

江西南昌“3·31”极端大风成因分析

李淑璠¹ 王秀明¹ 刘屹靖² 李海俊³ 樊李苗⁴ 俞小鼎¹ 汤欢¹

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 江西逐雷影视文化传媒有限公司, 南昌 330025

3 江西省气象台, 南昌 330096

4 浙江省杭州市气象局, 杭州 310051

摘要: 2024年3月31日凌晨, 江西南昌出现极端对流性强风天气, 发生某高楼三位人员坠亡事件。本研究基于南昌 SAD 型双偏振多普勒天气雷达和地面观测, 分析了高楼人员坠亡地(即事发楼栋)附近的风暴精细结构。结果显示, 在事发时段, 波型线状回波中段的弓形回波北端出现了书挡涡旋(bookend vortex), 尺度和强度(即垂直涡度)与强中气旋相当。书挡涡旋从事发楼栋上空经过, 内部可进一步识别出尺度更小的龙卷涡旋特征(Tornado Vortex Signature, 简称 TVS)和龙卷残片特征(Tornado Debris Signature, TDS), TVS 径向速度差超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。基于 TVS 和 TDS 分析所得疑似龙卷路径进行了灾情调查, 结果显示多处具有龙卷灾损特征, 包括气旋性旋转的强风、辐合风和树剥皮等, 且有石桥被完全吹倒。综上, 可以确定事发楼栋附近出现了 EF2 级左右的龙卷, 高楼人员坠亡极有可能是由龙卷引发的。本次过程特殊之处在于, 龙卷相关涡旋包括书挡涡旋及其内部镶嵌的位于阵风锋前沿的小涡旋, 二者几乎同时出现和增强。基于观测的分析表明, 龙卷相关涡旋主要由水平涡度扭转形成, 而水平涡度与未及地后侧入流急流下方的低层强垂直切变和阵风锋相关的斜压涡度有关。

关键词 龙卷, 弓形回波, 书挡涡旋, 龙卷涡旋特征, 龙卷残片特征, 灾害调查

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2503.24089

Analysis on the Causes of the Extreme Winds on March 31, 2024, in Nanchang, Jiangxi Province

Li Shufan¹ Wang Xiuming¹ Liu Yijing² Li Haijun³ Fan Limiao⁴ Yu Xiaoding¹ Tang Huan¹

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Jiangxi Zhulei film and television culture media Co., LTD, Nanchang 330025

3 Jiangxi Central Meteorological Observatory, Nanchang 330096

4 Hangzhou Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310051

Abstract: Extreme winds disaster occurred in Nanchang, Jiangxi Province in early morning on March 31, 2024, which is responsible for the fall of three residents from a high building. Based on SAD dual-polarization Doppler weather radar observations from Nanchang and surface observations, this study analyzed the fine structure of the severe storm near the accident building. The results revealed that a bookend vortex was embedded in the northern end of the bow echo within a quasi-linear convective system around the time of the accident, with its horizontal scale and vertical vorticity comparable to that of a strong mesocyclone. Tornado vortex signatures (TVS)

收稿日期 2025-03-13; **网络预出版日期**

作者简介 李淑璠, 女, 1996 年出生, 工程师, 主要从事强对流短临预报研究, E-mail: lishufan@cma.gov.cn

通讯作者 王秀明, 女, 1977 年出生, 博士, 正研, 主要从事强对流短临预报教学和研究, E-mail:

wangxm@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金 42375018

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42375018)

35 with tornado debris signatures (TDS) were identified in the center of the bookend vortex which
36 passed over the accident building. The rotational velocity of the TVS exceeded $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Damage
37 surveys conducted along the tornado path identified by TVS and TDS revealed multiple tornadic
38 damages, including strong cyclonic rotational winds, localized convergent rotational winds,
39 debarked trees and complete collapse of stone bridges. This indicated that an EF2 tornado
40 occurred very close to the accident building, most likely responsible for the fatal fall. It is
41 noteworthy that the tornado-related vortices include a bookend vortex and several leading-edge
42 misocyclones embedded within it, which emerged and intensified almost simultaneously in this
43 event. The observational study on the formation mechanisms indicated that those tornado-related
44 vortices resulted from the tilting of the horizontal vorticity. The horizontal vorticity is associated
45 with the strong low-level vertical shear of the elevated rear-inflow jet and the baroclinic vorticity
46 related to the gust front.
47 **Key Words:** tornado, bow echo, bookend vortex, TVS, TDS, damage survey

48 1 引言

49 2024年3月31日2—4时(北京时,下同),有弓形回波影响江西省南昌市,伴随雷
50 电、大风和短时强降水等强对流天气,导致5人死亡、10余人受伤。其中,南昌市内伟梦
51 清水湾小区出现两起居民受风灾影响坠楼身亡事件,共致3人死亡,该小区及周边小区多处
52 房屋损坏,引发社会广泛关注。本次过程南昌地区气象观测站记录的最大极大风 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
53 但该极大风出现的时间和地点均距事发楼栋较远。根据地面观测,伟梦清水湾小区附近地面
54 测站(相距3 km左右)记录的极大风均在 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图1),表明事发楼栋的极端强风
55 比较局地,影响范围小,风灾成因有待研究。

56 一般而言,局地极端对流性强风可由龙卷风或下击暴流造成。龙卷风和下击暴流均为大
57 气对流活动引发的局地强风,前者为旋转风,后者为辐散风。Fujita(1981)首次提出了下
58 击暴流发展过程中的气流结构概念模型,将其界定为由对流单体强下沉气流到达地面引发的
59 爆发性辐散出流。下击暴流根据水平尺度可以分为微下击暴流(小于4 km)和宏下击暴流
60 (大于4 km),有时微下击暴流中还会镶嵌更小尺度的下击暴流条迹(burst swath)。龙卷
61 是从积雨云下垂并延伸至地面的猛烈旋转的漏斗状云柱,直径约为100 m,生命史大多在10
62 分钟以内,也有少数能维持1小时(Markowski and Richardson, 2010)。龙卷在中国发生的
63 频率不高,EF2级以上的龙卷平均每年仅发生3.3次(范雯杰和俞小鼎, 2015),但由于龙
64 卷尺度小、突发性强、破坏力大,加之中国人口密度大,常造成重大人员伤亡(俞小鼎等,
65 2008; Meng and Yao, 2014; 张小玲等, 2016; 李兆慧等, 2017; Yao et al., 2018; 张涛等,
66 2020; 徐敬涵等, 2024)。

67 根据龙卷母体风暴结构特征,可将龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷,二者又可
68 以分别称为中气旋龙卷和非中气旋龙卷(Trapp and Davies-Jones, 1997)。非中气旋龙卷多
69 出现在具有明显水平风切变的中尺度边界层附近,而且边界层在龙卷生成前通常预先存在小
70 涡旋(misocyclone),比如边界层辐合线或者阵风锋前沿的小涡旋(Wakimoto and Wilson, 1989;
71 Lee and Wilhelmson, 1997; Thompson et al., 2012)。阵风锋前沿近地层的小涡旋可引发下击
72 暴流等直线型致灾强风,亦可引发飏前龙卷,但强度一般在EF2级以下(Fujita, 1978)。此
73 外,飏线或弓形回波上的低层 γ 中尺度涡旋内亦可出现龙卷,涡旋尺度与超级单体内的中气

74 旋大致相当或更大,垂直伸展通常更浅薄,可孕育龙卷亦可引发直线型大风,龙卷强度可达
75 EF2 级以上(刘勇等,1998; Trapp and Weisman, 2003; Weisman and Trapp, 2003; 俞小鼎和
76 郑永光, 2020)。特别地,有一类中尺度涡旋最初往往以弓形回波北端的气旋性涡旋与南端
77 的反气旋性涡旋成对出现,又称“书挡涡旋”(bookend vortex)(Fujita, 1978; Weisman, 1993)。
78 在科氏力作用下通常气旋性涡旋加强而反气旋涡旋减弱消失(Trapp and Weisman, 2003;
79 Wakimoto et al., 2006; Atkins and St. Laurent, 2009),位于弓形回波北端的书挡涡旋中也可能
80 有龙卷产生(Pfost and Gerard, 1997)。弓形回波低层 γ 中尺度涡旋或书挡涡旋主要形成机
81 制如下:(1) 风暴下沉气流扭转斜压性水平涡度产生,对发展中的准线性对流系统
82 (quasi-linear convective systems, 简称 QLCS)而言,这种水平涡度与降水相关的冷出流有
83 关;对于成熟的 QLCS 而言,这种水平涡度与后侧入流急流(rear-inflow jet, 简称 RIJ)下
84 方的风垂直切变有关,与之对应的下沉气流通常位于阵风锋后数公里(Trapp and Weisman,
85 2003; Wakimoto et al., 2006);(2) 对于成熟的弓形回波,飚线冷池造成的斜压性水平涡线
86 被回波前沿的上升气流抬升,从而在涡线两端形成旋转方向相反的两个涡旋(Atkins and St.
87 Laurent, 2009; Markowski and Richardson, 2010),这是目前比较公认的书挡涡旋形成机制;
88 (3) 地表摩擦作用可在近地面(200~300 m 高度以下)产生水平涡度,对于中尺度涡旋的
89 形成可能存在贡献(Xu et al., 2015)。

90 龙卷的监测预警主要基于多普勒天气雷达识别出的中气旋和龙卷涡旋特征(Tornado
91 Vortex Signature, TVS)(Moller, 2001; 俞小鼎等, 2006)。中气旋为对流风暴中直径为 2~10
92 km 的气旋性涡旋,垂直涡度量级一般达到 10^{-2} s^{-1} 。TVS 通常定义为一个波束宽度内径向速
93 度差超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的相邻方位角速度对(Brown et al., 1978; Meng and Yao, 2014; Bai et al.,
94 2017)。中气旋和 TVS 等涡旋的直径一般用径向速度对极大值中心距离来度量。当龙卷尺
95 度的涡旋直径大于雷达有效波束宽度时,该龙卷涡旋的速度对中心通常至少间隔一个方位
96 角,这种涡旋特征也被称作龙卷特征(Tornado Signature, TS)(Brown, 1998)。实际上,
97 雷达的有效波束宽度会随着与雷达距离的增加而增大,因此,相同尺度的龙卷涡旋会在距离
98 雷达较近时表现为 TS 而距离较远时表现为 TVS(Brown et al., 2002)。本文不特别区分 TVS
99 与 TS,统一称作 TVS。此外,偏振天气雷达还能够区分气象目标物与非气象目标物,从而
100 识别被及地的龙卷涡旋卷入空中漂浮的残片,包括建筑块、树枝、树叶等,即龙卷残片特征
101 (Tornado Debris Signature, TDS),是龙卷监测预警的重要参考(Markowski and Richardson,
102 2010; Bodine et al., 2013)。

103 天气雷达主要用于龙卷的监测预警,而确定龙卷事件的发生一般还需要目击者报告、灾
104 害现场调查或者视频监控等(郑永光等, 2018)。在夜间或发生较强降水等能见度较差的情
105 况下,雷达判识的 TDS 可用于确认龙卷发生(Kumjian and Ryzhkov, 2008; Xue et al., 2016)。
106 Fujita et al. (1970)开创了风灾调查工作,并于 1971 年提出了风灾强度等级估计标准(Fujita,
107 1971),一般称之为 F 等级,后续美国得克萨斯技术大学联合多个部门专家对 F 等级进行
108 了修订,称为 EF 等级。中国专业性致灾强风的调查始于 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨期
109 间发生在通州区的超级单体龙卷(Meng and Yao, 2014)。龙卷风灾调查是通过现场和天
110 气背景情况的勘察、取证、评估和分析来确定风灾是否由龙卷造成以及致灾龙卷的强度、路
111 径和影响范围,并通过树木倒伏及碎屑形态来推断龙卷的结构(Davies-Jones et al., 1978;
112 Meng and Yao, 2014; 郑永光等, 2018; 张涛等, 2020)。龙卷造成的灾情主要具有两个特征:
113 a) 灾情区域通常呈狭长型分布, b) 倒伏物呈辐合或旋转状特征;与之相比,下击暴流导致
114 的灾损通常路径较宽,呈高度辐散的直线或曲线型,此外,多个微下击暴流条迹相互作用时
115 也会出现小范围倒伏物呈辐散与辐合交替分布的情况(Davies-Jones et al., 1978; Fujita, 1978,

