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

连续2次Derecho事件中江西宜春极端大风天气特征及成因分析

李海俊 吴静 金米娜 李茜 尹小飞

Characteristics and Formation Mechanisms of Extreme Winds in Yichun, Jiangxi Associated with Two Successive Derecho Events

LI Haijun，WU Jing，JIN Mina，LI Qian，YIN Xiaofei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-188

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

雷暴大风极端风速估算方法在2025年贵州“5·04”下击暴流过程中的适用性分析

Applicability of method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales during the downburst event in Guizhou on May 4, 2025

暴雨灾害. 2025, 44(5): 565-575 https://doi.org/10.12406/byzh.2025-111

2017年夏季天津一次下击暴流事件的成因初探

Preliminary study on the causes of a downburst event in Tianjin in the summer of 2017

暴雨灾害. 2022, 41(5): 556-563 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-112

宁波两次下击暴流的环境条件与多普勒雷达特征对比分析

A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo

暴雨灾害. 2025, 44(3): 340-351 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-157

两个超级单体导致的冀豫交界区极端下击暴流预警分析

Analysis of early warning of extreme downbursts induced by two supercell storms in the border area between Hebei and Henan Provinces

暴雨灾害. 2022, 41(3): 254-265 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.002

东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析

Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex

暴雨灾害. 2024, 43(6): 693-701 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-231

一次下击暴流过程形成机制的模拟分析

Simulation and analysis of the mechanism of a downburst process

暴雨灾害. 2022, 41(1): 42-49 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李海俊,吴静,金米娜,等.2026.连续 2 次 Derecho 事件中江西宜春极端大风天气特征及成因分析[J].暴雨灾害,45(5):666−679. LI Haijun, WU Jing, JIN Mina, et al. 2026. Characteristics and Formation Mechanisms of Extreme Winds in Yichun, Jiangxi Associated with Two Successive Derecho Events [J]. Torrential Rain and Disasters,45(5):666−679 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−188

连续 2 次 Derecho 事件中江西宜春极端大风天气特征及成因分析

李海俊[1, 2, 3], 吴静[1, 2, 3], 金米娜[1, 2, 3], 李茜[4], 尹小飞[1]

(1. 江西省气象台, 南昌 330096; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096;
3. 南昌国家气候观象台, 南昌 330046; 4. 江西省上高县气象局, 上高 336400)

摘　要: 2025 年 4 月 21 日, 湖南北部-江西北部-浙江一线出现 2 次间隔约 4 h 的大范围雷暴大风 (Derecho) 事件, 江西宜春出现 4 站风速突破历史记录的极端大风 (12 级) 天气, 灾损严重。为提高对 Derecho 事件及极端大风形成机制的认识, 利用高空和地面气象观测、双偏振雷达、ERA5 再分析资料, 对 2 次 Derecho 事件中江西宜春的极端大风天气特征和成因进行对比分析。结果表明: (1) 江西宜春的极端大风天气是由 2 次 Derecho 事件造成。低层暖平流和中层干区、0—8 km 垂直风切变达 30.7 m·s^{-1}、夹卷层平均风速 19.2 m·s^{-1} 是 Derecho 事件出现的有利环境条件。(2) 21 日 15:30—15:50 (北京时, 下同), 宜春第 1 次 12 级大风由超级单体与小单体合并加强后, 多个连续下击暴流和 1 h 降温达 10 ℃ 的冷池密度流共同作用造成。(3) 21 日 19:00—19:30, 宜春第 2 次 12 级大风由下击暴流和风暴尺度动量下传造成, 动量下传表现为一支时间连续的 27 m·s^{-1} 大风速核从 4—7 km 高度迅速向下传播接地。本研究结果对江西春季极端大风临近预报具有一定指示意义: 某一站点风暴系统下击暴流、动量下传、强冷池等特征同时出现或持续影响时, 需关注局地大风快速增强; 多单体风暴在强夹卷层风速环境条件下, 经显著动量下传也能出现极端大风。

关键词: Derecho 事件; 雷暴大风; 动量下传; 雷暴合并; 下击暴流
中图法分类号: P458.1^{+}23　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−188

Characteristics and Formation Mechanisms of Extreme Winds in Yichun, Jiangxi Associated with Two Successive Derecho Events

LI Haijun[1, 2, 3], WU Jing[1, 2, 3], JIN Mina[1, 2, 3], LI Qian[4], YIN Xiaofei[1]

(1. *Jiangxi Meteorological Observatory*, *Nanchang* 330096; 2. *Jiangxi Province Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention*, *Nanchang* 330096; 3. *Nanchang national climate observatory*, *Nanchang* 330046;
4. *Shanggao County Meteorological Bureau of Jiangxi Province*, *Shanggao* 336400)

Abstract: On April 21, 2025, two widespread thunderstorm wind (Derecho) events with an interval of approximately 4 hours occurred sequentially along a corridor extending from northern Hunan through northern Jiangxi to Zhejiang. Both derechos intensified notably over Yichun, Jiangxi, where record-breaking Grade 12 gales were observed at four stations, resulting in severe damage. To improve understanding of the formation mechanisms of Derecho events and extreme gales, this study compares the characteristics, causes and intensification mechanisms of extreme winds in Yichun using upper-air and surface observations, dual-polarization radar data and ERA5 reanalysis data. The results are as follows. (1) The extreme winds in Yichun were produced by two Derecho events. Favorable environmental conditions for Derecho events occurrence include low-level warm advection, mid-level dry layers, deep 0–8 km vertical wind shear of 30.7 m·s^{-1}, and a mean entrainment-layer wind speed of 19.2 m·s^{-1}. (2) From 15:30 to 15:50 BT, the first Grade 12 gale in Yichun was jointly induced by multiple successive downbursts and density currents associated with cold pools. The cold pools produced a 1-hour temperature decrease of 10 °C following the merger and intensification of supercells and small convective cells. (3) The second

收稿日期: 2025−09−23; **定稿日期**: 2026−04−23
资助项目: 江西省气象局创新团队项目 (JXCX202304); 江西省气象局重点项目 (JX2021Z01, JX2021Z09); 江西省气象局人才培养面上专项 (JX2024RCM03)
第一作者: 李海俊, 主要从事强对流天气预报技术研究。E-mail: lihaijun862097@outlook.com
通信作者: 吴静, 主要从事短临预报技术研究。E-mail: wwujing@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Grade 12 gale in Yichun during 19:00–19:30 BT was generated by combined effects of downbursts and storm-scale momentum downward transport. Such momentum transport was characterized by a temporally continuous high-wind core of 27 $m \cdot s^{-1}$ that rapidly descended from an altitude of 4–7 km to the ground. The findings provide some indicative implications for the nowcasting of extreme winds over Jiangxi in spring. When downbursts, momentum transport and strong cold pools occur simultaneously or persistently affect a station, rapid intensification of local winds should be alerted. Extreme winds can also develop in multi-cell storms via prominent downward momentum transport under environments with large entrainment-layer wind speeds.

Key words: Derecho events; Thunderstorm gale; momentum downward transport; thunderstorm merging; Downburst

引　言

Derecho 事件首次由 Johns 和 Hirt (1987) 提出, 他们将其归类作为一种大范围下击暴流造成的直线型大风事件进行研究。Derecho 事件本质上就是下击暴流群或下击暴流簇 (Fujita et al., 1981), 但其对影响范围长轴尺度、对流阵风极大值、时间空间连续性等有更严格要求。目前已有多种 Derecho 事件标准, 国际上常见的有美国提出的 JH87 标准 (Johns and Hirt, 1987)、Coniglio2004 标准 (Coniglio et al., 2004) 等。陈晓欣等 (2022) 结合中国季风气候特点和观测站网实际建设情况, 一方面将风速由 26 $m \cdot s^{-1}$ 降至 25 $m \cdot s^{-1}$, 且不考察风速大于 33 $m \cdot s^{-1}$ 的观测记录, 另一方面使用中国常规业务气象观测站表达大风事件数量和间隔, 提出了更适合中国的 Derecho 事件标准 (chen22 标准)。美国一年大约有 15 个 Derecho 事件 (Bentley and Mote, 1998), 而中国每年平均仅约有 2 个 (陈晓欣等, 2022)。虽然发生频率低于美国, 但中国的 Derecho 事件仍是范围巨大的高破坏性大风天气, 可造成巨大的财产损失和人员伤亡 (Xia et al., 2012; 崔新艳等, 2025)。

Derecho 事件相较一般雷暴大风有更深厚的垂直风切变和高空急流以及更显著的中高层干区和低层湿区 (Coniglio et al., 2004; 费海燕等, 2016; 马淑萍等, 2019)。依据环境条件不同, Derecho 事件可划分为强强迫型、弱强迫型和混合型: 强强迫型对应有较大的低层风、较大的低层垂直风切变和较小的不稳定性, 常在一个细长地带产生 2~3 个 Derecho 事件, 即 Derecho 事件序列; 弱强迫型对应有较小的低层风、较小的低层垂直风切变和较大的不稳定性, 常在一个细长地带仅产生单个 Derecho 事件 (崔新艳等, 2025)。中国产生的 Derecho 事件, 0—6 km 风切变数值高于美国, 对流有效位能显著低于美国 (Xia et al., 2012; 陈晓欣等, 2022)。这主要因为美国 Derecho 事件发生峰值在 7 月, 而中国在 6 月, 越靠近夏季, 大气正压性越强, 平均对流有效位能越高。我国 Derecho 事件以动力强迫为主的频次比美国更多 (陈晓欣等, 2022)。Derecho 事件在卫星云图上, 常表现为和大风相关的中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS), 并要求 MCS 产生的大风具有空间和时间连续性(陈晓欣等, 2022)。从雷达上来看, 准线状对流系统 (Quasi-Linear Convective System, QLCS) 相较于其他类型的 MCS, 更容易导致 Derecho 事件的发生 (Surowiecki and Taszarek, 2020)。

