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

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

顾小丽 肖王星 涂小萍 徐迪锋 周炳君 王宇浩 姜嘉俊 郭建民

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

GU Xiaoli，XIAO Wangxing，TU Xiaoping，XU Difeng，ZHOU Bingjun，WANG Yuhao，JIANG Jiajun，GUO Jianmin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-157

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

湖南衡阳“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件分析

Analysis of key warning points and environmental conditions for the '4.04'strong downburst event in Hengyang of Hunan

暴雨灾害. 2024, 43(2): 158-167 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-137

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

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

贵港市“5.20”下击暴流过程超级单体结构演变与环境特征分析

Analysis of supercell structure evolution and environmental characteristics of downburst in Guigang City of Guangxi On May 20, 2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 631-639 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-024

2017年7月29日宜昌三峡坝区一次下击暴流过程的中尺度分析

Mesoscale analysis of a downburst process in Yichang three gorges dam area on 29 July 2017

暴雨灾害. 2023, 42(2): 200-210 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-202

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

顾小丽,肖王星,涂小萍,等.2025.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[J].暴雨灾害,44(3):340−351. GU Xiaoli, XIAO Wangxing, TU Xiaoping, et al. 2025. A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):340−351 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−157

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

顾小丽[1,2], 肖王星[1,2], 涂小萍[1,2], 徐迪锋[1,2], 周炳君[1,2], 王宇浩[1,2], 姜嘉俊[1,2], 郭建民[3]

(1. 宁波市气象台, 宁波 315012; 2. 宁波市智慧气象重点实验室, 宁波 315012; 3. 宁波市应急管理局, 宁波 315100)

摘　要: 2022 年 7 月 12 日和 17 日宁波发生两次由下击暴流引起的 13 级和 12 级雷暴大风天气 (以下简称“7.12”和“7.17”过程), 其中“7·17”过程还造成重大人员伤亡。利用常规探空和地面观测数据、多普勒天气雷达资料以及 ERA5 再分析资料, 对这两次下击暴流过程发生的环境条件、雷达回波特征演变等进行对比分析。结果表明: (1) 两次过程发生的环境条件有明显差异。“7·12”过程发生在弱天气尺度强迫和弱垂直风切变条件下, 海陆风辐合和热力抬升共同触发了强对流风暴的发生和发展; “7·17”过程则发生在前倾槽背景下的“上干冷、下暖湿”的大气环境中, 天气尺度强迫和低层垂直风切变比 12 日更显著。(2) 两次过程的大气层结均具有显著的中层干层和较高的 0—3 km 温度垂直递减率, 中层干空气侵入是产生下击暴流的主要原因之一。(3) “7·12”过程中孤立的对流单体产生阵风锋, 阵风锋移动过程中触发一系列脉冲风暴, 导致系列微下击暴流; “7·17”过程是多单体风暴在合并加强过程中产生了宏下击暴流。两次过程均表现为反射率因子质心快速下降、45 dBz 回波顶坍塌现象, 其中“7·12”过程回波质心下降速度更快。

关键词: 下击暴流; 阵风锋; 脉冲风暴; 雷达回波; 回波质心

中图法分类号: P458　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−157

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

GU Xiaoli[1,2], XIAO Wangxing[1,2], TU Xiaoping[1,2], XU Difeng[1,2], ZHOU Bingjun[1,2], WANG Yuhao[1,2], JIANG Jiajun[1,2], GUO Jianmin[3]

(1. *Ningbo Meteorological Observatory*, *Ningbo* 315012; 2. *Ningbo Key Laboratory of Smart Meteorology*, *Ningbo* 315012; 3. *Ningbo Emergency Management Bureau*, *Ningbo* 315100)

Abstract: Thunderstorms with wind gusts of magnitude 13 and 12 caused by downburst storms occurred in Ningbo on July 12 and 17, 2022 (referred to as the “7.12” event and “7.17” event, respectively). The “7.17” event caused significant casualties. A comparative analysis of environment conditions and Doppler radar echo characteristics of the two downburst events is carried out by using multi-source data from S-band Doppler radar, conventional sounding and surface observation data, 1-minute high-resolution automatic station observation data, and ERA5 reanalysis data. The results are as follows. (1) Environmental weather conditions differ significantly between the two events. The “7.12” event occurred under weak synoptic-scale forcing and weak vertical wind shears. Convergences related to sea breezes and thermal uplifts triggered the occurrence and development of strong convections. However, the “7.17” event occurred under unstable layers with “lower warm-wet and upper cold-dry” conditions, which was related to forward tilting troughs. It displayed more significant synoptic-scale forcing and low-level vertical wind shears on 17 July than on 12 July. (2) Both processes showed significant mid-level dry layers and high vertical lapse rates from 0 to 3 km. The intrusion of mid-level dry air was one of the main reasons for the generation of downburst storms. (3) During the “7.12” event, a series of pulsive storms, along with moving gust fronts, triggered multiple micro downbursts and extreme winds. However, during the “7.17” event, the outbreak of macro downbursts and extreme winds resulted from the merging and intensification of multiple storms. In both events, radar echo characteristics showed a decrease in reflectivity core