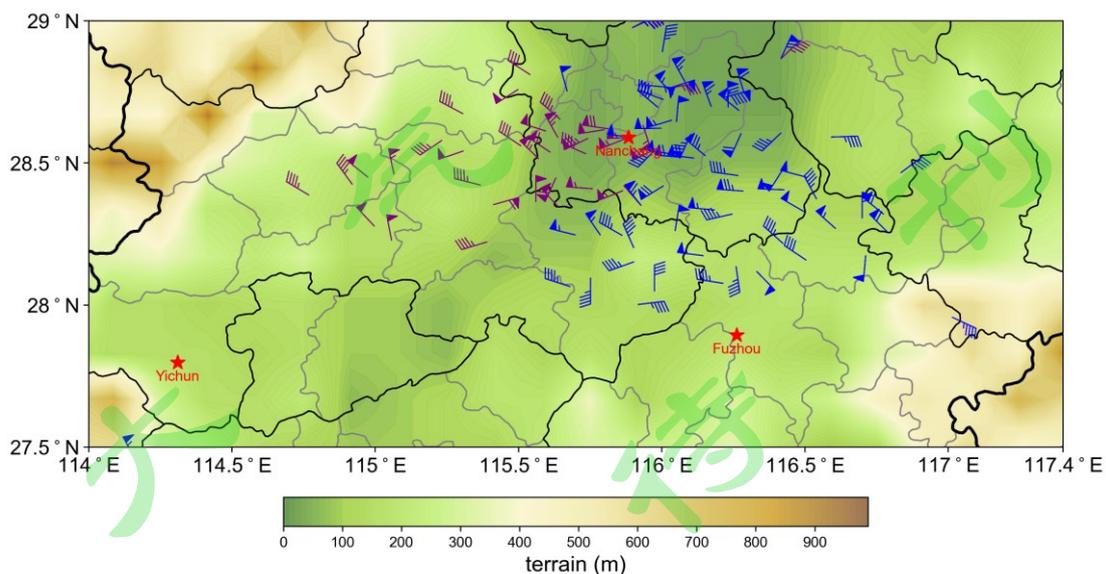
116 1981; Wilson and Wakimoto, 2001; Doswell, 2003; Meng et al., 2016; 郑永光 等, 2016a; 郑永
117 光 等, 2016b; 朱文剑 等, 2016; 李兆慧 等, 2017; 黎立页 等, 2023)。Fujita (1978) 指出
118 有时强下击暴流和龙卷所造成的灾情现场较为相似, 不易辨别。不过, 当地面灾情与雷达观
119 测识别的中气旋或 TVS 路径相吻合时, 可以判定龙卷发生。

120 此次南昌极端强风天气发生在夜间, 本文首先基于偏振雷达及其反演的风场, 分析了风
121 暴的中小尺度结构, 重点分析了龙卷相关涡旋; 然后基于偏振雷达判识的 TVS 和 TDS 给出
122 疑似龙卷路径, 最后根据疑似龙卷路径展开灾情调查, 并结合事发后当地气象部门的灾情调
123 查, 揭示事发楼栋附近极端强风的成因。此外, 还基于观测资料对龙卷相关涡旋形成的物理
124 过程进行了讨论。

125 2 资料与方法

126 2.1. 资料

127 本研究主要基于江西南昌 (Z9571) 的 SAD 型具有双偏振功能的多普勒天气雷达, 风
128 场反演结合了江西抚州 (Z9574) 和宜春 (Z9575) 的 SA 型天气雷达。S 波段天气雷达探测
129 范围为 460 km, 垂直扫描 9 个仰角 (依次为 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、
130 19.5°), 体扫时间间隔为 6 分钟, 每次体扫包含 360 个径向数据, 库长 250 m。事发楼栋与
131 南昌雷达站距离小于 10 km, 可探测到风暴低层精细结构, 包括小尺度涡旋和云微物理特征。
132 抚州雷达位于南昌雷达东南方向 84 km 处, 宜春雷达位于南昌雷达西南方向 174 km 处 (见
133 图 1)。在对流风暴自西向东经过南昌雷达站产生极端强风时段, 上述三部雷达均可探测到
134 风暴的弓形结构特征, 即可以捕捉到风暴及其主要环流特征。因此, 本研究利用以上三部天
135 气雷达进行风场反演, 用于分析风暴的中小尺度流场结构。由于 0.5°仰角数据受地物杂波的
136 干扰严重, 大范围的相关系数 (Cross-correlation Coefficient, CC) 低值表明数据质量较差,
137 所以本文分析均未采用 0.5°仰角雷达数据。此外, 本文采用了国家站逐小时观测和区域站五
138 分钟加密观测资料分析地面气象要素变化。



139
140 图 1 2024 年 3 月 31 日南昌及周边地区 02—03 时 (紫色风羽)、03—04 时 (蓝色风羽) 超过 $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (即
141 达到 8 级大风标准) 观测站小时极大风、雷达站位置 (红色五角星) 与地形高度 (填色, 单位: m)。

142 Fig. 1 The 1h maximum wind over $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in 02:00-03:00 BT (purple barb) and 03:00-04:00 BT (blue barb) at
143 observation stations, the positions of the radar station (red stars) and terrain height (shaded, units: m) in Nanchang
144 and surrounding areas on March 31, 2024.

145 2.2. 风场反演方法

146 为了客观描述不同尺度的中尺度涡旋，本研究采用 PyDDA 软件 (Jackson et al., 2020)
147 基于雷达径向速度观测值反演三维风场。该软件已经封装在 Python 语言中，能够吸收任意
148 数量的雷达站点和其他风场数据源的径向速度数据。风场反演方法的关键是利用三维变分法
149 直接同化双偏振多普勒气象雷达速度资料。该技术不仅对边界条件和受污染数据不敏感，而
150 且可以用于单一雷达覆盖区域的风场反演 (Gao et al., 1999)。通过增加非弹性垂直涡度方
151 程约束，也可以提高垂直速度的反演准确性 (Potvin et al., 2011)。基于 PyDDA 风场反演结
152 果对引发郑州“7.20”极端强风风暴尺度环流分析表明，可反演出公里尺度的涡旋 (Wang et
153 al., 2023)。本文采用南昌、抚州、宜春三部雷达进行风场反演。时间以南昌雷达为准，选
154 取时间误差在 3 分钟以内的抚州和宜春雷达的体扫时次作为一组进行反演，比如 02 时 50
155 分的雷达反演结果是由 02 时 50 分南昌雷达、02 时 47 分抚州雷达和 02 时 51 分宜春雷达的
156 基数据反演而得。

157 2.3. TVS 和 TDS 判识标准

158 TVS 的定义有 3 个指标，包括切变、垂直方向伸展及持续性，其中切变强度最为重要。
159 随着观测手段的精细化，美国国家天气局决策预警培训中心 (Warning Decision Training
160 Division, 简称 WDTD, [https://training.weather.gov/wdtd/courses/\[2025-02-10\]](https://training.weather.gov/wdtd/courses/[2025-02-10])) 给出的 TVS
161 判定标准已被广泛使用，具体为：有一定强度的切变，即最低仰角的涡旋速度对径向速度差
162 超过 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，或各仰角的最大径向速度差超过 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；涡旋垂直伸展高度至少达到 1.5 km ；
163 维持至少 5 分钟。此外，WDTD 还基于偏振雷达给出识别 TDS 的方法：在径向速度图上识
164 别到 TVS，该涡旋速度对范围内或附近的 CC 小于 0.9，且 CC 小于 0.9 的区域反射率因子
165 值大于 35 dBZ 、差分反射率因子 (Differential Reflectivity, Z_{DR}) 接近零或为负值。其中，
166 Z_{DR} 特征没有 CC 特征显著，非判识 TDS 的必要条件，但可以增加判识结果的可信度。

167 本研究参考 WDTD 的 TVS 和 TDS 判定标准来判识龙卷。另外，南昌雷达低层因质量
168 问题可能出现高反射率因子杂波对应 CC 低值，为避免误判 TDS 特征，本文将反射率因子
169 强度阈值从 35 dBZ 调高至 45 dBZ ，将 CC 低阈值从 0.9 调低为 0.8；为避免将阵风锋前的
170 CC 低值和 Z_{DR} 异常值判识为 TDS，要求 CC 低值对应的强回波区与弓形回波主体相连而非
171 孤立。TDS 一般宽约 1 km ，高 $1\sim 3 \text{ km}$ (Ryzhkov et al., 2005)。研究表明，强龙卷的 TDS
172 伸展高度更高，EF2 级及以上强度龙卷的 TDS 大多可伸展到距地 3 km 以上 (Entremont,
173 2015)，如果 TDS 对应的反射率因子强度大于 50 dBZ ，那么 EF2 级以上龙卷出现的概率较
174 高。

175 2.4. 灾情调查

176 现场调查组共在事发楼栋附近进行了两次较为细致的灾情调查，图 2 给出了两次灾调的
177 主要区域和路径。第一次灾情调查于 4 月 3 日下午进行，范围为事发楼栋及象湖湿地公园，
178 主要采用手机拍摄和居民走访的方式，调查路径约 30 km (图 2 红线)。第二次灾情调查时
179 间为 4 月 7—9 日，现场调查组根据雷达资料给出的疑似龙卷路径，重点调查了紧邻事发楼
180 栋的象湖湿地公园 (图 2 黄线)，该公园与事发楼栋仅一路之隔，公园主体位于事发楼栋东

181 北侧。第二次灾情调查路径长约 20 km，经手机摄影和无人机航拍获得影像素材累计 300 条
182 （段）。本研究选取灾调结果中能清晰指示灾毁时风向，且周围具有大量清晰的、相同风向
183 的破坏性大风痕迹的素材作为灾损示踪材料进行分析。



184
185 图 2 灾情调查路径（红线和黄线分别为 2024 年 4 月 3 日、4 月 7—9 日两次灾情调查路径，白色虚线区域
186 为象湖湿地公园，底图为吉林一号卫星地图）。

187 Fig. 2 The paths of damage surveys based on the Jilin-1 satellite map. The red and yellow line represent the survey
188 path on April 3 and April 7-9, 2024 respectively. The area circled by the white dotted lines represents Xianghu
189 Wetland Park.

190 3 结果与分析

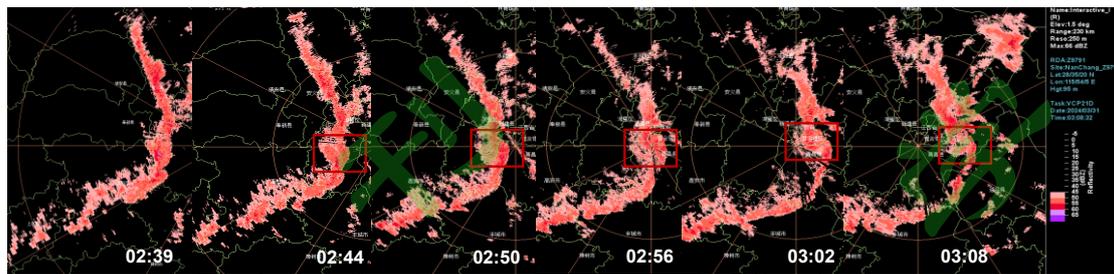
191 3.1. 弓形回波顶端附近的中尺度涡旋

192 3.1.1 反射率因子图上的书挡涡旋

193 本次在江西南昌产生极端大风的对流风暴最初在湖南省东北部触发，于 2024 年 3 月 30
194 日 23 时 40 分左右形成水平尺度超过 100 km 的东北—西南向线性风暴，位于湖南岳阳上空，
195 随后以平均约 70 km·h⁻¹ 的速度向南昌移动。01 时左右线性风暴进入江西省西北部，随着西
196 南侧不断有风暴单体新生并入，线性风暴发展为高度组织化的飢线，于 02 时整体呈弓形，
197 距南昌雷达站约 100 km。飢线在东移过程中弓形曲率增大，03 时左右移经南昌雷达站上空，
198 之后加快东移并减弱。

199 由图 3 可见，02 时 39 分—03 时 08 分（下文无特别说明均为雷达每次体扫开始的时间）
200 的飢线整体长约 200 km，呈明显弓形，且在中间部位出现了一个中尺度涡旋（如图 3 红框
201 所示），位于飢线中段一个水平尺度数十公里的弓形回波北端，即“书挡涡旋”。02 时 44
202 分，飢线中段弓形回波位于南昌雷达站正西约 16 km 处，其北端的书挡涡旋开始形成。02 时 50
203 分，书挡涡旋处的反射率因子曲率明显增加，弓形凸起（弓形回波曲率最大处）位于
204 南昌雷达站西侧约 2 km 处。02 时 56 分，书挡涡旋随飢线移动至南昌雷达站上空，随后持
205 续随飢线东移，03 时 08 分后逐渐减弱。在图 3 红框标记的书挡涡旋以北及以南各还有一段

206 呈弓形的回波，因而线性风暴整体呈现为内含多个弓形回波的长飚线，也被称为波型线状回
207 波（line echo wave pattern, LEWP）（Nolen, 1959）。