Derecho 事件产生大范围大风的物理机制主要有: 在夹卷层风速极强的环境背景下, 垂直风切变形成活跃的湍流混合过程, 通过风暴后侧入流急流 (RIJ) 高空动量向地面传输, 即动量下传 (郑永光等, 2025a, 2025b; 金米娜等, 2025); 风暴后侧卷入干空气, 水粒子相态变化, 气温下降, 负浮力导致或加速气流下沉 (Fujita et al., 1981; 孙继松, 2023; 周芳等, 2025); 下沉气流在地面形成冷池, 导致地面降温形成与环境间的温差、密度差、气压差, 出现密度流 (阵风锋) (Droegemeier and Wilhelmson, 1987); 超级单体风暴中气旋动力强迫 (Trapp and Weisman, 2003; Xia et al., 2012) 等。在一个 Derecho 事件中, 可能同时具备多种机制且相互影响; 也可能在不同阶段具有一种或几种不同主导机制, 不同机制的贡献程度往往难以明确分离。

Derecho 事件中的雷暴大风并非空间均匀的, 在某一些区域或某一些风暴发展时刻, 会显著加强, 甚至出现龙卷 (李淑璠等, 2025), 进而在一次 Derecho 事件的某些区域产生风速极大值。在 Derecho 事件中极大值出现区域大风灾害风险显然更高, 因此研究大风出现的成因和增强机制, 更具有实际意义。Derecho 事件中雷暴大风加强的常见因素有风暴冷池合并、下垫面和地形作用、水滴负载效应加强下沉气流等。王秀明等 (2012) 分析了 2009 年 6 月 3 日覆盖 5 省的 Derecho 事件 (达到 chen22 标准) 指出, 商丘附近极端大风由风暴强下沉气流、强冷池密度流等造成, 且冷池合并是重要增幅原因。陈云辉等 (2019) 分析了 2018 年 3 月 4 日江西 Derecho 事件 (达到 chen22 标准), 指出大范围过程大风极大值出现在鄱阳湖地区, 与鄱阳湖平坦地形和水体下垫面增幅作用有关。Luo 等 (2024) 使用 WRF 模式模拟

研究了 2021 年 4 月 30 日华东地区至东海的一次 Derecho 事件，发现冷池从海面向西扩散至陆地过程中，下沉气流的水滴负载效应与蒸发冷却作用，是促成这次过程地面阵风增强的重要因素。以上学者对我国发生的 Derecho 事件案例中极大值出现原因和地面大风增强机制进行了分析和归纳，但当前相关研究依然总体偏少。

2025 年 4 月 21 日，湖南北部-江西北部-浙江出现两次时间间隔约 4 h 的 Derecho 事件，且均在江西宜春出现 12 级大风 (以下简称“4·21”过程)。极端大风致使树木大量倒伏断枝，建筑和设施毁坏，对交通、电力、农业、林业造成较大影响。两次 Derecho 事件均在江西宜春风速显著增强，呈强极端性和强致灾性，因此江西宜春的大风增强机制值得分析和探讨。为此，本文基于高空、地面气象站观测、双偏振雷达、ERA5 再分析等资料，分析“4·21”过程的天气特征，并研究两次极端大风天气的成因差异，以期提高预报员对 Derecho 事件及大风增强机制的认识，提升大风的短临预警能力。

1 资料说明

本文使用的资料包括：(1) 地面和高空观测数据均来自国家气象信息中心“天擎”，选取范围均为江西省及周边省份的观测站。地面气象站观测数据包含国家气象观测站 (以下简称国家站) 和区域气象观测站 (以下简称区域站) 常规气象要素观测数据，用于强对流实况分析；高空观测数据包含探空站要素观测及温度对数压力 (T-ln$p$) 图，用于环境条件分析。(T-ln$p$) 图使用距离极端大风中心 (宜春上高站) 最近的长沙站和南昌站探空资料，两站分别位于上高站西 210 km 和东东北方向 105 km。(2) 双偏振雷达数据来自宜春 CINRAD/SAD 型号的 S 波段双偏振雷达，用于强对流的结构特征及大风成因分析。应用 ROSE2.1 软件将雷达基数据进行质控并生成各类子产品对强对流进行研究和分析。已有研究 (李海俊等, 2025) 表明 ROSE 软件的可靠性，可应用于强对流天气过程分析。(3) ERA5 逐小时再分析数据来自欧洲中心开放获取数据集，选取以江西为中心的 104°—128°E, 19°—36°N 经纬度范围，空间分辨率为 0.25°×0.25°，用于雷暴大风环境条件的分析。

以上数据的时间段均为 2025 年 4 月 21 日 08:00 (北京时，下同) 至 22 日 10:00。

灾损照片及照片位置信息，均来自江西省和上高县预报员在 4 月 21 日和 22 日的灾情现场调查。

2 天气实况和雷达图像特征

2.1 天气实况

2025 年 4 月 21 日湖南北部-江西北部-浙江一线出现了大范围雷暴大风天气。21 日，湖南、江西、浙江三省共 266 站 (含 7 个国家站) 突破极大风速历史记录，其中江西 75 站 (含 3 个国家站)，湖南 136 站 (含 4 个国家站)，浙江 57 站。其中 8 站 (含 2 个国家站) 极大风速在 32.7 m·s^{-1} (12 级) 以上，12 级以上大风区域位于江西宜春。Doswell (2001) 定义 32 m·s^{-1} 以上大风为极端强对流天气，可见此次过程的强极端性。

此次事件在一个细长地带产生两次时间间隔约 4 h 的大风天气。对照结合中国季风气候特点 Derecho 事件标准 (陈晓欣等, 2022) 的 6 个条件，即：(1) 必须存在一个超过 25 m·s^{-1} 的对流性阵风集中区域，区域长轴至少 400 km；(2) 风力报告显示事件发生不是随机的，必须按时间顺序演变；(3) 区域至少有 3 个阵风超过 25 m·s^{-1} 的国家站，且任意 2 个国家站之间的距离超过 64 km，站点出现大风的时刻与风暴过境的时刻大致对应；(4) 连续风力报告之间的时间间隔不超过 3 h；(5) 由地面气压场和风场所反映的相关 MCS 必须具有时间和空间连续性；(6) 造成多个大风站点记录的 MCS 在雷达图像或卫星云图上必须属于同一个对流系统。对照以上 6 个条件，第 1 次和第 2 次大风天气全部符合，因此，定性此次大范围雷暴大风天气为两次 Derecho 事件。第 1 次 Derecho 事件上高国家站 15:40 发生 32.8 m·s^{-1}、上高新界埠区域站 15:50 发生 35.1 m·s^{-1} 的极端大风，记为第 1 次 12 级大风。第 2 次 Derecho 事件万载国家站 19:10 极端大风 32.7 m·s^{-1}，上高翰堂区域站 19:30 发生 35.5 m·s^{-1} 的极端大风，记为第 2 次 12 级大风 (表 1)。

“4·21”极端大风天气过程致使江西宜春的上高县和万载县遭遇风灾 (图 1a、c)，据灾情现场调查 (图 1b 列出部分受灾点位置分布)，街道上大量种植多年根系深厚的老树被连根拔起 (图 1f、h、i)，在上高县城、万载县城、上高新界埠均记录到均一倒向的大树倒伏，无旋转风特征，倒伏树木最大直径约 60 cm；上高县城和多个乡镇当天由于电线杆倒伏 (图 1g)，部分区域断电；大量建筑设施毁坏，如建筑物倒下 (图 1e)、楼顶放置物坠落 (图 1d)。上高县城至新界埠镇的带状区域风灾最严重。

2.2 雷达回波连续性特征

为验证产生超过 25 m·s^{-1} 大风的两次 Derecho 事件分别由前后两个 MCS 造成，进一步给出 2025

表 1 “4·21”过程江西宜春 12 级大风站点信息

Table 1 Information on stations with 12-level gales in Yichun, Jiangxi during the 421 severe weather process

站名	气象站类型(海拔高度/m)	极大风			历史排名	此前风速极值/(m·s^{-1})	本次提升值/(m·s^{-1})
		极大风速/(m·s^{-1})	对应风向/°	出现时间/分:秒			
上高	国家站(93)	32.8	286	15:40	1	28.0	4.8
上高新界埠	区域站(88)	35.1	307	15:50	1	23.5	11.6
万载	国家站(125)	32.7	272	19:10	1	25.3	7.4
上高翰堂	区域站(66)	35.5	208	19:30	1	25.2	10.3

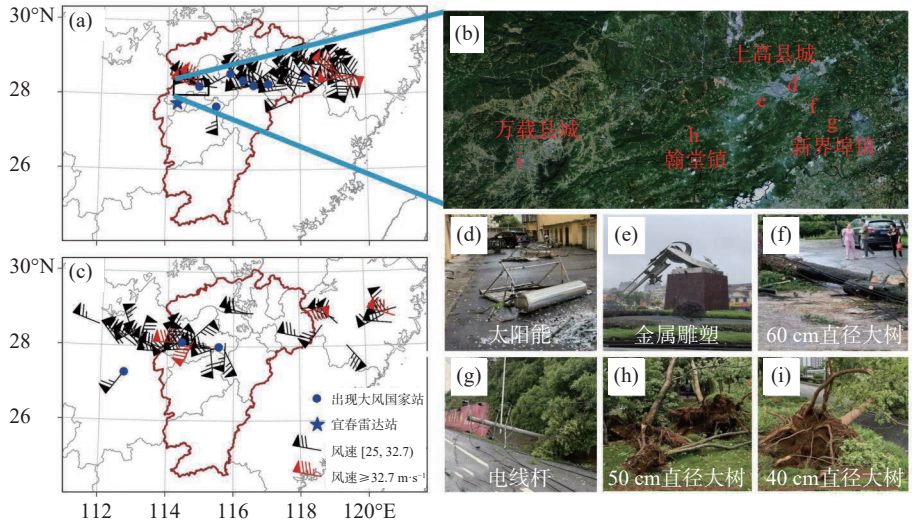


图 1 2025 年 4 月 21 日第 1 次 Derecho 事件 (a)、第 2 次 Derecho 事件 (c) 25 m·s^{-1} 以上大风及部分灾损位置 (b, 字母代表灾损情况的图号) 分布和灾损现场情况 (d—i) (棕色实线为江西省界, 下同)

