa shear line, and the blue solid line was the cold 143 144 front; The orange number in the high-altitude map was the temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, unit: °C; The red number was 3-hour negative pressure change, and the black number was 3-hour positive pressure 145 change in the ground map, unit:10⁻¹ hPa; The shadow area represented the ground temperature, unit: °C) 146

147 2.2 对流环境条件

9日08时长春站探空图(图4a)和物理要素值(表1)显示,对流不稳定能量 CAPE 值较 148 小, 仅为 10.8 J.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 与 500 149 hPa 温度差(T₈₅)达 28.6 ℃; 1 km 以下有湿层, 925 hPa 比湿为 8.76 g.kg⁻¹,叠加在中层较 150 强干空气(700-400 hPa之间平均温度露点差,即干层强度达16.7 ℃)之下,层结不稳定, 151 且逆温层以下温度直减率接近干绝热递减率(8.21 ℃.km⁻¹),环境条件有利于雷暴大风产生。 152 利用农博园站对流发生前10:10时的地面气温20.2 ℃和露点温度16.8 ℃对探空层结进行订 153 正(图 4b),结果显示订正后 CAPE 值超过 1600 J.kg⁻¹,对流抑制能 CIN 降至 0.4 J.kg⁻¹,层 154 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, 155 大风指数达 23.8 (吉林省雷暴大风阈值为 20), DCAPE 超过 670 J.kg⁻¹, 对雷暴大风的潜势 156 预报有一定指示作用; 429-400 hPa 间夹卷层平均风风速超过 20 m.s⁻¹, 在不稳定层结下高层 157 动量下传有利于地面风速增大;整层大气水汽含量达 22 mm,有利于湿下击暴流产生;0-3 km 158 垂直风切变和 0-6 km 垂直风切变达到或接近中等强度 (≥11 m.s⁻¹),有利于对流风暴,即飑 159 线的组织和发展。(a) 160 (b)



176 至 15:30 时线状结构解体。

177 (a)







180

181 图59月9日08:00时(a)、11:00时(b)、13:00时(c)、15:30时(d)东北松辽流域组合反射率因子拼图
 182 Fig.5 Radar combination reflectivity factor prosaic of Songliao Bastn in Northeast China on September 9:(a) 08:00
 183 BT, (b)11:00 BT, (c)13:00 BT, (d)15:30 BT

184 4 极端雷暴大风成因分析

185 可见,飑线前沿中γ尺度涡旋经过长春市区南部时,有两测站(农大站和农博园站)出
186 现并达到极端雷暴大风强度,因此我们主要基于中-γ尺度涡旋的演变特征,结合地面加密自
187 动站和 *ERA5* 等资料重点分析并探讨两测站,特别是农大站极端雷暴大风产生的根本原因。
188 4.1 中-γ尺度涡旋演变特征

189 形成发展阶段: 10:35 左右(图 6a1), 飑线断裂成两段,断裂处公主岭尖山站附近前侧下沉
190 辐散气流(偏西风,负速度,10:30 瞬时极大风速达 21.8 m.s⁻¹)与飑线前沿偏东风(正速度)
191 在近地面层强烈辐合,400 m 以下正负径向速度差值(辐合强度)达到 27 m.s⁻¹,距离接近
192 2.5 km,辐合高度接近 2.5 km(图 6d1 距起始点 A 水平距离 11 km 处),多个新生单体在尖
193 山站附近迅速发展并构成了中-γ尺度涡旋,超过 50 dBZ 回波发展至 6 km 附近(图 6c1)。
194 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
195 强(图 9a 和 c), 10:45 左右 0.5 度仰角速度图中负速度区出现速度模糊(图 6b2),退模糊

196 后速度值为-32.5 m.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 m.s⁻¹,
197 辐合高度超过 5 km (图 6d2 距起始点 A 水平距离 6-10 km 附近)。(a1)
198 (a2)





226 时两测站主要受飑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
227 到 31.9 m.s⁻¹ (11 级),同时伴有气温下降,气压涌升等特征(图 2)。

228 (a1)

(a2)



236 图 7 9 月 9 日长春站 C 波段雷达 11:01 时和 11:07 时的 1.5 °仰角反射率因子(a1,b1)、0.5 °仰角基本径向速度

237 (b1,b2)、反射率因子回波剖面(c1,c2)和径向速度剖面(d1,d2)

Fig.7Reflectivity factor at 1.5 °elevation (a1,a2), basic radial velocity at 0.5 °elevation (b1,b2), reflectivity factor
echo profile (c1,c2) and radial velocity profile (d1,d2) at 11:01 BT and 11:07 BT of C-band radar at Changchun
Station on September 9