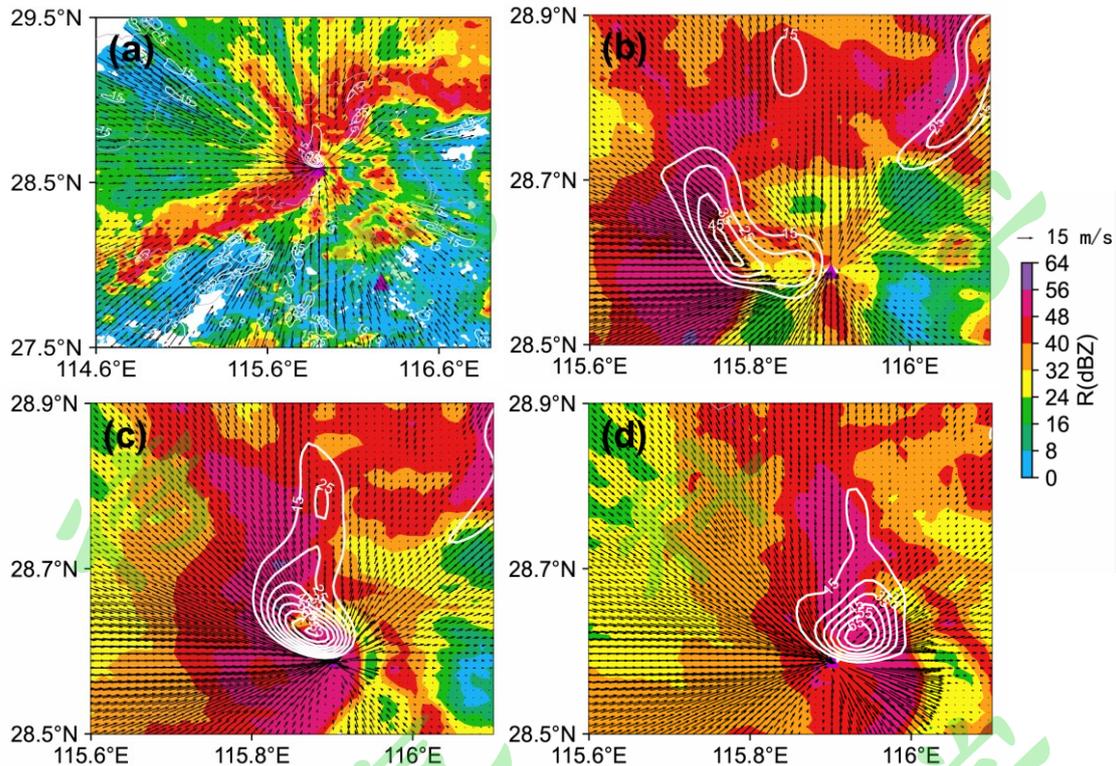
208

209 图 3 2024 年 3 月 31 日 02 时 39 分—03 时 08 分南昌雷达站 1.5°仰角 45 dBZ 以上基本反射率因子演变（红
210 框标注区域为书挡涡旋）。

211 Fig. 3 The evolution of basic reflectivity above 45 dBZ at 1.5° elevation in Nanchang radar station from
212 03:08 BT on March 31, 2024 (the red box indicates the bookend vortex).

213 3.1.2 反演风场上的书挡涡旋

214 根据抚州雷达径向速度图上的涡旋和多雷达反演的风场垂直涡度大于 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的范
215 围，02 时 44 分书挡涡旋直径约 5 km，02 时 52 分左右增至 7 km，02 时 58 分至 03 时 04 分
216 达 9 km（图略）。02 时 44 分左右，书挡涡旋形成于弓形回波低层偏西出流与移动前方偏东
217 入流之间强烈的水平切变处（图 4b），强切变处在距地 0.9~3 km 高度范围内的涡度值均超
218 过 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ （图略），此时涡度中心处以切变辐合风为主，涡旋速度对尚不清晰。02 时
219 50 分左右，距地 0.3~2.2 km 高度范围的强切变处涡度均超过 $5.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ （图略），其中 0.9
220 km 高度的涡度最强，中心强度达到 $8.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，位于向北凸起的“逗点状”回波头部（图
221 4c）。02 时 56 分左右，距地 0.3~1.6 km 高度的涡度中心仍超过 $5.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，其中 1.1 km
222 及以下高度的中心值超过 $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。书挡涡旋形成后，距地 0.3 km 处的低层涡度亦较强，
223 02 时 50 分为 $5.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，02 时 56 分为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ （图略），有利于孕育龙卷。



224
 225 图 4 2024 年 3 月 31 日 02 时 44 分、02 时 50 分和 02 时 56 分 0.9 km 高度处的多普勒雷达基本反射率因子
 226 (填色, 单位: dBZ)、雷达反演的风场(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和涡度场(白色等值线, 单位: 10^{-4} s^{-1}),
 227 分辨率为 $1\times 1 \text{ km}$; (a) 02 时 50 分波型线状回波整体形态, (b) — (d) 三个时次的书挡涡旋。

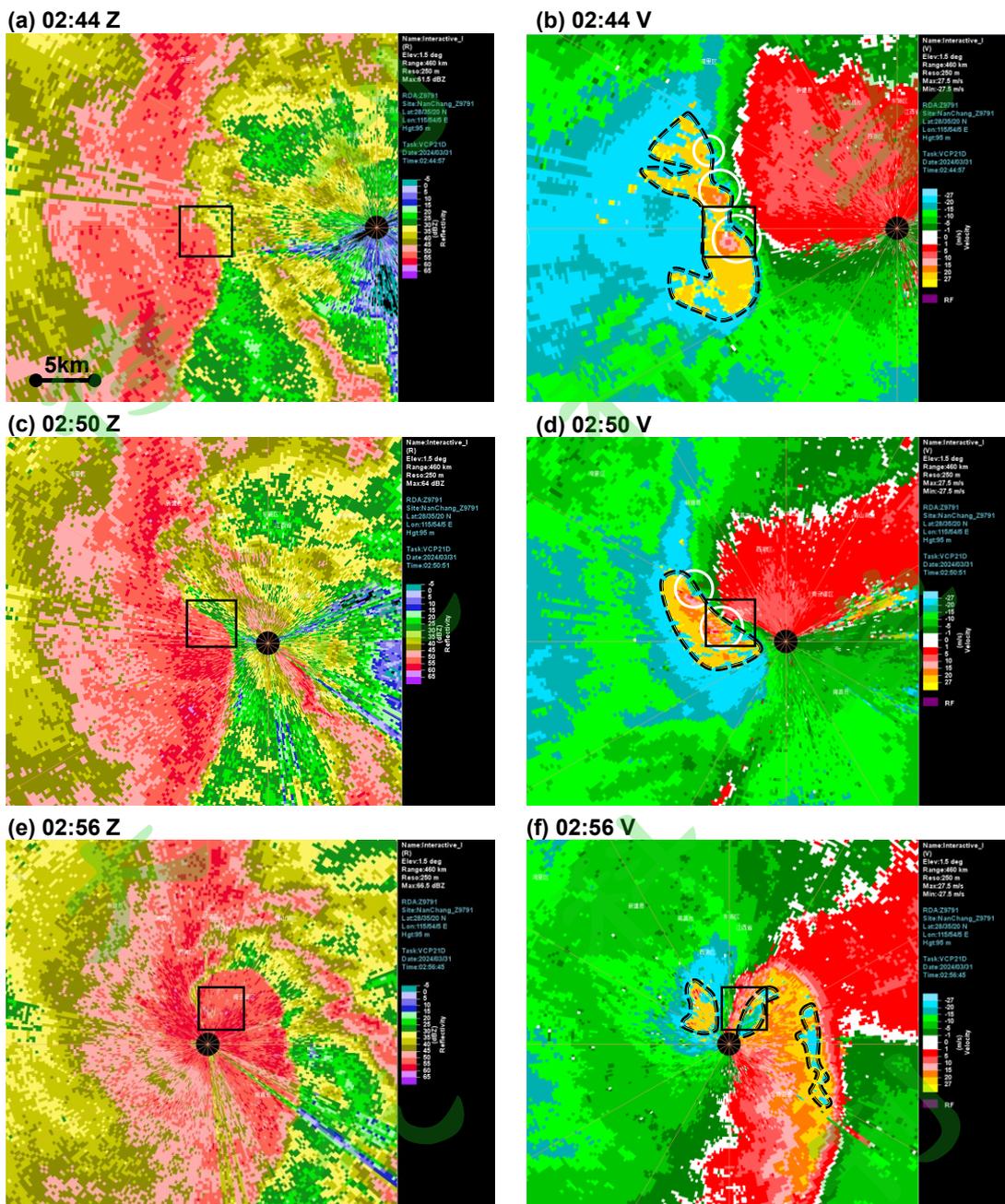
228 Fig. 4 Doppler radar basic reflectivity (shaded, units: dBZ), wind (vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and vorticity (white
 229 contours, units: 10^{-4} s^{-1}) retrieved from radar at 02:44, 02:50, and 02:56 BT on March 31, 2024, with resolution of
 230 $1\times 1 \text{ km}$. (a) the overall shape of the line echo wave pattern (LEWP) at 02:50 BT, (b) – (d) the bookend vortex at
 231 the three respective times.

232 3.1.3 径向速度图上内嵌小涡旋的书挡涡旋

233 图 5 给出了南昌雷达 1.5° 仰角上的书挡涡旋演变过程。书挡涡旋对应的速度对在 02 时
 234 56 分结构最为清晰(图 5f), 离开雷达与朝向雷达的径向速度中心均出现速度模糊(如图
 235 5b、d 和 f 黑色双虚线所圈区域), 退模糊后两个速度中心值均超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 旋转速度达
 236 到 $48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 远超 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强中气旋阈值, 对应垂直涡度值为 $25\sim 38\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 表明此时书
 237 挡涡旋异常强烈, 出现龙卷的概率较高。在对应的反射率因子图上, 弓状回波北端凸起, 呈
 238 “逗点状”, 亦表明有较强的气旋式旋转。如图 5d 所示, 上一体扫(02 时 50 分)书挡涡旋
 239 在径向速度图上呈现极不对称的速度对, 朝向雷达速度远大于离开雷达的速度, 并出现了
 240 明显的速度模糊, 旋转速度为 $34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

241 值得注意的是, 02 时 50 分朝向雷达的大风区内可见两个速度大值中心, 退模糊后速度
 242 均为 $50.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 各自与其北侧的径向速度低值中心构成两个直径 $1\sim 3 \text{ km}$ 的小涡旋(如图
 243 5d 白圈所示)。这两个小涡旋由 02 时 44 分阵风锋前沿的小涡旋(如图 5b 两个大白圈所示)
 244 发展而来, 此外, 二者北侧还有一个持续时间短的小涡旋(如图 5b 小白圈所示)。两个小
 245 涡旋 02 时 44 分至 02 时 50 分增强且逐渐靠近, 至 02 时 56 分完全并入书挡涡旋, 小涡旋消
 246 失而书挡涡旋整体增强。书挡涡旋过南昌雷达站后再次呈现不对称结构, 表现为离开雷达的
 247 大值中心, 旋转速度减弱至 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图略)。抚州雷达(03 时 04 分)在距地 3 km 以

248 下仍可监测到清晰的书挡涡旋速度对和反射率因子图上的涡旋回波,之后涡旋迅速减弱消失
 249 (图略)。



250
 251 图 5 2024 年 3 月 31 日 02 时 44 分、50 分和 56 分南昌雷达站 1.5°仰角的多普勒雷达基本反射率因子和径
 252 向速度 (黑色双虚线所圈区域为书挡涡旋附近的的速度模糊区; 黑框表示图 6 对应时次的显示区域; 白圈表
 253 示小涡旋)。

254 Fig 5 Doppler radar basic reflectivity and radial velocity at a 1.5° elevation in Nanchang radar station at 02:44,
 255 02:50 and 02:56 BT on March 31, 2024. The velocity-aliasing regions around bookend vortex are divided by the
 256 black double dashed line. The black box in (a), (c) and (e) indicates the displayed area of Fig. 6 (a), (b) and (c)
 257 respectively. The misocyclones are depicted by the white circles.