Fig. 1 Spatial distributions of gales exceeding 25 m·s^{-1} during (a) the first Derecho event and (c) the second Derecho event, (b) some disaster loss location (The letter represent drawing mumber of disaster loss) and (d—i) on-site situation on April 21, 2025 (The brown lines denote the administrative boundaries of Jiangxi Province, the same hereinafter)

年 4 月 21 日 14:00—22 日 02:00 的组合反射率逐 4 h 拼图及 4 h 内的大风站点 (图 2) 分布。实际产生大风的 MCS 组织形式为准线状对流系统 (QLCS), 且第 1 次和第 2 次 Derecho 事件的大风记录可明显区分, 即第 1 次和第 2 次 Derecho 事件记录分别集中分布于图中黑色风羽和蓝色风羽两簇站点位置 (图 2a—c)。因此, 这是 2 次 Derecho事件。

3 环流背景和环境条件

3.1 环流背景

由图 3a、b 可见, 2025 年 4 月 21 日 08:00—20:00, 雷暴大风发生于快速自西向东移动的 500 hPa 槽底部, 始终受西偏南风影响。08:00 槽底前部 (贵州-湖南北部-江西西部) 有一个长约 900 km 的带状中层干

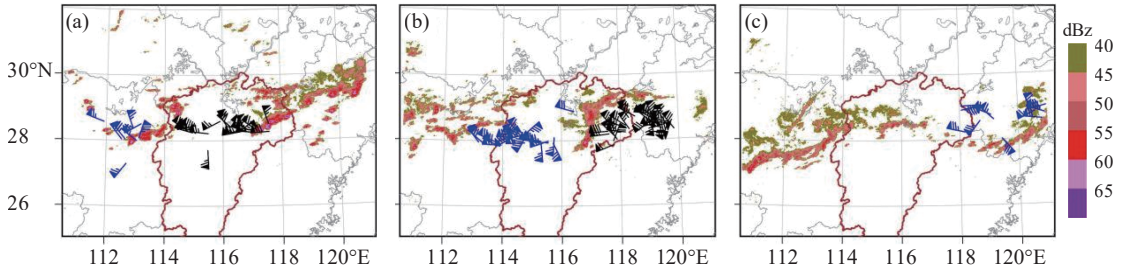


图 2 2025 年 4 月 21 日 18:00 (a)、22:00 (b)、22 日 02:00 (c) 组合反射率 (色斑) 拼图及地面风 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 分布 (黑和蓝色风羽为第 1 次和第 2 次 Derecho 事件在 4 h 内大于 25 m·s^{-1} 的地面风)

Fig. 2 Composite reflectivity (shaded) mosaics at (a) 18:00 BT, (b) 22:00 BT on April 21 and, (c) 02:00 BT on April 21, 2025 (The black and blue wind barbs indicate the records of wind speed greater than 25 m·s^{-1} within 4 hours for the first and second Derecho events, respectively)

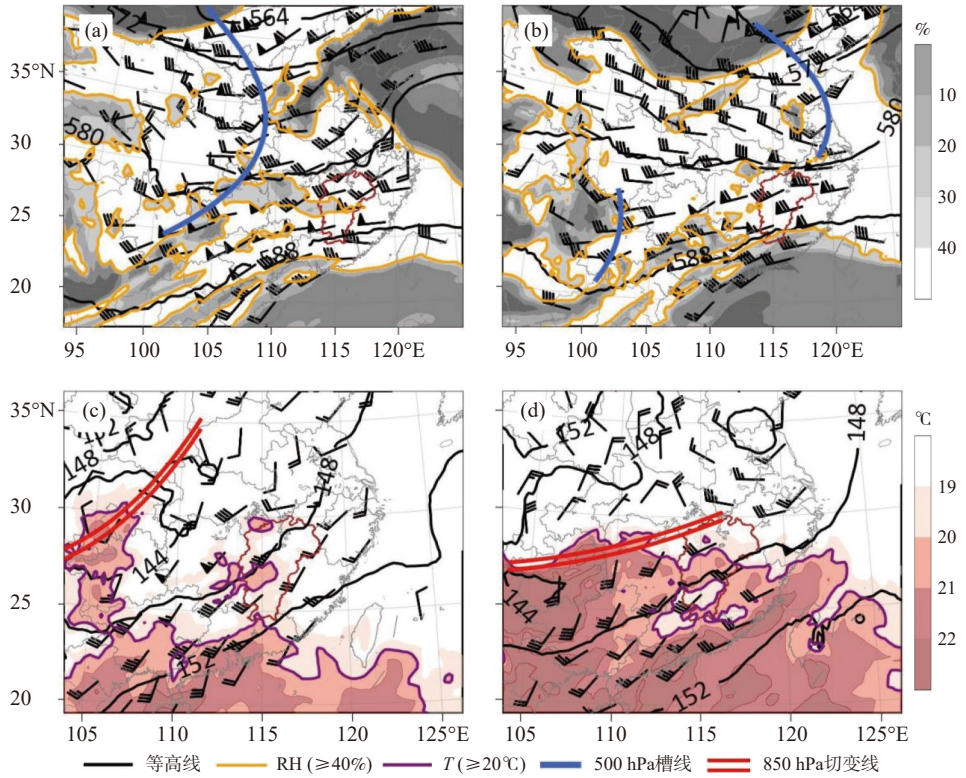


图 3 2025 年 4 月 21 日 08:00 (a、c) 和 20:00 (b、d) 500 hPa 风 (风羽, 单位: m·s^{-1})、位势高度 (黑线, 单位: dagpm) 和相对湿度 (填色) 分布 (a、b) 及 850 hPa 风 (风羽, 单位: m·s^{-1})、位势高度 (黑线, 单位: dagpm) 和温度 (填色) 分布 (c、d)

Fig. 3 Distributions of (a, b) wind field (barbs, unit: m·s^{-1}), geopotential height (black contours, unit: gpm), relative humidity (shaded) at 500 hPa and (c, d) wind field (barbs, unit: m·s^{-1}), geopotential height (black contours, unit: gpm), air temperature (shaded) at 850 hPa at (a, c) 08:00 BT and (b, d) 20:00 BT on April 21, 2025

区 (图 3a)。21 日白天, 中层干区随着低槽快速东移至江南北部。850 hPa (图 3c、d), 低层切变线南侧偏南气流强盛 (达 22 m·s^{-1}), 湖南东部-江西西部出现一个 22 ℃ 的低层暖中心 (图 3c)。20:00 西南风继续维持, 暖区扩大, 江西中部依然是暖中心。对流发生的环流背景属于槽前“低空暖平流强迫”类 (孙继松等, 2014; 许爱华等, 2014)。

3.2 环境条件

下面给出 2025 年 4 月 21 日 08:00 大风过程发生前, 长沙、南昌站的温度对数压力 (T-ln$p$) 图 (图 4) 和探空表 (表 2) 以及 14:00 环境参数空间分布 (图 5), 进行本次大风过程的环境条件分析。

3.2.1 水汽条件

因中层干区的存在, 长沙和南昌均具有“上干下湿”的层结特征。最干层次在 400 hPa 以上, 850 hPa 以下的低层具有较好的湿度条件, 长沙和南昌 850 hPa 比湿分别为 14.4 和 14.0 g·kg^{-1}, 925 hPa 比湿则分别为 16.3 和 15.9 g·kg^{-1}。400 hPa 从湖北-江西中北部-福建北部有一条宽广相对湿度小于 40% 的中层干区 (图 5a)。

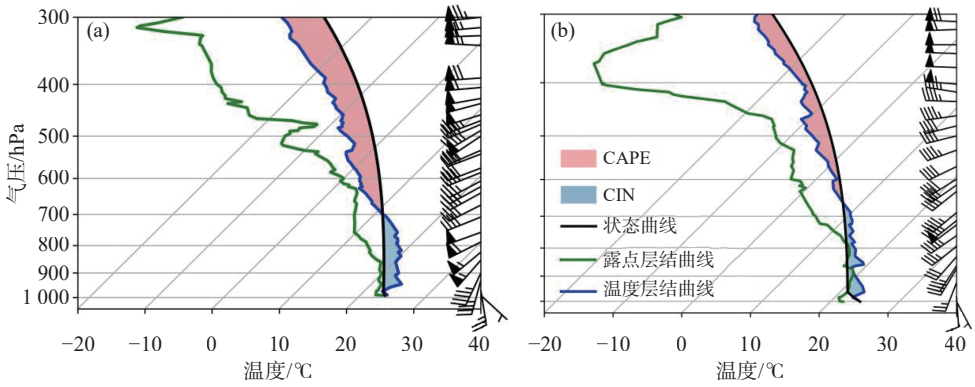


图 4 2025 年 4 月 21 日 08:00 长沙 (a) 和南昌 (b) 站温度对数压力 (T-ln$p$) 图

Fig. 4 Temperature-log pressure (T-ln$p$) diagrams at (a) Changsha and (b) Nanchang station at 08:00 BT on April 21, 2025

表 2 2025 年 4 月 21 日 08:00 长沙和南昌探空站环境参数

Table 2 Environment parameters of Changsha and Nanchang radiosonde station at 08:00 BT on April 21, 2025

探空站	比湿/(g·kg^{-1})				能量/(J·kg^{-1})		垂直温度差/℃		垂直风切变/(m·s^{-1})				夹卷层平均风速/(m·s^{-1})
	Q_5	Q_7	Q_8	Q_9	CAPE	DCAPE$_6$	T_{85}	T_{75}	S_1	S_3	S_6	S_8	W_{457}
长沙	2.0	9.0	14.4	16.3	1 086.1	564.4	26.0	17.1	19.5	16.6	17.5	30.7	19.2
南昌	2.7	8.0	14.0	15.9	424.4	575.6	25.9	17.3	12.7	17.0	16.1	19.4	17.0

注: Q_5、Q_7、Q_8、Q_9分别表示500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa比湿; CAPE、DCAPE$_6$分别表示最不稳定层到平衡高度的对流有效位能、600 hPa下沉对流有效位能; T_{85}、T_{75}分别表示850减500 hPa、700减500 hPa的温度差; S_1、S_3、S_6、S_8分别表示0—1 km、0—3 km、0—6 km、0—8 km的垂直风切变; W_{457}表示夹卷层400、500、700 hPa三层平均风速