收稿日期: 2023−07−25; **定稿日期**: 2024−05−25

资助项目: 浙江省自然基金项目 (LZJMY24D050001); 宁波市重点研发计划项目 (2023Z139); 宁波市公益项目 (2023S065); 宁波市气象科技项目 (NBQX2023001A, NBQX2023002B); 浙江省气象科技项目 (2023YB15, 2023YB16)

第一作者: 顾小丽, 主要从事强天气预报预警技术和灾害影响研究。E-mail: 68632949@qq.com

通信作者: 涂小萍, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 530604624@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

and collapse of 45 dBz echo-top. The descent rate of the reflectivity core on 12 July was faster than that on 17 July.

Key words: downburst; gust fronts; pulsive storm; radar echo; reflectivity core

引　言

下击暴流是发展成熟的强雷暴云中产生的中空气流向下、地面风速超过 17.9 $m \cdot s^{-1}$ 的灾害性大风, 不同于龙卷的辐合旋转性风场, 下击暴流所致大风通常呈辐散的直线或者曲线型 (郑永光等, 2016)。根据影响范围和持续时间, 下击暴流可分为宏下击暴流和微下击暴流, 宏下击暴流尺度大于 4 km, 持续时间 10 min 以上, 微下击暴流尺度小于 4 km, 持续时间小于 10 min (Fujita, 1979)。下击暴流产生的灾害性大风常造成重大经济损失与人员伤亡, 如 2015 年 6 月 1 日晚长江游轮“东方之星”在湖北省监利市附近遭受下击暴流袭击而侧翻, 导致船上四百多人遇难 (郑永光等, 2018)。

大气环境条件对下击暴流的发生、发展至关重要, 是潜势预报的重要依据。下击暴流一般产生在中等到强的垂直风切变环境中 (Doswell, 1984), 弱的垂直风切变条件下只有脉冲风暴这一种强对流风暴 (俞小鼎等, 2006a)。此外低层活跃的暖湿气流、中层显著干层、中低层大的温度垂直递减率也是下击暴流形成和维持的有利环境条件 (俞小鼎等, 2006b; 李彩玲等, 2021; 王一童等, 2022) 。

下击暴流发生、发展机理复杂, 研究表明水凝物粒子相变冷却产生的负浮力和重力拖曳作用是产生强下沉气流的重要因素 (刁秀广等, 2011; 张怡和赵志宇等, 2012; 张弛等, 2019), 下击暴流可由水凝物的向下拖曳作用所发动 (俞小鼎等, 2006b); 风暴后侧干空气夹卷进入风暴系统, 通过动量下传和相变冷却可增加地面大风强度 (马淑萍等, 2019; 王易等, 2022); 强雷暴高压形成的冷池密度流也可产生致灾大风 (王秀明等, 2013; 周后福等, 2017; 盛杰等, 2019), 而极端强风的发生往往是多种因子的叠加效应 (盛杰等, 2019; 郭飞燕等, 2024)。

下击暴流生消迅速、空间尺度小, 精细化预报预警难度极大, 多普勒天气雷达的组网建设为我国开展下击暴流观测和研究提供了条件。下击暴流的风暴结构复杂多样, 从孤立的脉冲风暴到高度组织化的超级单体风暴, 从多单体强风暴到飑线等 (郭飞燕等, 2024)。利用多普勒天气雷达, 国内外学者总结出一系列下击暴流风暴特征: 如反射率因子上有比其它单体更高的核心高度、反射率因子核迅速下降、反射率槽口等, 径向速度上表现为中层径向辐合、底层强辐散等 (Roberts and Wilson, 1989; Eilts et al., 1996; 俞小鼎等, 2006b)。俞小鼎等 (2006b) 研究认为, 反射率因子核心逐渐降低伴随云底以上径向速度辐合的雷达回波特征可以提前数分钟预警下击暴流的发生, 禹梁玉等 (2021) 、王一童等 (2022)、王易等 (2022) 将反射率因子核心高度下降、垂直积分液态水含量值下降、中层径向辐合等雷达回波特征作为下击暴流产生地面大风的预警指标, 可提前 20~30 min 预警下击暴流的发生。