258 3.2. 龙卷涡旋特征和龙卷残片特征

259 3.2.1 影响事发楼栋前

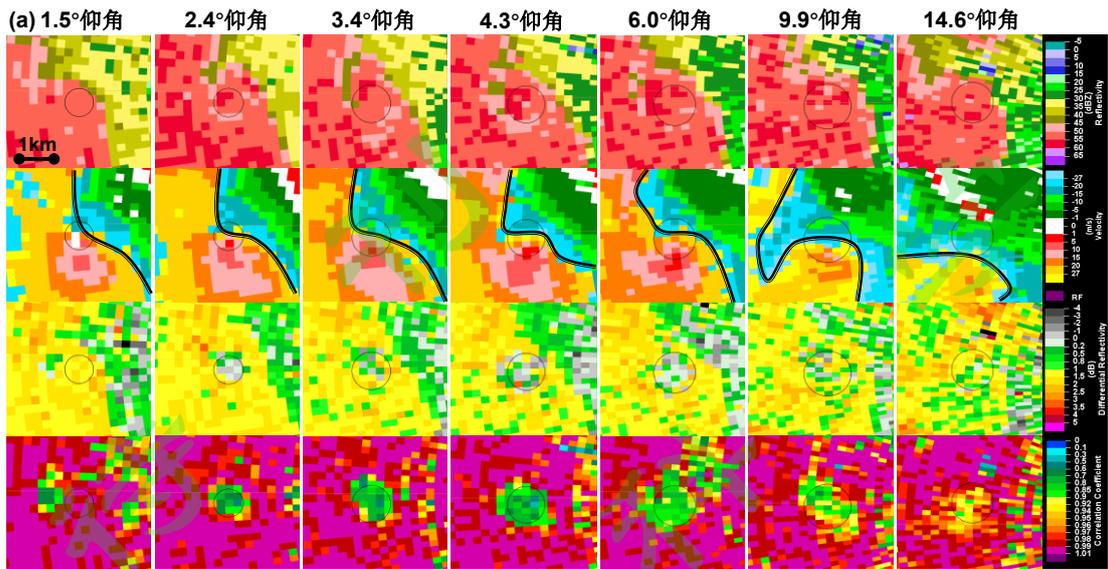
260 书挡涡旋内部的一个小涡旋在低层强度和尺度均达到 TVS 标准，且有对应的 TDS。图
261 6 给出了南昌雷达探测的 02 时 44 分、02 时 50 分、02 时 56 分三个体扫的 TVS 及其附近的
262 TDS。因为雷达每个时次的扫描为由低到高仰角依次进行，所以在同一体扫时次中，仰角越
263 高，对应的实际时间越晚，由此给出 TVS 与 TDS 的演变时序图（图 7）。

264 02 时 44 分线状风暴前沿存在至少两个速度差达 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小涡旋（如图 5b 两个大白圈
265 所示），图 6a 给出了其中一个较强的小涡旋（图 5b 黑框区域）的精细结构。小涡旋速度对
266 在 1.5° 仰角（距地 500 m）直径 0.8 km、径向速度差达 $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，对应垂直涡度为 $0.8 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，
267 达到 TVS 标准。小涡旋在 $2.4\text{--}9.9^\circ$ 仰角均可识别， 3.4° 仰角达到最大值 $41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （涡旋直径
268 0.8 km，可估得涡度值为 $1.4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）， 6.0° 仰角以上（距地约 1 km）涡旋直径增大至 1.4 km
269（估得涡度值为 $0.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）。综上，小涡旋尺度在低层小于 1 km，随着高度增大至接近
270 3 km，涡旋整体呈漏斗状，速度差均在 $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上，垂直涡度达 10^{-1} s^{-1} 量级。

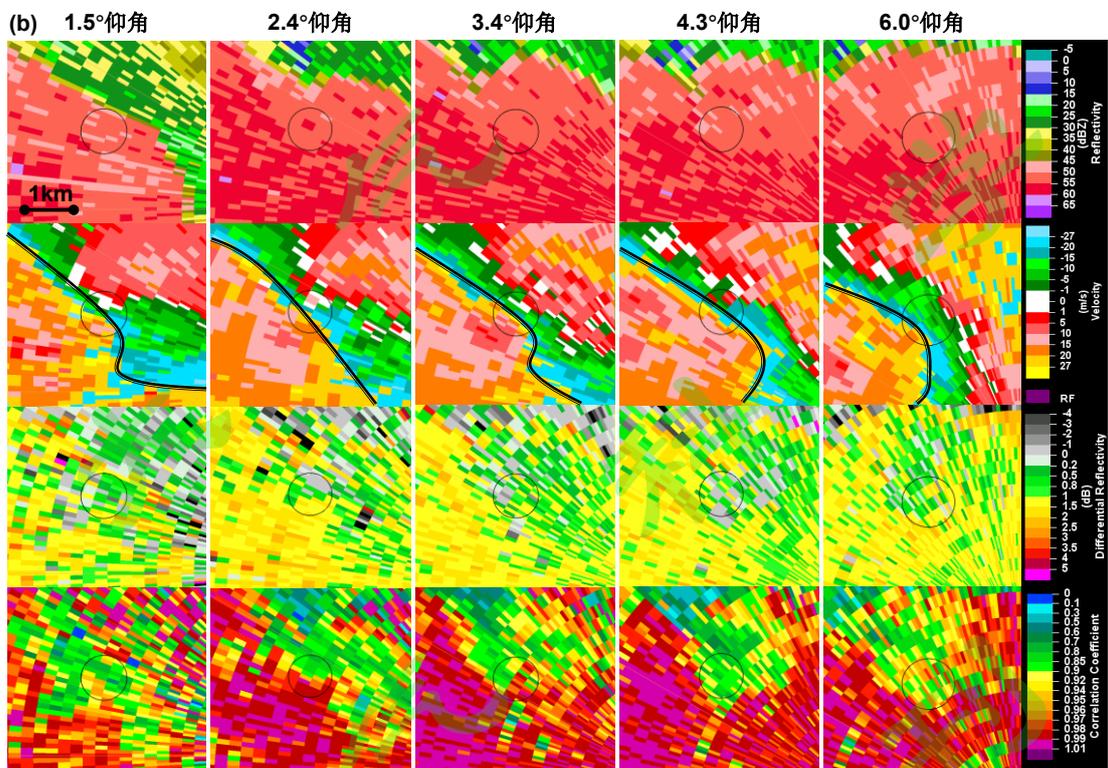
271 值得注意的是，爬线的朝向雷达的出流较强，图 6a 黑色实线西南侧区域均为速度模糊
272 区，爬线强出流叠加小涡旋使得小涡旋南侧的径向速度中心值异常大，退模糊可得径向速度
273 中心值为 $-52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这一方面使得小涡旋呈现出极不对称径向速度模态，另一方面亦表明百
274 米尺度范围内强风的破坏程度可达 EF2 级。这种强风破坏由尺度约 20 km 的直线型阵风锋
275 与尺度小于 2 km 的小涡旋共同叠加形成。

276 该 TVS 处有对应的 TDS，即对应 CC 为低值（图中蓝绿色区域）、 Z_{DR} 接近零或负值
277（图中灰色区域），回波强度为 50~58 dBZ。 1.5° 仰角上的 TDS 位于 TVS 西侧约 1 km，根
278 据 CC 为 0.8 的范围测量的 TDS 水平尺度约 0.6 km，很可能是 TDS 开始产生的时间。随着
279 仰角抬高，TDS 与 TVS 重合，尺度在 0.6~1.3 km 之间。南昌雷达的扫描模式为 VCP21，对
280 于最低的两个仰角采用分离取样方式，即先以连续监测模态扫描获得反射率因子，再以连续
281 多普勒模态扫描得到径向速度（俞小鼎 等, 2006），所以 1.5° 仰角的 TDS 位于 TVS 上风方
282（西侧）。 $14.6\text{--}19.9^\circ$ 仰角的涡旋尺度增大至 2 km 以上，其中 14.6° 仰角速度对水平尺度
283 2.7 km、旋转速度 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，距地高度 1.8 km，对应范围内的 CC 低值小于 0.9， Z_{DR} 接近零，
284 仍显示出 TDS 特征，表明 TDS 垂直伸展较高。在 4.3° 仰角 TDS 处有网络视频
285（<https://v.douyin.com/ifQ7wJD2/> [2025-02-10]）记录到某酒店门前的大树被拔起，酒店前的
286 所有设施均被吹翻。

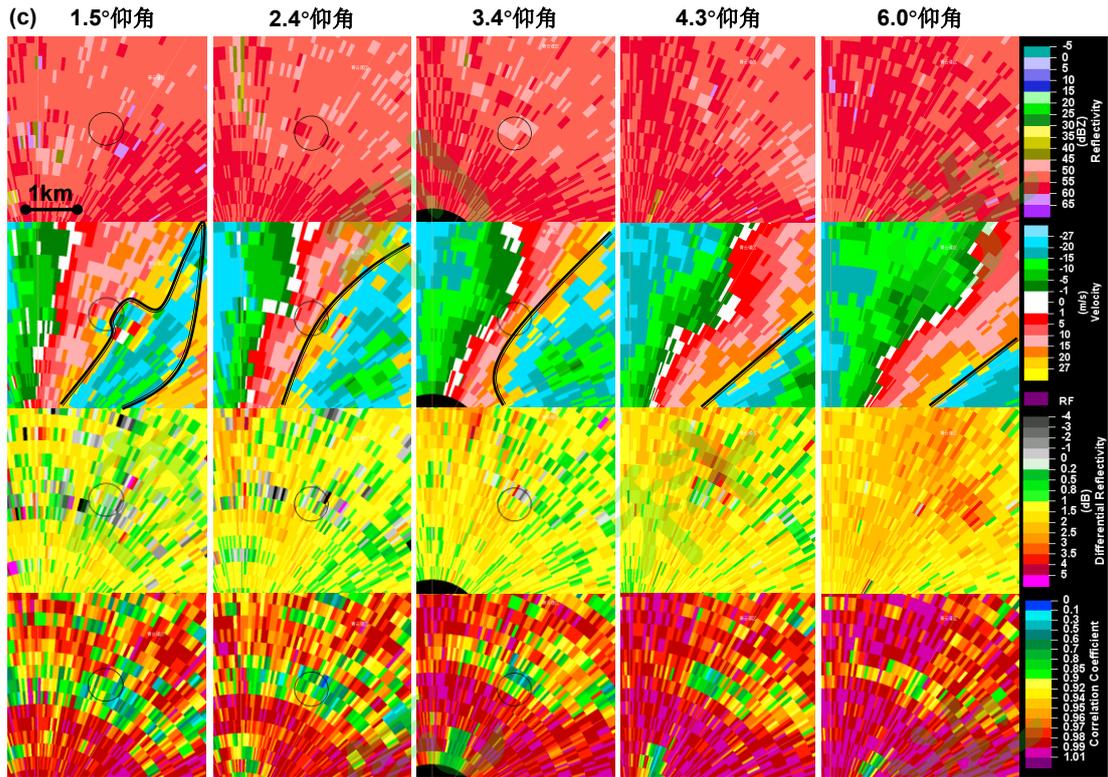
287



288



不 備



289

290 图 6 南昌偏振雷达 02 时 44 分 (a)、02 时 50 分 (b) 和 02 时 56 分 (c) 识别到的 TVS 和 TDS (第 1—4
291 行依次为反射率因子、径向速度、 Z_{DR} 和 CC。圆圈表示 TVS 范围, 径向速度图中黑色双实线的细线一侧
292 表示出现速度模糊的区域)。

293 Fig. 6 TVS and TDS at 02:44 (a), 02:50 (b) and 02:56 (c) BT in Nanchang radar (rows 1–4 show basic reflectivity,
294 radial velocity, Z_{DR} , and CC, respectively. The circles indicate the mesoscale vortex. The thin-solid-line side
295 divided by the black double solid line indicates the velocity-aliasing region in radial velocity figures).