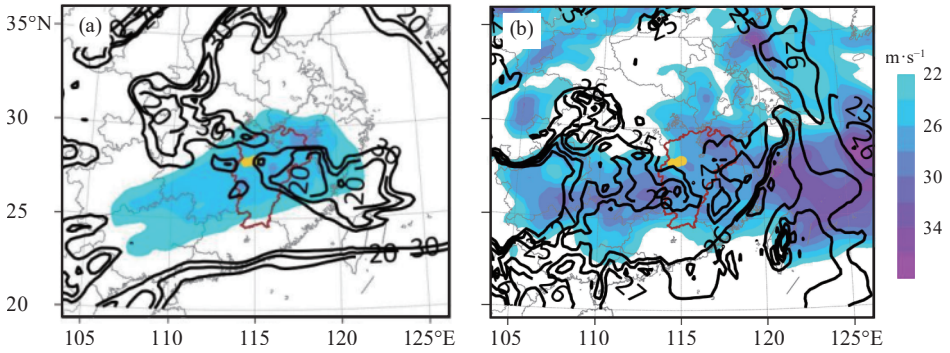


图 5 2025 年 4 月 21 日 14:00 夹卷层平均风速 (填色) 及 400 hPa 相对湿度 (黑色等值线, 单位: %) 分布 (a) 和 0—8 km 的垂直风切变 (填色) 及 850 与 500 hPa 温差 (黑色等值线, 单位: ℃) 分布 (b) (黄点标出 12 级大风站位置)

Fig. 5 Distributions of (a) mean wind speed (shaded) in the entrainment layer and 400 hPa relative humidity (black contours, unit: %), (b) 0—8 km vertical wind shear (shaded) and temperature difference (black contours, unit: ℃) between 850 hPa and 500 hPa at 14:00 BT on April 21, 2025 (Yellow dots indicate the locations of stations with Force 12 gales recorded)

3.2.2 热力条件

能量条件较好, 长沙和南昌的 CAPE 分别为 1 086.1 和 424.4 J·kg^{-1}, 600 hPa 的 DCAPE 则分别为 564.4 和 575.6 J·kg^{-1} (图 4、表 2)。因低层强盛的暖平流, 致使低层增暖显著, 长沙和南昌的 850 减 500 hPa 的温度差 (T_{85}) 分别为 26 和 25.9 ℃, 高于曹倩等 (2024) 统计的大风发生平均值 (24.2 ℃), 接近 75% 分位数 (26.3 ℃)。在发生 12 级大风站点上游有大片的 T_{85}>26 ℃ 的区域 (图 5b)。长沙和南昌的 700 减 500 hPa 的温度差 (T_{75}) 分别为 17.1 和 17.3 ℃ (图 4、表 2), 高于预报员经验阈值 16 ℃。T_{85} 和 T_{75} 越大, 下沉气流较周围温度越低, 越能加速下沉运动。

3.2.3 动力条件

表征近地面动力抬升能力的 0—1 km 风切变很强, 长沙和南昌分别为 19.5 和 12.7 m·s^{-1} (图 4、表 2)。0—6 km 的风切变长沙和南昌分别为 17.5 和 16.1 m·s^{-1} (图 4、表 2), 南昌略小于雷暴大风发生 25% 分位数 17.2 m·s^{-1} (曹倩等, 2024), 值得注意的是长沙 0—8 km 的风切变达到 30.7 m·s^{-1}。12 级大风发生区对应有大于 28 m·s^{-1} 的 0—8 km 的风切变大值区 (图 5b)。因此, 当天垂直风切变不仅强而且深厚。400、500、700 hPa 的平均风速可以用来表征中层夹卷过程, 且夹卷层风速越大, 动量下传对地面大风的贡献度越大 (马淑萍等, 2019; 金米娜等, 2025)。长沙、南昌的夹卷层平均风速分别为 19.2、17.0 m·s^{-1} (图 4、表 2), 均大于夹卷层风速阈值 15.7 m·s^{-1} (曹倩等, 2024)。12 级大风发生区位于一个大于 24 m·s^{-1} 的夹卷层风速大值区中 (图 5a), 远大于 15.7 m·s^{-1} 的大风发生阈值。

总的来看, “4·21”过程发生前, 中高层干区和低层湿区, 850 hPa 减 500 hPa 温差大, “上干下湿”和“上冷下暖”特征明显, 能量条件较好; 有深厚且强的垂直风切变, 中层急流强盛, 动力条件好 (图 4、表 2), 环境条件有利于大风发生。临近环境条件比较, 第 1 次 12 级大风有更好的中层干层条件, 而第 2 次 12 级大风的风切变、夹卷作用、超低空急流等动力条件均更好, 两次大风的能量条件相当 (图 5)。

4 引发宜春 2 次极端大风的中尺度系统雷达特征比较

合适的环境为 Derecho 事件的发生提供了有利条件, 但无法解释为何 12 级大风两次都集中出现在

江西宜春，并分布在约 40 km 的长轴区域。因此通过分析 γ 中尺度系统演变特征，了解两次 12 级大风均出现在此的原因。图 6 为两次大风发生前 15:27 和 19:27 的双偏振雷达回波情况。

第 1 次 12 级大风发生前 15:27 双偏振雷达图 (图 6a—f) 显示，在上高县北部及其以北有一个面积与上高县域面积相当的超级单体风暴，存在一个从 15:05—16:16 (宜春雷达 ROSE 的 060 中气旋产品) 持续超 1 h 的中气旋。水平反射率因子 (Z_H) 最大为 68.5 dBz，垂直累积液态水最大为 69.5 kg·m^{-2}，东南方向钩状回波明显，在 3.3 °仰角 (图 6a) 具有旁瓣回波。超级单体风暴东部和西部的水粒子有显著区别，东部有更高的低层差分反射率因子 (Z_{DR})，1.5°仰角 (图 6d) Z_{DR} 超过 3 dB 均在东部；有更低的低层差分

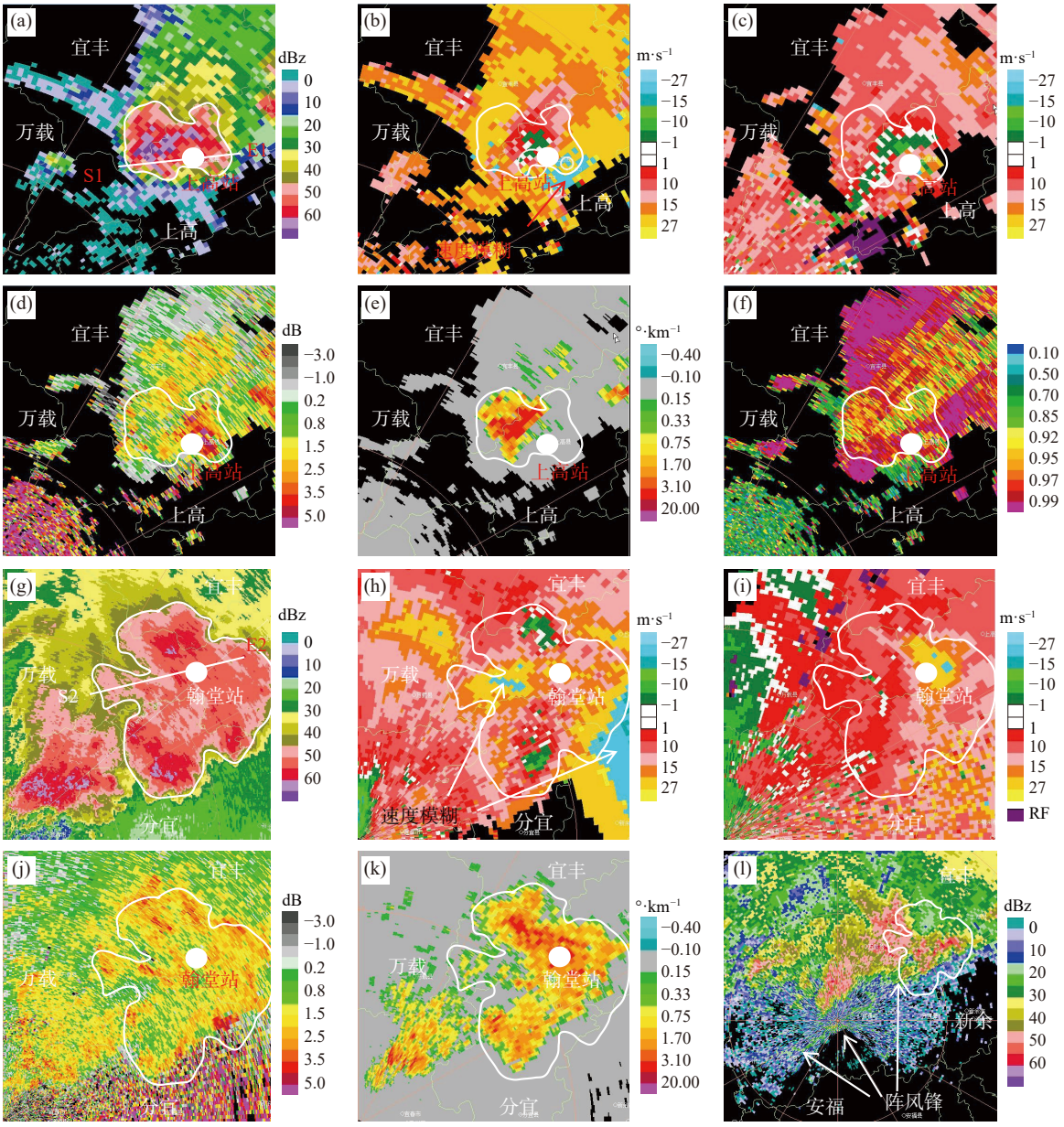


图 6 宜春雷达 2025 年 4 月 21 日 15:27 的 3.3 °仰角反射率因子 Z_H (a)、3.3 °仰角径向速度 V (b)、0.5 °仰角径向速度 V (c)、1.5 °仰角差分反射率因子 Z_{DR} (d)、1.5 °仰角差分传播相移率 K_{DP} (e)、1.5 °仰角相关系数 CC (f) 以及 19:27 的组合反射率 CR (g)、5.2 °仰角径向速度 V (h) 、0.5 °仰角径向速度 V (i)、1.5 °仰角差分反射率因子 Z_{DR} (j)、1.5 °仰角差分传播相移率 K_{DP} (k)、1.5 °仰角反射率因子 Z_H (l) (白色轮廓为两次大风过程大于 45 dBz 的风暴主体；白点为 12 级大风站点)