不同的背景环境造成不一样的风暴组织结构, 从而表现出不一样的下击暴流雷达回波特征。深入研究下击暴流形成的环境条件、发生机理和雷达特征, 不仅有助于加深对下击暴流的认识, 而且能为开展下击暴流致灾雷暴大风的预报预警提供重要参考依据。王易等 (2022) 利用江苏 19 个典型过程统计了孤立风暴型和飑线镶嵌型下击暴流的环境特征差异以及下击暴流各阶段雷达回波特征, 除此之外, 上述研究大多是对单个个例的研究或对不同类型强风天气的对比分析, 对浙江地区下击暴流的对比分析尤为少见。

宁波地处中国东部沿海, 春夏之际强对流造成的致灾性雷暴大风发生频繁, 但是下击暴流鲜有记录。2022 年 7 月 12 日和 7 月 17 日宁波接连出现了两次下击暴流过程, 均造成不同程度的灾害损失, 7 月 12 日宁波局地风力达到 13 级 (以下简称“7·12”过程), 7 月 17 日局地风力达 11~12 级 (以下简称“7·17”过程), 灾害调查和初步分析表明它们都是由下击暴流造成的。两次下击暴流过程的天气形势不同, 但是都出现了 12 级及以上雷暴大风, 故不同天气形势下, 两次下击暴流产生的背景环境、雷达回波特征是否存在差异, 是本文研究的重点。利用浙江省加密自动站观测、高空观测等资料、宁波和舟山两部 S 波段多普勒雷达资料, 对比分析这两次过程发生的环境背景和雷达演变特征, 以期发掘更有效的潜势预报参数和本地化临近预警指标, 提高预报员对下击暴流的预报预警能力。

1　资料与实况

1.1　资料来源

本文的研究资料包括: (1) 浙江省气象信息网络中心提供的地面观测资料, 包括浙江省加密自动气象观测站逐 1 min观测资料和逐 1 h 观测资料, 用于天气实况分析、气象要素演变分析等。 (2) 浙江省气

象信息网络中心提供的高空探测资料，探空站观测通常可代表站点周边 100~200 km 之内的大气状况，选取 7 月 12 日 08 时和 17 日 08 时杭州探空资料开展环境条件对比，该站距“7·12”过程下击暴流发生地约 140 km，距离“7·17”过程下击暴流发生地 150 km。(3) 宁波市气象局提供的多普勒雷达资料，用于雷达回波特征分析。采用宁波和舟山两部 CINRAD-SA 多普勒天气雷达资料，布设高度分别为 454 m 和 435 m，“7·12”过程和“7·17”过程下击暴流发生地距离宁波雷达站分别为 30 km 和 61.5 km，最低仰角高度分别为 0.7 km 和1.0 km；距离舟山雷达站分别为 66 km 和 85 km，最低仰角高度分别为 1.0 km 和 1.2 km。(4) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的第五代全球大气 ERA5再分析资料，空间分辨率 0.25°×0.25°、时间分辨率1 h，用于环流背景分析。

1.2 天气实况

2022 年 7 月 12 日 14:00—18:00 (北京时，下同)，浙江东部出现分散性强对流，以雷暴大风、短时强降水为主，局地伴有直径 10 mm 左右冰雹。共有 65 个测站出现 8 级 (17.2 m·s^{-1}) 以上雷暴大风，主要集中在宁波和台州附近 (图 1a)，宁波地区有 4 个站风力达 10 级 (24.5 m·s^{-1}) 及以上，其中宁波鄞州气象观测站于 14:51 测得 37.9 m·s^{-1} (13 级) 大风 (图 1c)。现场灾调显示，大风造成鄞州站观测场围栏和附近树木倒伏，观测场视频记录可见直线型大风。