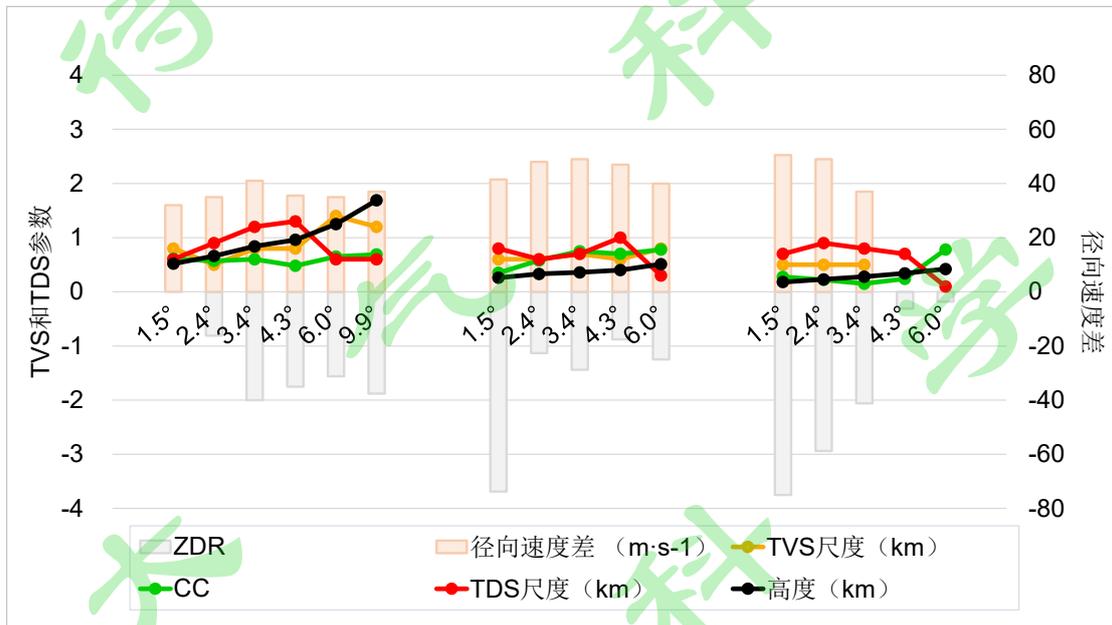
296 3.2.2 影响事发楼栋时段

297 02 时 50 分书挡涡旋强烈发展并向东移至南昌雷达东北侧 4~5 km, 其内小涡旋位于书
298 挡涡旋中心附近 (图 5c 和 d), 弓形回波北端随仰角抬高向东北凸起愈发显著, 其前侧入
299 流缺口也变得愈发清晰。图 6b 为书挡涡旋中心的 TVS 及其对应的 TDS, TVS 速度差最强
300 达到 $49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应垂直涡度达到了 10^{-1} s^{-1} 量级, 是书挡涡旋内最强的 TVS, 对应 TDS 尺
301 度 1 km 以下, 距地高度 0.5 km (图 7)。

302 该 TVS 在 1.5° 仰角 (距地 0.2 km) 直径约 0.6 km, 径向速度差达到 $41.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应的
303 TDS 直径约 0.8 km, 2.4° 仰角的 TVS 相对于 1.5° 仰角向北偏东移动, 速度差达 $48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。书
304 挡涡旋的旋转速度在 3.4° 仰角增强至 $37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中心的 TVS 径向速度差亦增至 $49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
305 TVS 处有宽约 0.7 km 的 TDS, 位于事发楼栋西侧约 1 km。TVS 在 4.3° 仰角直径 0.6 km, 涡
306 度值为 $1.57 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 对应的 TDS 南缘紧挨着事发楼栋, 相距约 0.3 km。 6.0° 仰角上书挡
307 涡旋中心的 TVS 涡度值为 $1.03 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 而且其西南缘与事发楼栋相距仅 0.3 km。 4.3° 和 6.0°
308 仰角的书挡涡旋旋转速度约 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中心 TVS 涡度值达 $1 \sim 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 并伴有明显的 TDS,
309 表明此时事发楼栋周围的强风主要为旋转风, 书挡涡旋中心的 TVS 处极有可能出现了强龙
310 卷风。此时事发楼栋位于 TVS 环流中, 且紧挨 TDS, 对应的雷达扫描时间为 02 时 54 分 42

311 秒—02 时 55 分 02 秒，这是事发楼栋最有可能受到龙卷风影响的时段，与视频记录的漏斗
312 云影响时间一致。

313 在 02 时 50 分体扫中，书挡涡旋中心附近速度差超过 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强切变径向跨度较大，
314 在上述 TVS 的东侧还有另一 TDS，距离事发楼栋 0.3 km ，且存在直径 0.9 km 、速度差达 28
315 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度对，表明书挡涡旋内其他微尺度涡旋亦可能引发了强风灾损。02 时 56 分，书挡
316 涡旋发展最为强烈，但小涡旋的结构已不再清晰，TVS 仅在 $1.5\text{--}3.4^\circ$ 仰角能识别到，且移
317 速明显变慢（图 6c）。TVS 在 1.5° 仰角上表现为一对离开雷达异常大和离开雷达较小的径
318 向速度对，径向速度差超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该 TVS 东南侧有长和宽均 0.7 km 的显著的 TDS，西
319 侧也有 0.5 km 宽的 TDS。 2.4° 仰角的 TVS 速度对和强度与 1.5° 近似，附近有 TDS，随着仰
320 角抬高 TVS 强度有所减弱，仍伴有 TDS。随着仰角继续抬高，虽然仍可见 TDS 特征但已无
321 TVS，表明 TVS 衰亡。



322 图 7 02 时 44 分—56 分 TVS 和 TDS 时序图。

323 Fig. 7 The time serial of TVS and TDS from 02:44 to 02:56 BT.

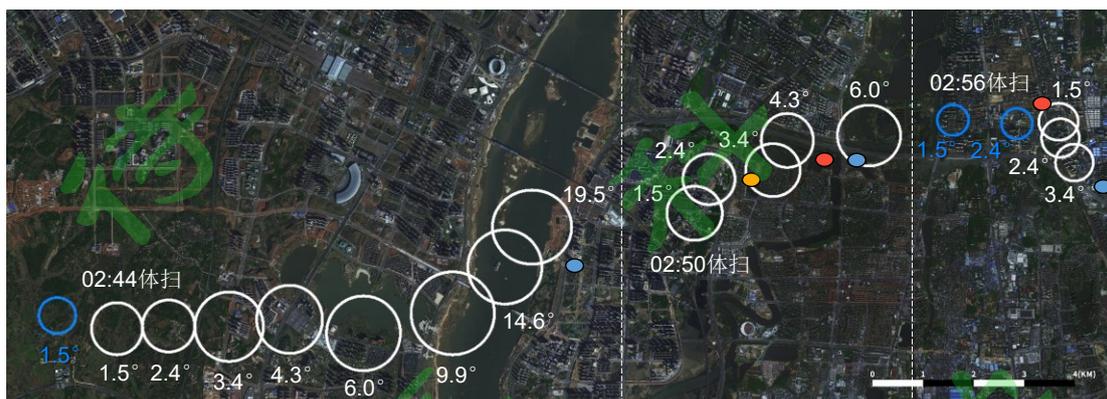
325 由图 7，TVS 的旋转速度从 02 时 44 分到 50 分明显增强，一直维持到 02 时 56 分体扫
326 的初始时段，随后迅速减弱消失，对应的 TDS 则在 TVS 减弱后多维持了两个仰角扫描时间。
327 一般而言，雷达图上低层（ 3 km 以下）涡旋（包括中气旋和 TVS）的旋转速度越强，龙卷
328 出现概率越高，且当涡旋距离地面高度小于 1 km 时，龙卷出现的概率约为 40% ，故而业务
329 上常基于低层涡旋强度来发布龙卷预警（Davies-Jones et al., 2001; 俞小鼎 等, 2012）。如图
330 7 所示，02 时 44 分—56 分探测到的 TVS 高度均在 2 km 以下，尤其是后两个体扫的 TVS
331 高度低于 1 km 而径向速度差超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，表明发生龙卷的概率较高，加上 TDS 特征，基
332 本可以确定出现了龙卷。

333 3.3. 灾情调查

334 不同仰角的回波图表示不同高度和不同扫描时间的探测，将上述三个体扫各仰角识别到
335 的有 TDS 对应的 TVS 绘在同一张图上作为疑似龙卷路径，供后续灾调定位（图 8）。02 时
336 44 分不同仰角的 TVS 向东速动较快，之后的体扫移动越来越慢。需要说明的是，图中白色
337 圆圈为有 TDS 对应的 TVS，蓝色圆圈处有明显 TDS 但无 TVS 与之对应。图中最左侧蓝圈

338 为02时44分1.5°仰角TVS西侧的TDS是由于反射率因子和径向速度扫描时间不同造成的，
339 象湖湿地公园东侧的两个蓝圈为02时56分1.5°和2.4°仰角的TDS，这两处虽然未能识别到
340 TVS，但位于书挡涡旋入流缺口顶端，存在涡旋的可能性较大，予以保留。

341 将疑似龙卷路径叠加至标记灾损的地图表明，该路径上多处发生人员伤亡和灾损。图8
342 红点处表示出现人员死亡；橘黄色黄点处有网络视频记录大砖块飞入室内造成人员严重砸伤
343 (<https://v.douyin.com/ifQvUUUA/> [2025-02-10])；蓝点处为灾情报道的板房、工棚、安置
344 房坍塌以及岗亭被吹飞造成人员受伤。其中，伟梦清水湾小区的事发楼栋（图8从左往右第
345 一个红点）位于南昌雷达02时50分体扫的4.3°和6.0°仰角TDS之间。



346
347 图8 疑似龙卷路径及有记录人员伤亡的严重灾情（白圈处为有TDS对应的TVS，蓝圈处有明显TDS但无
348 TVS；红椭圆处表示出现人员死亡；黄椭圆处有房屋破损和人员受伤；蓝椭圆处为临时建筑破损造成的人
349 员受伤，底图为吉林一号卫星地图）。

350 Fig. 8 The suspected tornado path and reported serious damages based on the Jilin-1 satellite map (The white circle
351 indicates the TVS with TDS nearby and the blue circle indicate obvious TDS without TVS around. The red, yellow
352 and blue ellipse indicate victims, injury related with building and temporary building respectively).

353 基于现场走访和大面积的草、油菜花、树或树枝等示踪物的倒伏或折损方向复现了灾情
354 发生时的极大风风向（图9）。结果表明，象湖公园南部事发楼栋以东的区域整体为偏南风
355 或西南风，位于事发小区西侧约4 km的生米大桥上路灯倒伏方向以偏西风影响为主，这与
356 地面自动站记录的03时左右南昌雷达站附近极大风（图1）一致。值得注意的是，地面记
357 录的极大风也出现了气旋式的旋转，由西风转西南风再到南偏东风，这与书挡涡旋的气旋式
358 环流吻合。

359 象湖西侧自北向南为北风、西北风，与象湖南岸的南风、西南风整体构成了气旋式风。
360 在图9的象湖西岸黄圈标识处，有细长型树干相向倒伏，具有辐合风的灾损特征，位于北风
361 转西风的气旋式风场内，为龙卷灾损的可能性较大。象湖东南沿岸游客中心石桥（图9白色
362 三角形处）附近相距50 m左右西北风、北风与南风的辐合。石桥附近的标识①处有整棵树
363 木朝东南倒下（见图10第二排最左），标识②处有树枝向南折断（图略），标识③处的湖
364 上石桥大理石围栏整体向北倒塌（见图10第二排最右）。以上两处象湖湿地公园的灾损均
365 具有龙卷特征。



366

367 图 9 灾情调查结果平面图（红色箭头表示根据示踪物的折损倒伏方向复现的灾情发生时的极大风风向，底
368 图为吉林一号卫星地图）。

369 Fig. 9 The disaster survey results based on the Jilin-1 satellite map (red arrows indicate the direction of extreme
370 wind at the time of the disaster according to the direction of the tracer's breakage and collapse).

371 事发楼栋附近的灾调显示，事发小区附近的灾损物倒伏方向发生了明显的变化。事发楼
372 栋（图 9 白色“X”字标识处）北侧的湿地公园南岸有一活动板房被强风掀翻并自东向西推
373 移数十米（见图 10 第二排中间），表明距离事发楼栋北侧不足 100 m 处为东风，西偏北侧
374 188 m 为北风（目击者反映有北边挡板向南飞出砸坏门店玻璃），而大量网络视频记录的
375 事发楼栋最先遭受的很可能是南风灾损（风从朝南的阳台向内吹，吹倒的玻璃门和其他物品散
376 落在客厅），三者构成了一个水平尺度约 300 m 的气旋式环流。事发楼栋以西约 300 m 的
377 小区入口附近亦出现了明显的气旋式环流的龙卷灾损特征。图 9 标识的④—⑥处根据目击者
378 描述和灾调还原的现场灾情为：④处轮胎店老板称有大树自东向西倒下，⑤处早餐店老板称
379 有一棵大树自西向东倒下砸毁招牌，⑥处有一钢制宣传栏向南倒伏。其中，第④和⑤处标识
380 南北相距 55 m、东西相距仅 3 m，形成明显的东西风辐合，与⑥处的偏北风构成气旋式风，
381 为典型的龙卷风灾损。

382 综合灾情调查和偏振雷达图像，可以明确事发楼栋及象湖湿地公园先后受到了龙卷风影
383 响。根据偏振雷达，龙卷风极有可能在 02 时 54 分至 02 时 55 分经过事发楼栋。图 10 例举
384 了事发楼栋附近和象湖湿地公园的几处典型灾损。由图可见，公园内大量树木被扭转或剥皮，
385 湖上两处水泥石桥护栏被整体吹倒，表明当时风力非常强，根据图 10 中石桥钢筋护栏坍塌
386 的灾损程度可判断龙卷风力相当于 EF2 级（郑永光 等, 2016b）。



387

388

图 10 事发楼栋附近及象湖湿地公园的典型灾损。

389

Fig. 10 The typical details of extreme wind damage around the accident building and Xianghu Wetland Park according to the damage survey.