Fig. 6 (a) Reflectivity factor (Z_H) and (b) radial velocity (V) at 3.3 ° elevation angle, (c) radial velocity (V) at 0.5 ° elevation angle, (d) differential reflectivity factor (Z_{DR}), (e) specific differential phase (K_{DP}) and (f) correlation coefficient (CC) at 1.5 ° elevation angle at 15:27 BT, (g) composite reflectivity (CR), (h) radial velocity (V) at 5.2 ° elevation angle, (i) radial velocity (V) at 0.5 ° elevation angle, (j) differential reflectivity factor (Z_{DR}), (k) specific differential phase (K_{DP}) and (l) reflectivity factor (Z_H) at 1.5 ° elevation angle of Yichun radar at 19:27 BT on April 21, 2025 (The white outlines denote storm cores with radar reflectivity exceeding 45 dBz during the two gale events. White dots indicate the stations where level-12 winds were recorded)

传播相移率 (K_{DP}), 1.5 °仰角 (图 6e) K_{DP} 东部均小于 0.15 °·km^{-1}; 东部也有较多区域低层 1.5 °仰角 (图 6f) 分布 0.98 以上的相关系数 (CC)。以上特征都表征东部有固态降水落地, 因此该超级单体东部孕育有冰雹, 上高县城也确实有人目击到冰雹落地。东西向的 Z_H 剖面, 超级单体风暴东部有清晰的有界弱回波区, 且东部 45 dBz 的回波区高度很低, 约 2 km (图 8e 白圈标出)。其位置与超级单体风暴前侧下沉区 (FFD) 大体相对应。王秀明等 (2025) 认为 FFD 处, 当云底以下较干, 蒸发作用使得仅有稀疏冰雹落下。本次的超级单体东部 VIL 大、低层 Z_{DR} 大、低层 K_{DP} 小, 观测到稀疏冰雹落地。而超级单体西部更多是以液态降水为主, 表现为 1.5 °仰角低层 Z_{DR} 为 1.5~2.5 dB, 1.5°仰角 K_{DP} 为 2~6.1 °·km^{-1}。

第 2 次 12 级大风的风暴特征与第 1 次不同, 表现为有多个最大反射率因子 55~60 dBz 结构较松散的单体。风暴覆盖面积约为第 1 次 12 级大风超级单体风暴的 3~4 倍 (图 6g—l)。低层水粒子分布较均匀, Z_{DR} 值大体为 1.5~2.5 dB, K_{DP} 则 0.5~3.0 °·km^{-1}, 高组合反射率区域对应着更高 Z_{DR} 和 K_{DP}。与极端大风相关的最显著特征是多单体风暴高层后侧 (西部) 有一个风速核。该风速核 5.2 °仰角 (图 6h) 径向速度最大为 29.5 m·s^{-1}, 并且不同仰角间具有空间连续性, 仰角越低, 风速核越靠近多单体风暴前侧 (东部), 0.5 °仰角 (图 6i) 径向速度最大为 31 m·s^{-1}。该风速核在多单体风暴的演变过程中, 也起了重要作用, 19:27 多单体风暴几个较强单体呈现开口向西侧的反“C”形分布。

5 宜春两次极端大风的成因对比分析

江西宜春两次极端大风分别由超级单体风暴和多单体风暴引发。两次过程均以雷暴合并为前置关键机制, 但动力成因差异显著: 超级单体大风由下击暴流与强冷池密度流主导; 多单体大风主要源于强垂直风切变环境下的动量下传, 冷池作用偏弱。两次过程均表现出回波核先抬升后下沉的典型雷达先兆特征, 可为大风短时预警提供参考。

5.1 雷暴合并对风暴的增强作用

这两次在江西宜春产生 12 级大风的风暴组织结构虽然分别为超级单体风暴和多单体风暴, 但他们在产生 12 级雷暴大风之前, 都发生了雷暴合并。研究表明, 风暴合并可以显著增加风暴强度 (李海俊等, 2026), 因此给出这两次 12 级大风前的组合反射率 (CR) 演变 (图 7) 用于讨论风暴合并的作用。

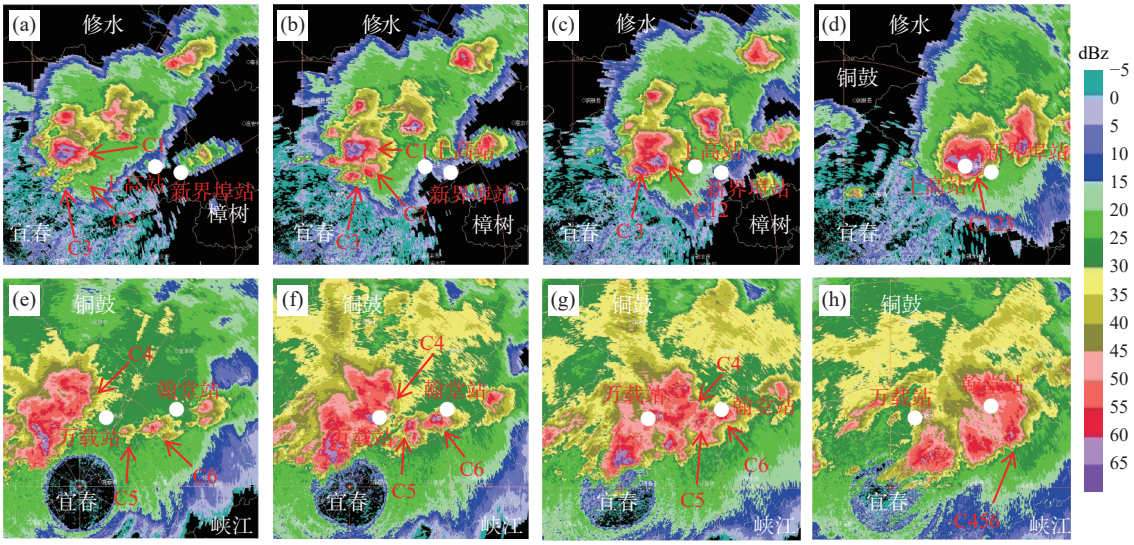


图 7 宜春雷达 2025 年 4 月 21 日 14:48 (a)、15:00 (b)、15:11 (c)、15:32 (d)、18:54 (e)、19:05 (f)、19:16 (g)、19:32 (h) 组合反射率 CR (白点为 12 级大风站点)

Fig. 7 Composite reflectivity (CR) from Yichun radar at (a) 14:48 BT, (b) 15:00 BT, (c) 15:11 BT, (d) 15:32 BT, (e) 18:54 BT, (f) 19:05 BT, (g) 19:16 BT, (h) 19:32 BT on April 21, 2025 (White dots indicate stations where level-12 winds were recorded)

对于第 1 次 12 级大风天气, 14:48 在发展成熟的超级单体 C1 的南侧, 万载南部山区 (最高海拔约 800 m) 有小单体 C2、C3 新生 (图 7a)。当超级单体 C1 靠近小单体 C2, 超级单体 C1 南侧迅速加强, 并加速分裂, 形成合并后的 C12。小单体 C3 也迅速并入 C12, 形成 55 dBz 相连为一个整体, 但东西两侧各有一个 65 dBz 反射率因子核的风暴 (图 7b、c)。一个体扫之后, 65 dBz 反射率因子核也合并 (图 7d)。

第 2 次 12 级大风天气, 18:54 在多单体风暴 C4 的前侧, 有多个小单体在上高西南部山区 (最高海拔约 700 m) 发展, 其中与上高翰堂单体合并相关的为小单体 C5 和 C6 (图 7e)。这些小单体触发时间约为 18:20,

同一时刻在触发地上游约 50 km 的宜春风廓线雷达监测到 1.5 km 之下的超低空急流由 5 m·s^{-1} 快速增强到 30 m·s^{-1}。由此推断这些小单体由于超低空急流加强且上坡抬升触发而形成。与第 1 次类似的是都发生了合并, 不同的是该合并仅是并入多单体风暴 (图 7e—g), 并没有在强度核范围上明显加强, 但合并之后, 回波多个中心形态变为开口向西侧的反“C”形 (图 7h)。

5.2 下击暴流的作用

第 1 次 12 级大风天气的反射率因子拼图和剖面演变 (图 8a—l) 及双偏振量剖面演变 (图 9a—i) 显示, 15:11 东部为 C1 和 C2 合并后的新单体 C12, 西部为 C3 (图 7c)。15:22 C12 和 C3 进一步合并为 C123 后, 西部 60 dBz 以上强回波中心的高度显著抬升至约 5 km (图 8a、d), 这和风暴合并加强上升气流有关。15:27 (图 8b、e), 西部 60 dBz 以上强回波中心迅速下降, 东部强回波中心高度维持在 5—10 km。15:22—15:27, 上高上空约 2.5—7 km 的区域 Z_{DR} 由 2.5 猛增到 5 dB, K_{DP} 约 1~3 °·km^{-1}, CC 约 0.92~0.97, 对应 Z_H 45~55 dBz, 这是大雨滴和冰雹混合相态的特征 (图 9a、b、d、e、g、h), 事实上, 上高本站观测到直径 1.58 mm 稀疏冰雹落地。此外, 2.5 km 高度以下区域 CC 降至 0.9 以下, 且出现 K_{DP} 空洞, 说明上高近