241 4.2 农大站极端雷暴大风成因

242 4.2.1 层结不稳定和动量下传

243 从农大站假相当位温、比湿和风场沿 43.8 N 垂直剖面图中可以清楚看到 [图 8a),08 时 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 244 游线状对流移至该处时继续发展并形成飑线,至 11 时(图 8b)锋区随高空槽略向东移动, 245 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 246 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 g.kg-1,低 247 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 248 生极端天气。在不稳定层结下,中高层动量(20 m.s⁻¹以上)逐渐减小,低层动量逐渐增强, 249 11 时农大站上空 800 hPa 附近风速增至 22 m.s ,大风速轴明显下移,有明显动量下传现象。 250



251

252 图 8. 2021 年 9 月 9 日沿 43.8 N 假相当位温(黑色等值线,单位:K)、比湿(阴影区,单位:g.kg⁻¹)和
 253 风场垂直剖面图: (a)08 时; (b)11 时

Fig.8. Vertical profiles of pseudo-equivalent potential temperature (black isoline, unit:K), specific humidity (shaded area, unit:g.kg⁻¹) and wind field along 43.8 % on September 9, 2019: (a) 08:00 BT; (b) 11:00 BT;

256 4.2.2 冷池出流和辐合上升气流

257 从地面温压风观测场可以清楚看到,10时开始(图 9b),飑线后部(四平西部)有小尺
258 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时(图 9d),

259 飑线移至长春站附近,其后部雷暴高压中心强度超过 1012 hPa,3小时变压超过 2.2 hPa,而
260 飑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小时负变压达-1.2
261 hPa,飑锋前后温差较大且气压梯度较强,冷池密度流加强,有利于飑锋及前沿地面风速增
262 加,11:07 时 0.5 度仰角速度图中退模糊后正速度值达 24 m.s⁻¹左右(图 7b2)。当飑线过境
263 时(11:12 时左右)两测站风速再次加强,受风暴内部降水粒子拖曳(强风出现在降水量增
264 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 时,涡旋东移至农大站和农博园站上空并位于飑线前侧温度梯度区附近(图 9d 黑 265 266 色圆点),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, 267 两测站气压迅速下降,气温升高或保持不变,其中农大站于11:10时气温迅速升高至27℃, 268 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 269 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、 270 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。(a) 271 272 (b)





284 (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
285 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
286 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
287 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。

288 (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
 289 刻CAPE值超过1600 J.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

290 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291 飑线的组织和发展。

292 (3)飑线前沿中-γ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
293 部强下沉辐散气流(冷池出流)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
294 流,涡旋辐合强度达到最强,两测站在涡旋强辐合作用下偏南风风速迅速增加,且农大站更
295 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,
296 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
297 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。

298 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,
299 气温陡升,且发生在分钟级降水量下降时刻,主要由中-γ尺度涡旋近地面层强辐合上升气流
300 导致,十分罕见。此外,对于中-γ尺度涡旋未产生龙卷的原因,仍有待后续进一步分析和探
301 讨。

- 302 致谢:感谢俞小鼎教授、王晓明教授和赵坤教授的指导和帮助
- 303
- 304 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,
 305 2014. Numerical simulation on hail weather caused by meso-scale vortex inside cold vortex over Northeastern China[J]. J Meteor Environ,
 306 30(1): 8-14 (in Chinese). 侯淑梅,李昱薇, 张鹏,答, 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):
 307 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

参考文献

308 April 2021[J]. Meteor Mon, 48(10): 1242-1256 (in Chinese),

309 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,
310 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):
311 762-774 (in Chinese).

312 居圆圆, 徐昕, 唐滢, 2022. 华南"4.21"弓状回波的γ-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,
 313 Xu X, Tang Y, 2022. Radar observation analysis of meso-γ-scale vortices in bow echo on 21 April in South China[J]. J Nanjing Univ (Nat
 314 Sci), 58(5): 780-788 (in Chinese).

- 315 康岚, 刘炜桦, 肖递祥, 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):

317 1414-1423 (in Chinese).

318 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,

319 2021. Cause analysis of a severe downburst in Guilin[J]. Meteor Mon, 47(2): 242-252 (in Chinese).

- 320 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).
- 323 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,
- 324 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).
- 325 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): 54-514. Wang X M, Yu X D,
- 326 Zhou X G, et al, 2012. Study on the formation and evolution of '6.3' damage wind[J]. Plateau Meteor, 31(2): 54-514 (in Chinese).
- 327 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 XM, Yu X D, Fei H Y,
- tet al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning [J]. Meteor Mon, 49(2): 129-145 (in Chinese).
- 329 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).
- 332 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.
- 233 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
- 334 surrounding area of the capsizing accident of cruise ship "Dongtangzhixing"[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13 (in Chinese).
- Tang Y, Xu X, Xue M, et al, 2020. Characteristics of low-level meso-γ-scale vortices in the warm season over East China[J]. Atmos Res,
- **336** 235: 104768.
- 337 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
- **338** July 2003 storm during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2793-2812.
- 339 Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T, 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX[J]. Mon Wea
- **340** Rev, 134(3): 791-806
- 341 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
- **342** Res, 5(3): 274-284.