390

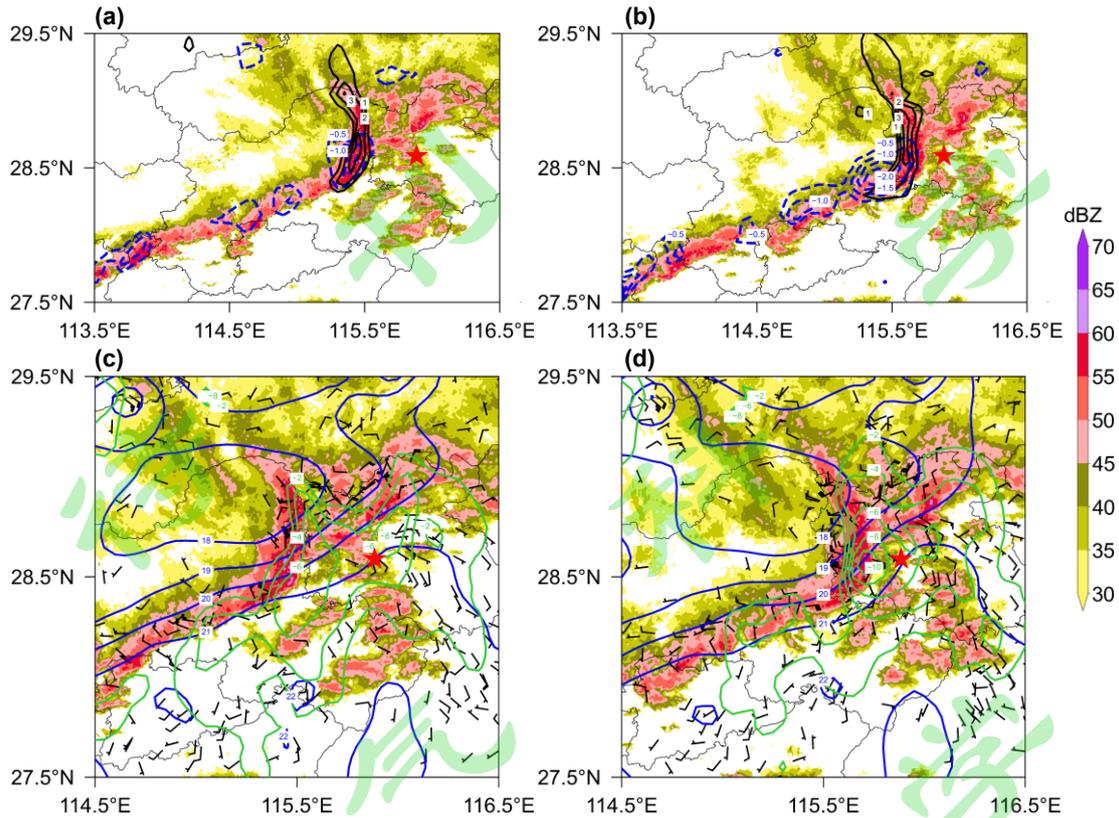
391 4 龙卷相关涡旋形成机制分析

392

一般而言，书挡涡旋由斜压性水平涡度扭转形成，而斜压性水平涡度源于风暴冷池与移动前方的暖湿空气之间的温度梯度。在书挡涡旋生成前，爬线前沿已移入南昌，地面加密观测显示爬线产生了冷池，对应雷暴高压明显且存在负变温（图 11a 和 b），而其前方存在暖低压伴明显辐合，雷暴高压与暖低压在弓形回波处形成明显的等温线密集带（图 11c 和 d）。02 时 30 分，10 分钟降温 1 °C，气压增加 3 hPa；02 时 40 时，弓形回波曲率增大，冷池变温增强，10 分钟降温达 2 °C，气压增加 3 hPa，阵风锋前后的温度梯度增强至 0.2 °C·km⁻¹。02 时 40 分至 03 时，10 分钟变温进一步增至 3 °C，同时阵风锋前沿辐合抬升显著增强（散度达 10⁻⁴ s⁻¹），辐合中心恰好紧邻书挡涡旋形成处。上述分析表明增强的辐合抬升与温度梯度相关的斜压性水平涡度，通过扭转产生了书挡涡旋的垂直涡度。

399

400



401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

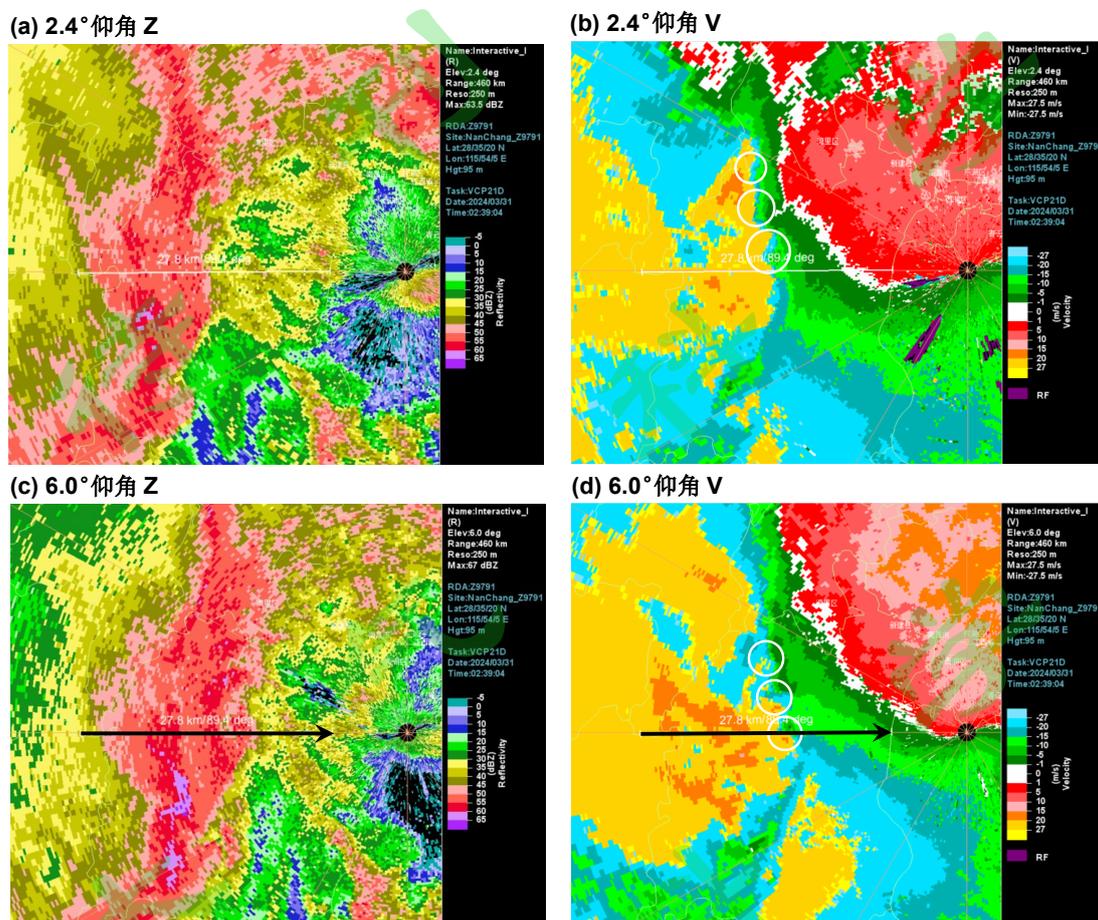
423

图 11 2024 年 3 月 31 日 02 时 30 分 (a, c) 和 02 时 40 分 (b, d) 的地面观测叠加 02 时 36 分 (a, c) 和 02 时 42 分 (b, d) 超过 30 dBZ 的组合反射率 (阴影, 单位: dBZ)。(a, b) 为地面 10 分钟变压 (黑色实线, 单位: hPa) 与变温 (蓝色虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) ; (c, d) 为等温线 (蓝色实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、散度 (绿色实线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和 2 分钟平均风 (黑色风杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

Fig 11 The surface observation at 02:30 (a, c) and 02:40 (b, d) BT on March 31, 2024, overlaid with composite reflectivity above 30 dBZ (shaded, unit: dBZ) at 02:36 (a, c) and 02:42 BT (b, d), respectively. (a, b) 10-minute change in surface pressure (black solid lines, unit: hPa) and temperature (blue dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$). (c, d) Temperature (blue solid lines, unit: $^{\circ}\text{C}$), divergence (green solid lines, unit: 10^{-5} s^{-1}), and 2-minute mean wind vectors (black wind barbs, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

在书挡涡旋生成前, 阵风锋前沿的垂直涡度已存在。02 时 39 分风暴前沿距地约 0.7 km 高度处开始出现多处小范围的水平风切变, 表现为阵风锋出流前沿朝向雷达的模糊大值中心与未模糊的小值中心由南向北交替出现的结构 (如图 12b 白圈所示), 退模糊后计算得到白圈处径向速度差约 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由雷达径向速度反演风场计算的阵风锋前沿垂直涡度大值区呈带状 (南北长约 10 km), 涡度约 $2\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。6.0 $^{\circ}$ 仰角可见清晰的至少三个小涡旋 (如图 12d 白圈所示), 距地高度约 2.2 km, 水平尺度 2~3 km。其中, 南侧两个小涡旋径向速度差约 $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由雷达反演风场计算的阵风锋前沿较大范围 (约 20 km) 的垂直涡度约 $2.5\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。与小涡旋对应位置的回波明显东倾且反射率因子强度较强, 隐约可见与涡旋对应的气旋式曲率 (图 12c), 表明此处对应旋转上升气流。由雷达反演风场可见, 阵风锋前沿即将弓形凸起的回波北侧区域整体位于垂直涡度大值带, 径向速度图上对应较强水平风切变 (图 4), 而小涡旋是这一强水平风切区内垂直涡度最强的部分。上述分析表明, 阵风锋前沿与书挡涡旋相关的垂直涡旋在小涡旋形成时 (02 时 39 分) 已经出现, 即二者几乎同时出现。较强的小涡旋在 02 时 44 分书挡涡旋形成后增强, 在低层达到 TVS 标准且有 TDS 对应。

424 书挡涡旋的形成小涡旋提供了更大范围的强垂直涡度环境。阵风锋前沿的小涡旋在 02 时
 425 44 分至 02 时 50 分互相靠近加强，之后可能发生了合并，也有利于书挡涡旋持续增强并于
 426 02 时 56 分变得结构最为清晰。



427
 428 图 12 2024 年 3 月 31 日 02 时 39 分南昌雷达站的 2.4°和 6.0°仰角的基本反射率因子（单位：dBZ）和径向
 429 速度（单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）（白圈表示小涡旋；黑色箭头表示图 13 剖面位置）。

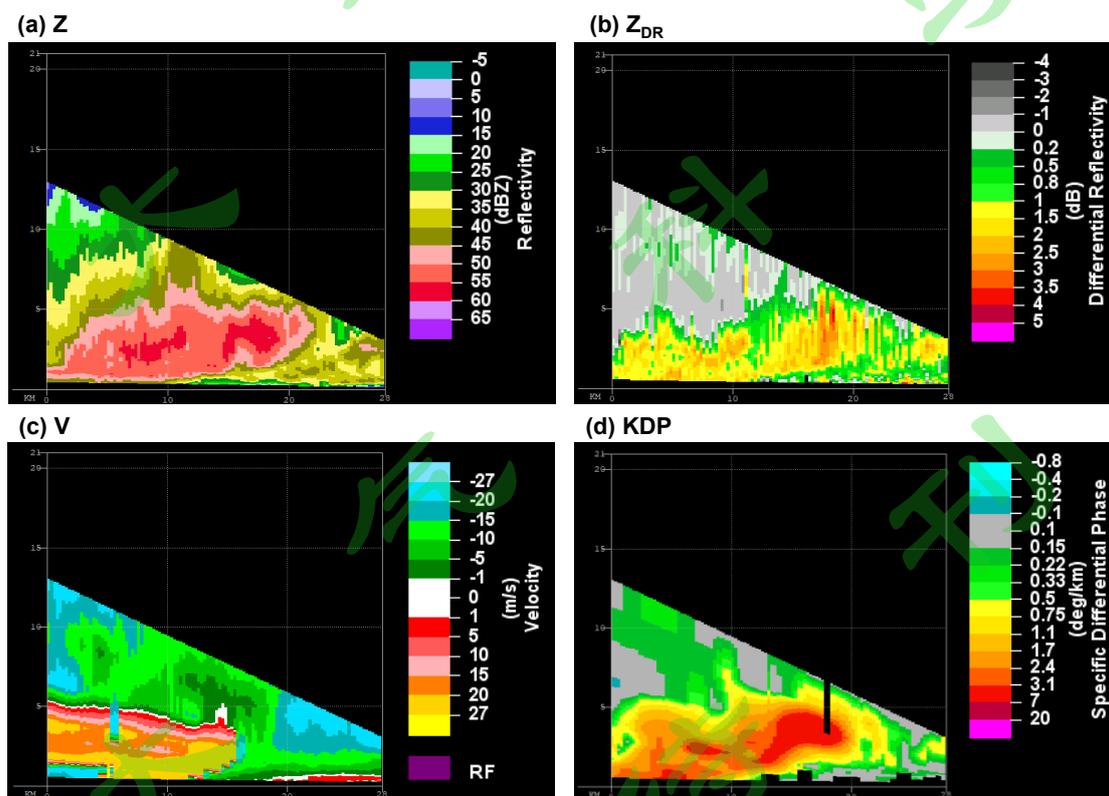
430 Fig. 12 The basic reflectivity (unit: dBZ) and radial velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 2.4° and 6.0° elevation in Nanchang
 431 radar station at 02:39 BT on March 31, 2024. The white circles depict misocyclones. The black arrow indicates the
 432 position of the profile in Fig. 13.