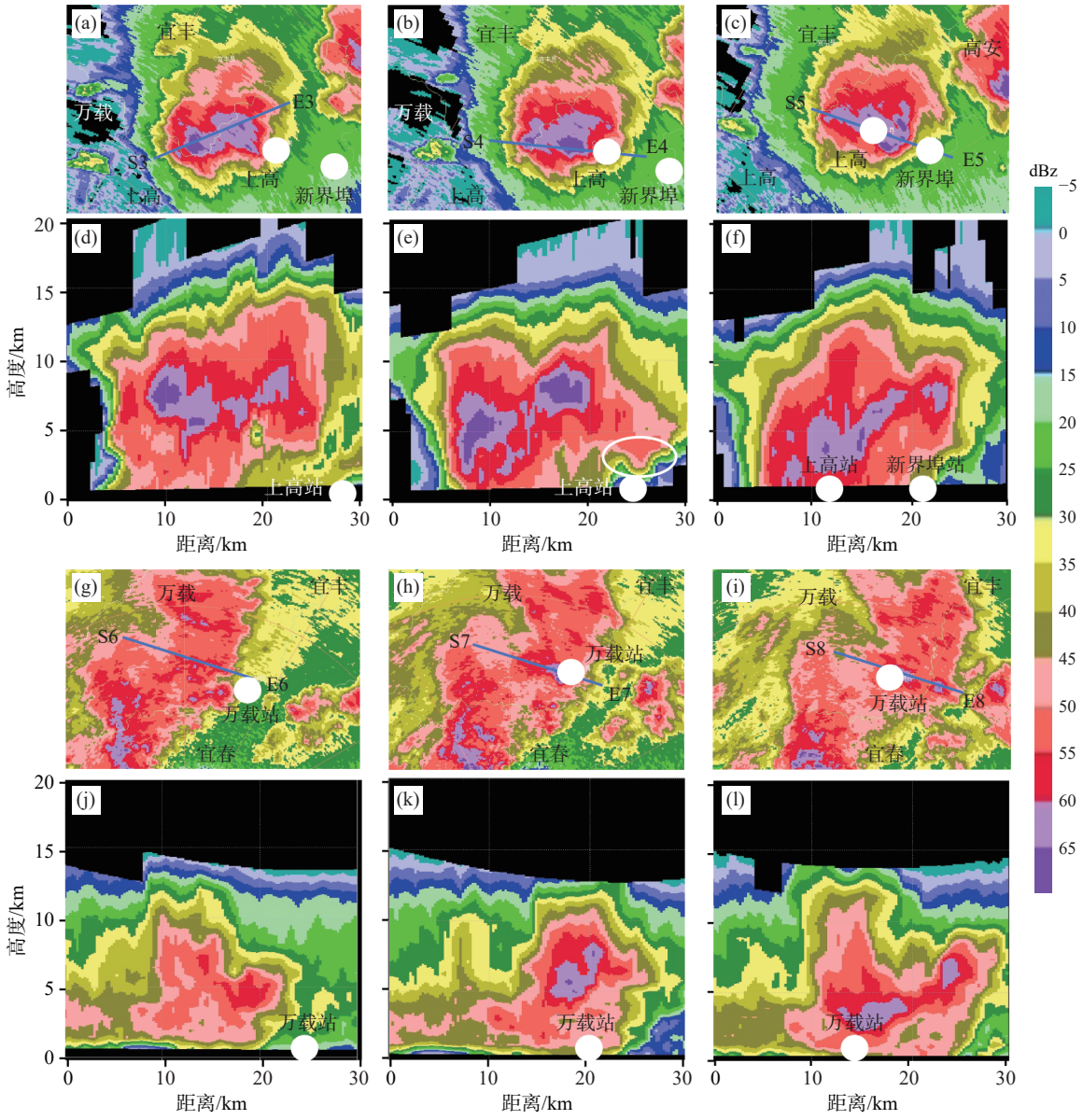


图 8 宜春雷达 2025 年 4 月 21 日 15:22 (a)、15:27 (b)、15:32 (c)、18:59 (g)、19:05 (h)、19:10 (i) 组合反射率因子, 以及沿直线 S3E3 (d)、S4E4 (e)、S5E5 (f)、S6E6 (j)、S7E7 (k)、S8E8 (l) 反射率因子剖面 (白点为 12 级大风站点)

Fig. 8 Composite reflectivity factor from Yichun radar (a) 15:22 BT, (b) 15:27 BT, (c) 15:32 BT, (g) 18:59 BT, (h) 19:05 BT, (i) 19:10 BT on April 21, 2025, and reflectivity factor cross-sections along (d) S3E3, (e) S4E4, (f) S5E5, (j) S6E6, (k) S7E7, and (l) S8E respectively (The white dots indicate stations with level-12 winds recorded)

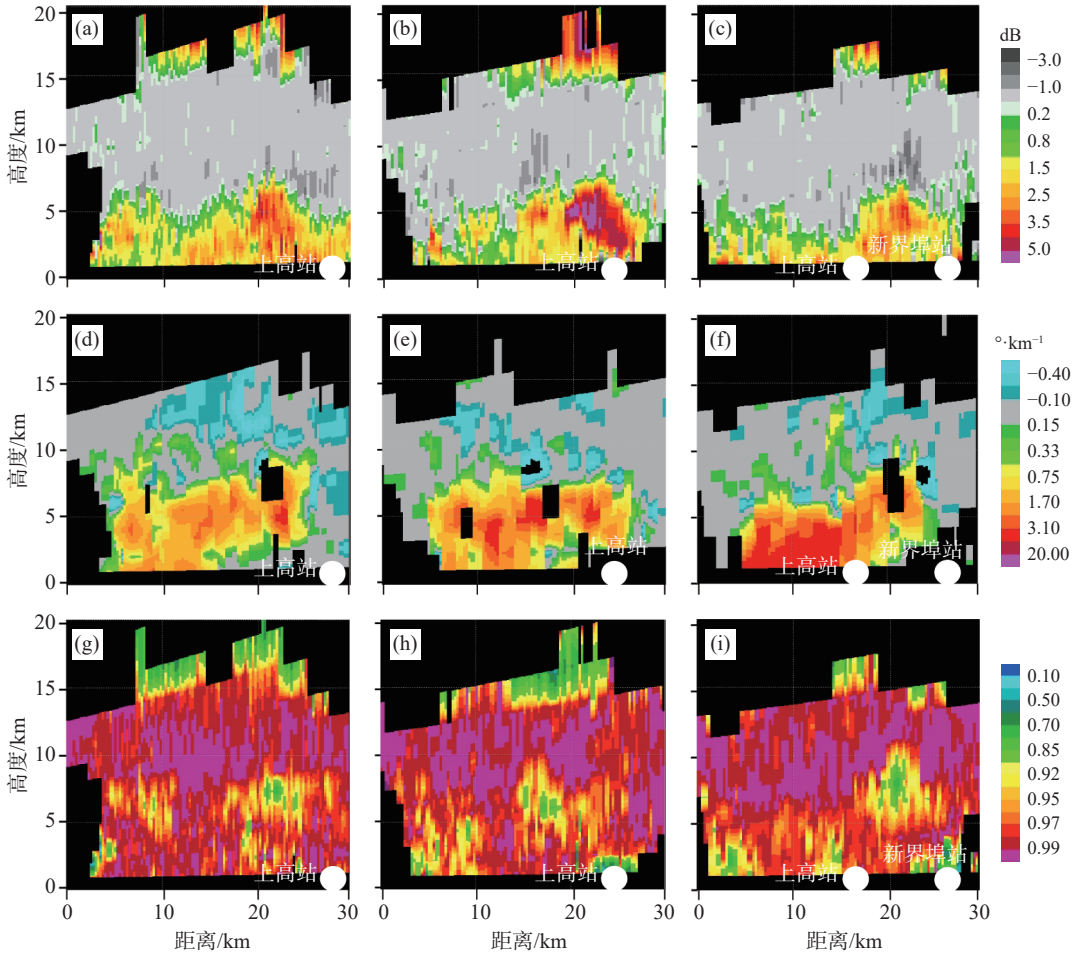


图 9 宜春雷达 2025 年 4 月 21 日 15:22 (a、d、g)、15:27 (b、e、h)、15:32 (c、f、i)Z_{DR} (a、b、c)、K_{DP} (d、e、f)、CC (g、h、i) 剖面 (白点为记录到 12 级大风站点)

Fig. 9 Cross sections of (a, b, c) Z_{DR}, (d, e, f) K_{DP}, and (g, h, i) CC from Yichun radar at (a, d, g) 15:22 BT, (b, e, h) 15:27 BT, and (c, f, i) 15:32 BT on 21 April 2025 (The white dots indicate the stations with force 12 gales recorded)

地面有大量的杂物吹起 (图 9e、h)。15:32 (图 8c、f 和图 9c、f、i) 西部 60 dBz 以上的强回波中心几乎接地, 对应 Z_{DR} 约 0.8~1.5 dB, K_{DP} 约 3~10 °·km^{-1}, CC 约 0.92~0.97, 对应的相态由稀疏的大雨滴冰雹混合物转变为以更小雨滴为主的天气, 记为第 1 波下击暴流大风。东部强回波中心高度也迅速下降, 记为第 2 波, 且东部强回波中心以东有新回波中心生成。15:38 (图略), 第 2 波大于 55 dBz 强回波中心接地, 此时正好位于上高站上空, 对应上高国家站 15:40 记录到 32.8 m·s^{-1} 雷暴大风。5 min 后 15:43 (图略), 第 2 波大于 55 dBz 的强回波快速移动至相隔约 8 km 的新界埠区域站上空, 回波移动速度约 26.7 m·s^{-1}, 上高新界埠区域站 15:50 记录到 35.1 m·s^{-1} 雷暴大风。因此, 通过时间匹配找到的回波, 在大风产生前 3~5 个体扫, 有前后 2 个大于 55 dBz 的回波核迅速下降, 并对应产生 2 波雷暴大风, 符合下击暴流雷达识别特征 (王秀明等, 2023; 杨秀庄等, 2025)。因此判断下击暴流是此阶段大风形成的主要原因。

在万载观测到第 2 次 12 级大风的前一个体扫时刻 18:59, 同样也观测到风暴合并加强, 合并之后, 出现一个 60 dBz 以上的反射率因子核, 并迅速下降 (图 8g—l)。19:05—19:10 该反射率因子核位于万载上空约 2 km 处。虽然万载观测到的大风与上高县相当, 但是从灾害调查来看, 上高破坏面积远大于万载, 几乎覆盖上高全域, 而万载仅为万载县城及县城以东区域, 且万载县城被破坏程度低于上高县城。