433 除了斜压性水平涡度的扭转，本次过程中风暴未及地的 RIJ 前沿下方还存在强垂直切
 434 变，其对应的水平涡度亦可被扭转为垂直涡度，从而形成上述垂直涡度大值带。由雷达径向
 435 速度剖面图，02 时 39 分阵风锋前沿的大风核位于约 2 km 高度，退模糊后风速达 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，
 436 为尚未及地的 RIJ，其下方近地层为朝向雷达的较弱的径向风，从而使 0~2 km 的风矢量差
 437 达 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，对应水平涡度值达 $15 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，方向向北（图 13c）。强垂直风切处对应着弱
 438 回波区，其前方（东侧）为数值较大且伸展高度较高的 Z_{DR} 柱（图 13b），即强垂直切变处
 439 位于上升气流区。因此，与低层风垂直切变相关的水平涡度可被上升气流扭转形成强垂直涡
 440 度，这很可能是阵风锋前沿小涡旋形成的主要物理过程。这与以往研究给出的 RIJ 下方的强
 441 垂直切变被下沉气流扭转形成阵风锋后的 γ 中尺度涡旋不同（Trapp and Weisman, 2003;
 442 Wakimoto et al., 2006）。类似的 RIJ 前沿底部强风垂直切变与上升气流区配置的结构在 02
 443 时 21 分亦曾出现。此外，在 Z_{DR} 柱对应的最强上升气流处，4 km 高度以下的近风暴环境风

444 垂直切变亦达每公里 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，对应水平涡度（约 $5\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ），由于此处上升气流更强，亦
445 可通过扭转形成较强的垂直涡度。

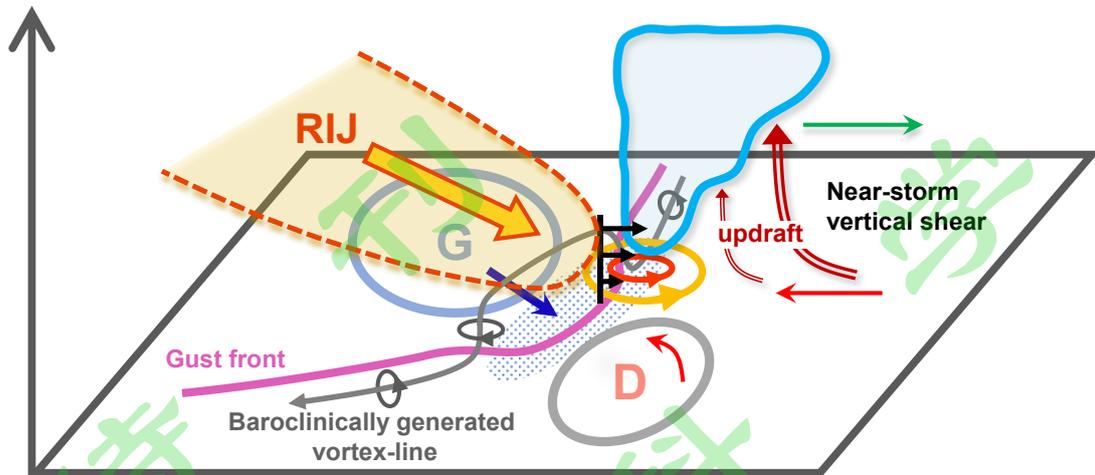
446 在书挡涡旋形成前的更早时刻（02 时 27 分和 02 时 33 分）弓形回波凸起的前方存在较
447 大尺度的弱水平风切变（径向速度差约 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），且有明显的辐合（图略），水平切变形成
448 的垂直涡度在辐合抬升气流的拉伸加强下也可能对书挡涡旋形成有所贡献。此外，在飚线
449 移动过程中，前方有对流单体并入，可增强上升气流从而对水平涡度的扭转和垂直涡度的拉
450 伸起增强作用，进而有利于书挡涡旋的形成和加强。

451 本次过程与以往研究不同之处为：1）以往书挡涡旋内的龙卷极少识别到阵风锋前沿的
452 小涡旋，或者说书挡涡旋与阵风锋前沿小涡旋通常位于不同时间段或不同部位，而孕育本次
453 龙卷的阵风锋前沿小涡旋镶嵌于书挡涡旋之中，即同时存在两种不同尺度的中尺度涡旋，具
454 有一定的特殊性；2）以往 RIJ 相关水平涡度的扭转发生在风暴后侧下沉气流中，而本文扭
455 转过程发生于风暴前沿且由上升气流扭转，即未及地的 RIJ 前沿下方低层强垂直切变被上升
456 气流扭转为垂直涡度。由于斜压性水平涡度分布不均匀，RIJ 前沿东伸程度亦不均匀，从而
457 使风暴前沿低层垂直切变强度差异较大，所以水平涡度的分布是不均匀的。与此同时，扭转
458 水平涡度的上升气流既有位于阵风锋前沿的大范围辐合抬升，亦有飚线前侧对流回波的并入
459 所伴随的局地风暴上升气流，所以上升气流也是不均匀的。在上述两方面因素影响下，被扭
460 转的垂直涡度分布不均匀，表现为风暴前较大范围垂直涡度大值区中镶嵌了若干小涡旋，小
461 涡旋亦是龙卷的“种子”。书挡涡旋形成后，增强的垂直涡度为和拉伸作用有助于小涡旋进
462 一步发展成龙卷。



463
464 图 13 2024 年 3 月 31 日 02 时 39 分南昌雷达站的 (a) 基本反射率因子（单位：dBZ）、(b) Z_{DR} 、(c)
465 径向速度（单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和 (d) KDP 剖面。

466 Fig. 13 The profile of basic reflectivity (a) (unit: dBZ), Z_{DR} (b), radial velocity (c) (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and KDP (d) in
467 Nanchang radar station at 02:39 BT on March 31, 2024.



468
469
470
471
472
473
474

图 14 与龙卷相关的书挡涡旋和小涡旋的形成概念模型。紫红色实线表示阵风锋前沿，中心标注 G 和 D 的蓝色和灰色圆圈分别为雷暴高压和前方中尺度低压，灰色实线为斜压性涡线。深蓝色和红色单线箭头表示地面环境风，蓝色点状阴影表示辐合区。蓝色轮廓表示前倾的风暴。黄色和红色带箭头的圆圈分别为与龙卷相关的书挡涡旋和小涡旋。橘黄色阴影表示未及地的后侧入流急流（rear-inflow jet，简称 RIJ），黑色箭头表示未及地 RIJ 下方的风垂直切变，深红色双线箭头表示风暴相关上升气流。风暴前的上层风（绿色箭头）与下层风（红色箭头）构成近风暴垂直切变。

475
476
477
478
479
480
481
482
483

Fig. 14 Schematic showing the genesis of the tornado-related bookend vortex and misocyclones. The magenta solid line denotes gust front. Blue and gray circles marked with G and D represent the thunderstorm high-pressure and the preceding mesoscale low-pressure, respectively. The gray solid line indicates the baroclinically generated vortex line. Dark blue and red arrows depict near-surface environmental winds, while the blue dotted shading represents the convergence zone. The blue outline marks the forward-tilting storm. Orange shading indicates the elevated rear-inflow jet (RIJ), with black arrows showing the vertical wind shear beneath the elevated RIJ. Dark red arrows represent storm-related updrafts. Upper-level wind (green arrow) and lower-level wind (red arrows) in front of the storm form the near-storm vertical shear. Yellow and red circulations represent the tornado-associated bookend vortex and embedded small-scale vortex, respectively.

484 5 结论与讨论

485 文章基于偏振雷达等观测资料及现场灾情调查对 2024 年 3 月 31 日凌晨造成江西南昌人员
486 坠亡的极端大风成因分析，结果表明：

487 事发时段有线性风暴过境，该线性风暴包含多个弓形回波，是波型线状回波。雷达径向
488 风场反演的结果显示线性风暴内的一个弓形回波北端出现了水平尺度 5~9 km、旋转速度远
489 超强中气旋强度的书挡涡旋。书挡涡旋内出现了 TVS，且有 TDS 与之对应，表明本次过程
490 极有可能出现了龙卷，强度约 EF2 级。

491 图 14 展示了基于雷达和地面观测分析得到的龙卷相关涡旋的形成机制。书挡涡旋和阵
492 风锋出流前沿的小涡旋均由水平涡度被上升气流扭转形成，水平涡度一部分源于冷池相关的
493 斜压性水平涡度（灰色箭头线），另一部分源于未及地的 RIJ（橘黄色阴影）前沿下方强垂
494 直切变（黑色箭头）。阵风锋前沿小涡旋之间的距离逐渐减小，其合并有助于书挡涡旋加强。
495 除了阵风锋前沿强辐合抬升（蓝色点状阴影区）外，弓形回波前方对流单体并入可加强上升

496 气流，从而也有利于水平涡度扭转和垂直涡度拉伸，进而增强书挡涡旋。此外，风暴前侧上
497 升气流（加粗红色双实线箭头）拉伸近风暴环境较强垂直切变的贡献亦不可忽略。

498 根据连续三个体扫各仰角的 TVS 和 TDS 位置给出了疑似龙卷路径，发现大部分人员伤
499 亡位于该路径附近。对事发楼栋周边进行的灾情调查表明，多处出现了龙卷风灾损特征，事
500 发楼栋以西约 300 m 处还有气旋式辐合风场的灾损，事发楼栋位于尺度 300 m 的气旋式破
501 坏性强风环流中，事发楼栋位于涡度值达 10^{-1} s^{-1} 的强 TVS 环流中，且有 TDS 与之对应，表
502 其受到了较强的龙卷风影响，高楼人员坠亡极有可能是由龙卷造成的。

503 本文重点讨论引发广泛关注的事发楼栋附近的强风成因，揭示龙卷风造成高楼人员坠亡
504 的可能性。龙卷经过时，事发楼栋一方面受到龙卷风 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上强风破坏，另一方面受到
505 和龙卷中心低气压之间形成的水平气压梯度力。根据上文雷达数据和灾调记录分析，龙卷风
506 极有可能从事发楼栋西南向东略偏北方向移动，因而事发楼栋最西侧单元朝西南的房间灾损
507 最严重。

508 在这次线性风暴影响过程中，书挡涡旋南侧偏西风与弓形回波的直线型出流大风叠加，
509 亦引发了极端偏西风，距地 100 m 高度探测到了 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的径向速度。此外，在 02 时
510 44 分之前，径向速度图上可识别多个小范围（数公里）的直线型强风，表明直线型大风内
511 镶嵌了下击暴流。03 时 02 分之后，在弓形回波继续向西移动的过程中，还产生了至少 2 个
512 TVS，不排除当日南昌其他地区出现龙卷风的可能性。上述分析表明，此次南昌大风过程局
513 地极端强风的形成机制复杂多样，且不排除下击暴流与龙卷共同作用的可能性，有待进一步
514 研究。