第 1 次 12 级大风和第 2 次万载的 12 级大风发生的前兆特征为回波核先高度抬升后迅速下降, 并比合并前的下沉气流更猛烈。上高 15:27 出现回波核加强后迅速下降的特征, 提前量约 13 min。因此在短临天气预报业务中需要关注上游下沉气流主导的单体移入, 以及与小单体合并后回波核先抬升再次快速下降后, 下沉气流加强的可能性。

5.3 冷池与密度流的作用

当风暴下沉气流到达地表, 会形成中尺度低温、高密度区, 即冷池; 冷池高密度冷空气向外扩散则为

密度流。冷池水平尺度、厚度和强度会直接影响地面大风强度，可用地面观测站的变温和变压来定性讨论(王秀明等, 2012)。

第 1 次 12 级大风来临前，15:00 (图 10a) 江西省西北部有一个温差达到 12 ℃ 的强非锋性斜压带(Sanders, 1999)。需要说明的是，不同站点的海拔高度对于温差形成具有一定作用，但难以形成 12℃ 的温差。12℃ 温差主要由低层偏南急流在非锋性斜压带南侧增暖作用和风暴冷池在西北侧强烈降温所致。风暴产生了一个 1 h 降温达 10 ℃ 的强冷池，观测到 12 级大风的上高站和上高新界埠区域站正位于冷池中心 (图 10c)。上高站气温下降、风速变大均开始于 15:25，但监测到强降水开始于 15:40—15:45，5 min 雨量 12.8 mm，说明在接地强回波前的 15 min，上高站已经受密度流影响。因此，随着风暴自西北向东南经过上高上空，冷池出流边界处密度流也随之自西北向东南扫过，传播方向与 12 级大风西北风风向(表 1) 对应。

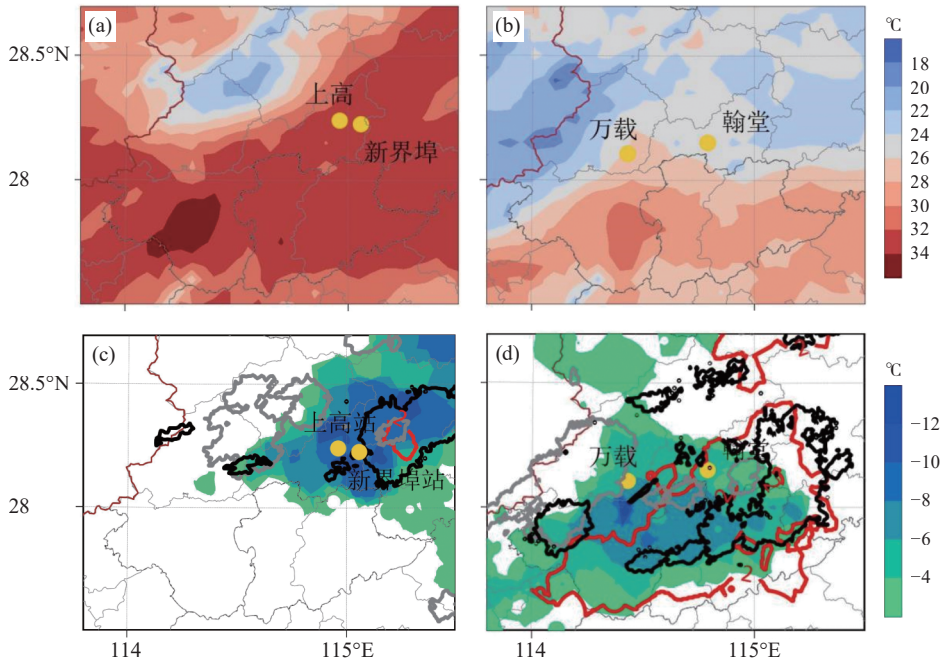


图 10 2025 年 4 月 21 日 15:00 (a)、19:00 (b) 地面区域站 2 m 气温和 16:00 (c)、20:00 (d) 1 h 变温 (填色)、1 h 变压 (红线，单位：hPa)、1 h 前 (灰线) 及当前 (黑线) 45 dBz 分布

Fig. 10 Distribution of 2-m air temperature at (a) 15:00 BT, (b) 19:00 BT, 1-hour temperature change (shaded) , 1-hour pressure change (red contours, unit: hPa) of surface automatic weather stations and 45-dBz reflectivity at 1 h prior (gray contours) and current time (black contours) at (c) 16:00 BT, (d) 20:00 BT on April 21, 2025

第 2 次 12 级大风发生前，19:00 温度场上，江西西北部依然有一个非锋性斜压带，强度较第一次更弱，温差达到 8 ℃ (图 10b)。与第 1 次不同，本次风暴冷池范围更大，强度更弱，冷池区降温平均仅 6~8 ℃。观测到 12 级大风的万载站和上高翰堂区域站位于冷池北侧，仅有 4~6 ℃ 的降温 (图 10d)。风暴自西向东移动，前侧出流边界密度流动也自西向东移动，其中万载风向为西风，与密度流移动方向一致，但上高翰堂为西南风，与出流边界移向并不一致。因此，此次 12 级大风，冷池出流加剧大风的比重较第 1 次更低，尤其是上高翰堂 17:30 发生的 35.5 $m·s^{-1}$ 极端西南大风。

5.4 动量下传的作用

第 2 次上高翰堂的 12 级大风与动量下传作用有关，为进一步揭示动量下传观测特征，给出雷达径向速度剖面图 (图 11)。19:27 观测到一支向下伸展经风暴内部至地面的急流。径向速度图 (图 6h、i) 依次从高仰角至低仰角有自西南向东北的风速核，翰堂上空 0.5 °仰角 (图 6i) 约 1 km 高度雷达径向速度为 30.0 $m·s^{-1}$，19:30 翰堂区域站观测到 35.5 $m·s^{-1}$ 的雷暴大风。沿着 5.5°—0.5 °仰角的风速核中心连线 S1E1 (图 6g 中标注) 做剖面，有一支 27 $m·s^{-1}$ 径向速度大风速核从上游 4—7 km 高度下降至 50~55 dBz 回波核处 (翰堂区域站上空) 向下传播至接地 (图 11b、d)。这种现象在一些超级单体致灾大风事件中出现，其实质是风暴后侧入流急流 (RIJ) 存在高度下降现象 (孙继松, 2023)。RIJ 高度下降，进而将夹卷层 (上层) 动量经对流系统内部带到地面 (即动量下传)，造成地面辐散大风。在低仰角雷达速度图上，对流系

统范围内 RIJ 高度下降可表现为速度大值区自上层向地表的贯通。郑永光等 (2025a) 认为上层动量在垂直风切变大的环境背景下, 会通过形成活跃的湍流混合和惯性重力波进而产生强下沉运动, 实现动量下传。由上文环境条件分析可知, 0—8 km 具有大的垂直风切变, 符合这种机制。然而即使在十分有利的环境条件下, RIJ 高度下降并不持续出现 (孙继松, 2023)。在“4·21”过程中, 产生 12 级大风的多单体也不是持续出现 RIJ 高度下降的现象。即使这样, RIJ 高度下降依然可作为地面大风的一个先兆特征。由 19:16 雷达图可见 RIJ 高度下降, 较地面大风实况提前量约 14 min。

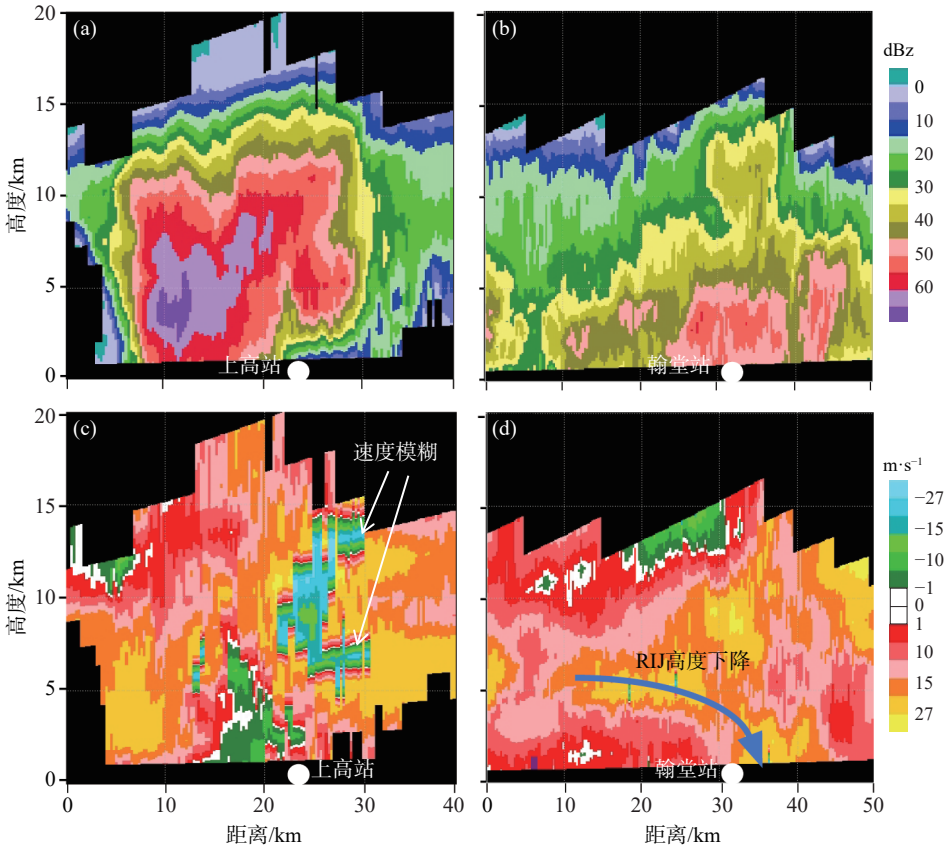


图 11 宜春雷达 2025 年 4 月 21 日 15:27 沿图 6a 中 S1E1 线 (a、c) 和 19:27 沿图 6g 中 S2E2 线 (b、d) 的反射率因子 (a、b)、径向速度 (c、d) 剖面图 (蓝色箭头为动量下传相关的风流向)

Fig. 11 Cross sections of (a, b) reflectivity factor and (c, d) radial velocity along line S1E1 in Fig. 6a from Yichun radar at (a, c) 15:27 BT, and along line S2E2 in Fig. 6g at (b, d) 19:27 BT on 21 April 2025 (The blue arrows indicate the wind direction associated with momentum downward transport)

对于第 1 次 12 级大风过程, 从各个角度做雷达剖面均没有发现类似第 2 次 12 级大风的径向速度上的动量下传特征, 因此仅给出与 S2E2 几乎平行且穿过反射率因子核心的剖面做对比分析 (图 11a、b)。在超级单体有界弱回波区附近有负速度区, 而第 2 次过程的风暴均表现为正速度, 无负速度区。

6 结论和讨论

利用高空地面气象站观测资料、双偏振雷达产品、ERA5 再分析数据, 对 2025 年 4 月 21 日江西宜春 15:30—15:50 和 19:00—19:30 相隔约 4 h 的 2 次 12 级大风特征、环境条件和成因进行了对比分析, 并总结大风前兆特征。得出如下主要结论:

(1) 江西北部大范围雷暴大风天气属于连续 2 次 Derecho 事件。第 1 次和第 2 次 Derecho 事件分别造成了江西宜春 15:30—15:50 和 19:00—19:30 的 12 级大风。

(2) 21 日 08 时的环境条件, 低层暖平流致使湖南江西有低层暖中心维持, 高空槽底中层干区随着高空槽东移, 也东移至低空暖中心上空, 具有“上干冷, 下暖湿”的层结特征; 0—8 km 的垂直风切变达 30.7 m·s^{-1}; 夹卷层平均风速达到 19.2 m·s^{-1}。

(3) 15:30—15:50 的 12 级大风主要由超级单体风暴下击暴流造成。先后 2 个 60 dBz 以上的强回波核接连迅速下降, 上高站和上高新界埠区域站均由第 2 个更强的强回波核接地造成, 并产生 1 h 降温 10 ℃ 的冷池。最主要机制为下击暴流和冷池密度流的共同作用。

(4) 19:00—19:30 的 12 级大风主要由多单体风暴造成。其中,万载站为下击暴流和冷池密度流共同作用,下击暴流作用更大。上高翰堂区域站为风暴后侧从中层 (5—10 km) 的动量下传造成。风暴后侧有一支 27 $m \cdot s^{-1}$ 大风速核从 4—7 km 迅速向下传播至接地,且具有时间连续性。

(5) 第 1 次 12 级大风和第 2 次万载的 12 级大风发生的前兆特征为回波核迅速下降。第 2 次上高翰堂 12 级大风的先兆特征为低仰角雷达速度图上大值区或速度模糊区的出现和速度剖面图上 RIJ 高度下降。

Derecho 事件内部可并存多种风暴动力过程,超级单体下击暴流、冷池密度流以及多单体风暴伴随的中层动量下传均能够诱发 12 级极端大风。回波核快速下降、RIJ 高度降低可作为雷暴大风发生的前兆信息。本研究可对南方春季极端雷暴大风临近预报提供一定参考。

参考文献 (References):

曹倩,郭建平,孙玉萍,等.2024. 2015—2023 年江西雷暴大风特征分析[J].气象,50(12):1495−1508. Cao Q, Guo J P, Sun Y P, et al. 2024. Analysis on the characteristics of thunderstorm gale in Jiangxi Province during 2015-2023 [J]. Meteorological Monthly,50(12):1495−1508 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.101501

陈晓欣,俞小鼎,王秀明.2022.中国大范围雷暴大风事件 (Derechos) 研究: 时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J].气象学报,80(1):67−81. Chen X X, Yu X D, Wang X M. 2022. Investigation of Derechos in China: Spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(1):67−81 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.067

陈云辉,许爱华,许彬,等.2019.江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):126−134. Chen Y H, Xu A H, Xu B, et al. 2019. Analysis on mesoscale characteristics and causes of an extreme thunderstorm gale event in Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):126−134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.00

崔新艳,陈明轩,秦睿,等.2025.雷暴大风形成机理和临近预报的研究进展[J].气象,51(7):773−788. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al. 2025. Research advances in the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales [J]. Meteorological Monthly,51(7):773−788 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.092401

费海燕,王秀明,周小刚,等.2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分[J].气象,42(12):1513−1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al. 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China [J]. Meteorological Monthly, 42(12):1513−1521 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.12.009

金米娜,吴静,李婕,等.2025. 2024 年春季江西 3 次强对流过程环境场特征分析[J].山地气象学报,49(6):1−11. Jin M N, Wu J, Li J, et al. 2025. Analysis of environmental field characteristics of three severe convective events in Jiangxi province in spring 2024 [J]. Journal of mountain meteorology,49(6):1−11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2097−4086.2025.06.001

李海俊,金米娜,徐渊,等.2026.一次超级单体风暴长时间维持的双偏振特征和机制分析[J].暴雨灾害,45(3):361−372. Li H J, Jin M N, Xu Y, et al. 2026. Dual-polarization characteristics and mechanisms of a supercell storm with long-term maintenance [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):361−372 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−90

李海俊,吴静,李婕,等.2025. ROSE2.1 南昌雷达 2021—2023 年定量降水估测产品检验评估[J].沙漠与绿洲气象,19(3):147−156. Li H J, Wu J, Li J, et al. 2025. Assessment of ROSE2.1 quantitative precipitation estimation product from Nanchang radar during 2021—2023 [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):147−156 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2402.04001

李淑璠,王秀明,刘屹靖,等.2025.江西南昌“3.31”极端大风成因分析[J].大气科学,49(3):609−628. Li S F, Wang X M, Liu Y J, et al. 2025. Analysis on the causes of the extreme winds on march 31, 2024, in Nanchang, Jiangxi province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,49(3):609−628 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2503.24089

马淑萍,王秀明,俞小鼎.2019.极端雷暴大风的环境参量特征[J].应用气象学报,30(3):292−301. Ma S P, Wang X M, Yu X D. 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(3):292−301 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190304

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. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales [J]. Meteorological Monthly,49(1):1−11 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.111802

孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. The basic principles and methods of convective weather forecasting [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

王秀明,汤欢,俞小鼎,等.2025.超级单体风暴研究进展[J].气象学报,83(3):813−832. Wang X M, Tang H, Yu X D, et al. 2025. Advances in research on Supercell storms [J]. Acta Meteorologica Sinica,83(3):813−832 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2025.20240156

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]. Meteorological Monthly,49(2):129−145 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.100301

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 Meteorology,31(2):504−514 (in Chinese)

许爱华,孙继松,许东蓓,等.2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400−411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. Meteorological Monthly,40(4):400−411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.04.002

杨秀庄,邓世有,李力,等.2025.多单体强风暴影响下的一次极端强对流天气中尺度特征及触发机制[J].高原山地气象研究,45(4):28−37. Yang X Z, Deng S Y, Li L, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of an extreme severe convection under the influence of multi-cell strong storms [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(4):28−37 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.04.003

郑永光,何迪,李典南,等.2025a. 2025 年 4 月 11—13 日我国大范围极端大风天气过程特征和成因[J].暴雨灾害,44(4):421−430. Zheng Y G, He D, Li D N, et al. 2025a. Characteristics and formation mechanisms of the widespread extreme gale weather process in China during April 11-13, 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):421−430 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−085

郑永光,杨波,蓝渝,等.2025b.强对流天气形成机制和预报研究综述[J].气象,51(11):1495−1522. Zheng Y G, Yang B, Lan Y, et al. 2025b. A review of mechanisms and forecasting technology of severe convective weather [J]. Meteorological Monthly,51(11):1495−1522 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2025.082501

周芳,郑婧,支树林,等.2025.江西北部“3·31”致灾大风天气过程特征和成因[J].暴雨灾害,45(2):149−158. Zhou F, Zheng J, Zhi S L, et al. 2025. Characteristics and causes of “3·31” extreme thunderstorm gale process in northern Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):149−158 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−171

Bentley M L, Mote T L. 1998. A climatology of derecho-producing mesoscale convective systemsin the central and eastern United States, 1986-95. Part I: temporal and spatial distribution [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,79(11):2527−2540. doi:10.1175/1520−0477(1998)079<2527:acodpm>2.0.co;2

Coniglio M C, Stensrud D J, Richman M B. 2004. An observational study of derecho-producing convective systems [J]. Weather and Forecasting,19(2):320−337. doi:10.1175/1520−0434(2004)0192.0.CO;2

Doswell C. 2001. Severe convective storms—An Overview [J]. Meteorological Monographs,28:1−26. doi:10.1175/0065−9401−28.50.1

Droegemeier K K, Wilhelmson R B. 1987. Numerical simulation of thunderstorm outflow dynamics. Part I: outflow sensitivity experiments and turbulence dynamics [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 44(8):1180−1210. doi:10.1175/1520−0469(1987)0442.0.CO;2

Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,38(8):1511−1534. doi:10.1175/1520−0469(1981)038<1511:TADITC>2.0.CO;2

Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: widespread convectively induced windstorms [J]. Weather and Forecasting,2(1):32−49. doi:10.1175/1520−0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2

Luo L P, Xue M, Xu X, et al. 2024. Understanding simulated causes of damaging surface winds in a derecho-producing mesoscale convective system near the East China coast based on convection-permitting simulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 41(11): 2112−2130. doi:10.1007/s00376-024-3314-8

Sanders F. 1999. A proposed method of surface map analysis [J]. Monthly WeatherReview,127(6):945−955.doi:10.1175/1520−0493(1999)1272.0.CO;2

Surowiecki A, Taszarek M. 2020. A 10-year radar-based climatology of mesoscale convective system archetypes and derechos in Poland [J]. Monthly Weather Review,148(8):3471−3488. doi:10.1175/MWR−D−19−0412.1

Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall linesand bow echoes. Part ll: their genesisand implications [J]. MonthlyWeatherReview,131(11):2804−2823.doi:10.1175/1520−0493(2003)1312.0.CO;2

Xia R D, Wang D H, Sun J H, et al. 2012. An observational analysis of a derecho in South China [J]. Journal of Meteorological Reserch,26(6):773−787. doi:10.1007/s13351−012−0608−z

(责任编辑　张　文)