515 业务上主要基于中气旋和 TVS 来预警超级单体龙卷。线性风暴引发的龙卷预警难度较
516 大，EF2 级以上强龙卷大多位于 γ 中尺度涡旋内。线性风暴内的强 γ 中尺度涡旋即使不引发
517 龙卷风，亦有可能因为与直线大风同向叠加而引发局地极端强风，因此线性风暴上的 γ 中尺
518 度涡旋可作为预警极端强风的先兆信号。无论母体风暴是超级单体还是线性风暴，当 TVS
519 和 TDS 同时出现时，EF2 级以上强龙卷的出现概率都高，因此同时出现的 TVS 和 TDS 可
520 作为龙卷风业务预警发布指标；在 TDS 出现前，异常强的 γ 中尺度涡旋或强 TVS 亦可作为
521 龙卷预警指标。

522

523 参考文献 (References) :

- 524 Atkins NT, St. Laurent M, 2009. Bow Echo Mesovortices. Part II: Their Genesis [J]. Monthly
525 Weather Review, 137(5): 1514–1532.
- 526 Bai LQ, Meng ZY, Huang L, et al., 2017. An Integrated Damage, Visual, and Radar Analysis of
527 the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 Tornado in China Produced by the Landfalling
528 Typhoon Mujigae (2015) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(12):
529 2619–2640.
- 530 Bodine DJ, Kumjian MR, Palmer RD, et al., 2013. Tornado Damage Estimation Using
531 Polarimetric Radar [J]. Weather and Forecasting, 28(1): 139–158.
- 532 Brown RA, 1998. Nomogram for Aiding the Interpretation of Tornadic Vortex Signatures
533 Measured by Doppler Radar [J]. Weather and Forecasting, 13(2): 505–512.
- 534 Brown RA, Lemon LR, Burgess DW, 1978. Tornado Detection by Pulsed Doppler Radar [J].
535 Monthly Weather Review, 106(1): 29–38.
- 536 Brown RA, Wood VT, Sirmans D, 2002. Improved Tornado Detection Using Simulated and Actual
537 WSR-88D Data with Enhanced Resolution [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic
538 Technology, 19(11): 1759–1771.
- 539 Davies-Jones R, Trapp RJ, Bluestein HB, 2001. Tornadoes and Tornadic Storms [J].
540 Meteorological Monographs, 50: 167–222.
- 541 Davies-Jones RP, Burgess DW, Lemon LR, et al., 1978. Interpretation of Surface Marks and
542 Debris Patterns from the 24 May 1973 Union City, Oklahoma Tornado [J]. Monthly
543 Weather Review, 106(1): 12–21.
- 544 Doswell CA III , 2003. A Guide to F-Scale Damage Assessment [J].
545 <http://www.wdtb.noaa.gov/courses/ef-scale/lesson2/FinalNWSFscaleAssessmentGuide.pdf>
546 f.
- 547 Entremont C, 2015. Relationship Between Tornado Debris Signature (TDS) Height and Tornado
548 Intensity. [R]. Journal.
- 549 范雯杰, 俞小鼎, 2015. 中国龙卷的时空分布特征 [J]. 气象, 41(7): 793–805. Fan Wenjie, Yu
550 Xiaoding, 2015. Characteristics of Spatial-Temporal Distribution of Tornadoes in China
551 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(7): 793–805.
- 552 Fujita TT, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity [R].
553 Journal.
- 554 Fujita TT, 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD [R]. Journal.
- 555 Fujita TT, 1981. Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales [J].
556 Journal of Atmospheric Sciences, 38(8): 1511–1534.
- 557 Fujita TT, Bradbury DL, Thullenaar CFV, 1970. Palm Sunday Tornadoes of April 11, 1965 [J].
558 Monthly Weather Review, 98(1): 29–69.
- 559 Gao J, Xue M, Shapiro A, et al., 1999. A Variational Method for the Analysis of
560 Three-Dimensional Wind Fields from Two Doppler Radars [J]. Monthly Weather Review,
561 127(9): 2128–2142.
- 562 Jackson R, Collis S, Lang T, et al., 2020. PyDDA: A Pythonic Direct Data Assimilation
563 Framework for Wind Retrievals [J]. Journal of Open Research Software, 8(1).

- 564 Kumjian MR, Ryzhkov AV, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. *Journal*
565 *of Applied Meteorology and Climatology*, 47(7): 1940–1961.
- 566 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等., 1998. 一次飏线过程中龙卷及飏锋生成的中尺度分析 [J]. *大气*
567 *科学*, 22(3): 326–335. Liu Yong, Liu Zichen, Ma Yanbiao, et al., 1998. A Meso-Scale
568 *Analysis of Tornado and Squall Front Forming in a Squall Line Process* [J]. *Chinese*
569 *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 22(3): 326–335.
- 570 黎立页, 孟智勇, 白兰强, 等., 2023. 2017-08-11 内蒙赤峰 EF4 级山地多发龙卷灾调与成因分
571 析 [J]. *热带气象学报*, 39(4): 507–521. Li Liye, Meng Zhiyong, Bai Lanqiang, et al.,
572 2023. *Damage survey and analysis of a multiple tornado event over complex terrain in*
573 *ChiFeng, Inner Mongolia on 11 August 2017* [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in
574 *Chinese*), 39(4): 507–521.
- 575 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等., 2017. 2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析 [J]. *气象学*
576 *报*, 75(2): 288–313. Li Zhaohui, Wang Donghai, Mai Xuehu, et al., 2017. *Observations of*
577 *the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015* [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in
578 *Chinese*), 75(2): 288–313.
- 579 Lee BD, Wilhelmson RB, 1997. The Numerical Simulation of Nonsupercell Tornadogenesis. Part
580 II: Evolution of a Family of Tornadoes along a Weak Outflow Boundary [J]. *Journal of*
581 *the Atmospheric Sciences*, 54(19): 2387–2415.
- 582 Markowski P, Richardson Y. 2010. *Mesoscale meteorology in midlatitudes* [M]. Chichester, West
583 *Sussex, UK: Wiley-Blackwell.*
- 584 Meng Z, Yao D, 2014. Damage Survey, Radar, and Environment Analyses on the First-Ever
585 Documented Tornado in Beijing during the Heavy Rainfall Event of 21 July 2012 [J].
586 *Weather and Forecasting*, 29(3): 702–724.
- 587 Meng Z, Yao D, Bai L, et al., 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based
588 on field damage surveys and radar observations [J]. *Sci Bull (Beijing)*, 61: 330–337.
- 589 Moller AR. 2001. *Severe Local Storms Forecasting* [M]. Florence, Ala., USA: Weather Scratch
590 *Meteorological Services.*
- 591 Nolen RH, 1959. A Radar Pattern Associated with Tornadoes [J]. *Bulletin of the American*
592 *Meteorological Society*, 40(6): 277–279.
- 593 Pfost RL, Gerard AE, 1997. “Bookend Vortex” Induced Tornadoes along the Natchez Trace [J].
594 *Weather and Forecasting*, 12(3): 572–580.
- 595 Potvin CK, Shapiro A, Xue M, 2011. Improving dual-Doppler retrieval of the vertical wind using
596 a vertical vorticity constraint [J].
- 597 Ryzhkov AV, Schuur TJ, Burgess DW, et al., 2005. Polarimetric Tornado Detection [J]. *Journal of*
598 *Applied Meteorology*, 44(5): 557–570.
- 599 Thompson RL, Smith BT, Grams JS, et al., 2012. Convective Modes for Significant Severe
600 *Thunderstorms in the Contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS Tornado*
601 *Environments* [J]. *Weather and Forecasting*, 27(5): 1136–1154.
- 602 Trapp RJ, Davies-Jones R, 1997. Tornadogenesis with and without a Dynamic Pipe Effect [J].
603 *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(1): 113–133.

604 Trapp RJ, Weisman ML, 2003. Low-Level Mesovortices within Squall Lines and Bow Echoes.
605 Part II: Their Genesis and Implications [J]. *Monthly Weather Review*, 131(11):
606 2804–2823.

607 Wakimoto RM, Murphey HV, Davis CA, et al., 2006. High Winds Generated by Bow Echoes. Part
608 II: The Relationship between the Mesovortices and Damaging Straight-Line Winds [J].
609 *Monthly Weather Review*, 134(10): 2813–2829.

610 Wakimoto RM, Wilson JW, 1989. Non-supercell Tornadoes [J]. *Monthly Weather Review*, 117(6):
611 1113–1140.

612 Wang X, Zheng Y, Fan L, et al., 2023. The Key Mesoscale Systems and Mesoscale Vortices of the
613 Henan Extreme Precipitation in 2021 [J]. *Sustainability*, 15(6).

614 Weisman ML, 1993. The Genesis of Severe, Long-Lived Bow Echoes [J]. *Journal of Atmospheric*
615 *Sciences*, 50(4): 645–670.

616 Weisman ML, Trapp RJ, 2003. Low-Level Mesovortices within Squall Lines and Bow Echoes.
617 Part I: Overview and Dependence on Environmental Shear [J]. *Monthly Weather Review*,
618 131(11): 2779–2803.

619 Wilson JW, Wakimoto RM, 2001. The Discovery of the Downburst: T. T. Fujita's Contribution [J].
620 *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(1): 49–62.

621 Xu X, Xue M, Wang Y, 2015. The Genesis of Mesovortices within a Real-Data Simulation of a
622 Bow Echo System [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(5): 1963–1986.

623 Xue M, Zhao K, Wang M, et al., 2016. Recent significant tornadoes in China [J]. *Advances in*
624 *Atmospheric Sciences*, 33(11): 1209–1217.

625 徐敬涵, 冉令坤, 炎利军, 等., 2024. 台风“山竹”外围强龙卷的结构和机理分析 [J]. *大气*
626 *科学*, 48(3): 843–858. Xu Jinghan, Ran Lingkun, Yan Lijun, et al., 2024. Analysis of the
627 Structure and Mechanism of the Tornado at the Periphery of Typhoon Mangkhut [J].
628 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48(3): 843–858.

629 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等., 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版
630 社. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al., 2006. *Doppler Weather Radar*
631 *Principles and Operational Applications (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological
632 Press.

633 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展 [J]. *气象学报*, 78(3): 391–418.
634 Yu Xiaoding, Zheng Yongguang, 2020. Advances in severe convective weather research
635 and operational service in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78(3):
636 391–418.

637 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等., 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究 [J]. *大*
638 *气科学*, 32(3): 508–522. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al., 2008.
639 Observational Investigation of a Tornadic Heavy Precipitation Supercell Storm [J].
640 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(3): 508–522.

641 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展 [J]. *气象学报*(3):
642 311–337. Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming, 2012. The advances in the
643 nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. *Acta Meteorologica*
644 *Sinica (in Chinese)*, (3): 311–337.

- 645 Yao D, Xue H, Yin J, et al., 2018. Investigation into the Formation, Structure, and Evolution of an
646 EF4 Tornado in East China Using a High-Resolution Numerical Simulation [J]. Journal of
647 Meteorological Research, 32(2): 157–171.
- 648 张涛, 关良, 郑永光, 等., 2020. 2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙
649 卷演变过程 [J]. 气象, 46(5): 603–617. Zhang Tao, Guan Liang, Zheng Yongguang, et
650 al., 2020. Damage Survey of the 3 July 2019 Kaiyuan Tornado in Liaoning Province and
651 Its Evolution Revealed by Disaster [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(5):
652 603–617.
- 653 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等., 2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析 [J]. 气象,
654 42(11): 1304–1314. Zhang Xiaoling, Yang Bo, Zhu Wenjian, et al., 2016. Analysis of the
655 EF4 Tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016 [J]. Meteorological
656 Monthly (in Chinese), 42(11): 1304–1314.
- 657 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等., 2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多
658 尺度特征分析 [J]. 气象, 42(1): 1–13. Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Meng Zhiyong,
659 et al., 2016a. Survey and Multi Scale Characteristics of Wind Damage Caused by
660 Convective Storms in the Surrounding Area of the Capsizing Accident of Cruise Ship
661 “Dongfangzhixing” [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(1): 1–13.
- 662 郑永光, 田付友, 周康辉, 等., 2018. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查 [J]. 气象
663 科技进展, 8(2): 55–61. Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Zhou kanghui, et al., 2018.
664 Forecasting Techniques and Damage Survey of Convectively Driven High Winds and
665 Tornadoes [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(2):
666 55–61.
- 667 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 等., 2016b. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计 [J].
668 气象, 42(11): 1289–1303. Zheng Yongguang, Zhu Wenjian, Yao Dan, et al., 2016b. Wind
669 Speed Scales and Rating of the Intensity of the 23 June 2016 Tornado in Funing County,
670 Jiangsu Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(11): 1289–1303.
- 671 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等., 2016. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析 [J].
672 暴雨灾害, 35(5): 403–414. Zhu Wenjian, Sheng Jie, Zheng Yongguang, et al., 2016.
673 Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of typhoon
674 "Mujigae" on 4 October 2015 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 35(5):
675 403–414.
- 676