7 月 17 日中午，江苏南部、安徽南部和浙江不断有对流单体生成东移，给上述地区带来雷雨大风和短时强降水天气，浙江共 413 个测站出现 8 级以上雷暴大风，其中 10 级以上雷暴大风 33 站，主要集中在浙江东北部沿海 (图 1b)。影响宁波的强对流分为两个阶段，第一阶段 12:00—14:00，本地生成的对流单体给宁波带来 8 级、局地 11~12 级雷暴大风和短时强降水，象山港翡翠湾附近发生下击暴流，栖凤站 12:35 测得 30.1 m·s^{-1} (11 级) 大风，塘头站 12:40 测得 33.7 m·s^{-1} (12 级) 大风 (图 1d)。现场灾调显示，翡翠湾为开阔海湾，下击暴流强风掀翻岸边一排房屋的瓦片，同时造成多只渔船受损，其中一艘停靠在码头的休闲渔船被吹翻、引桥被吹断，造成严重人员伤亡。第二阶段 (图略)，浙江西北部生成的对流单体东移，17:00 移至浙江东部发展成线状对流，影响宁

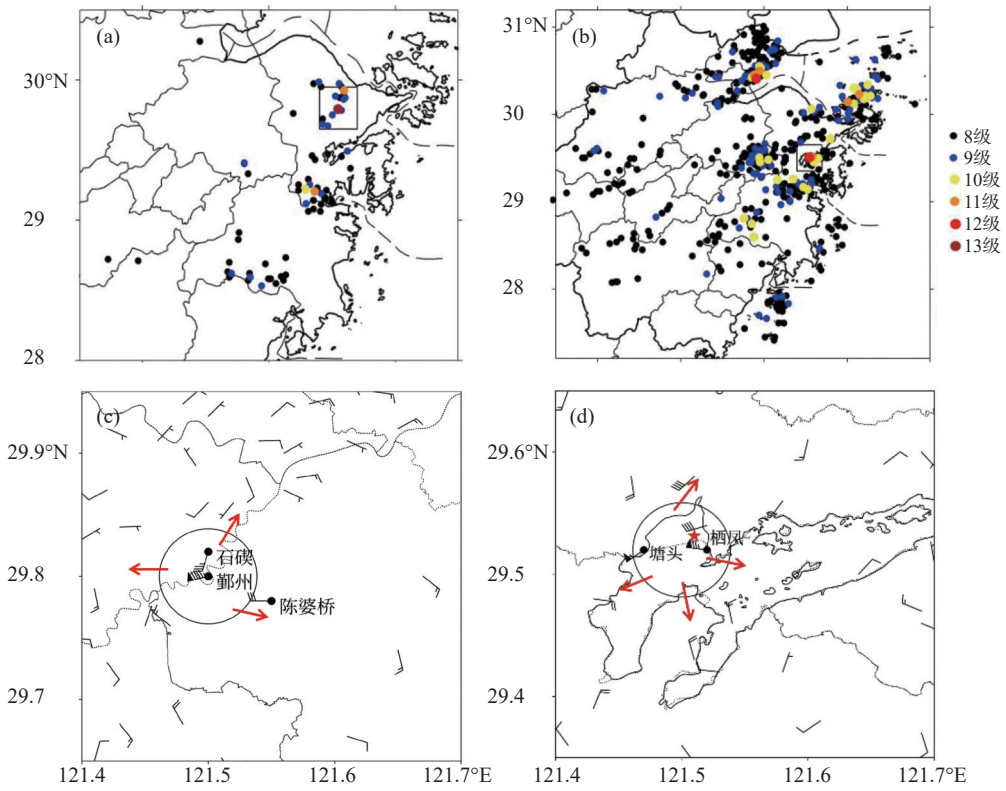


图 1 2022 年 7 月 12 日 12:00—20:00 (a) 和 7 月 17 日 12:00—20:00 (b) 8 级以上极大风分布，7 月 12 日 14:51 (c) 和 7 月 17 日 12:35 (d) 瞬时极大风分布 (图 a 和图 b 中黑色方框分别为图 c 和图 d 范围，图 d 中的红五角星为渔船倾覆发生地，图 c 和图 d 圆圈半径 4 km，红色箭头为辐散方向)

Fig. 1 Spatial distributions of the extreme winds from (a) 12:00 BT to 20:00 BT on 12 July 2022, (b) 12:00 BT to 20:00 BT on 17 July 2022, and the instantaneous winds at (c) 14:51 BT on July 12 and (d) 12:35 BT on July 12 (The black boxes indicate the area shown in panel fig. 1c and panel fig. 1d, respectively. The circle radius in panels fig. 1c and fig. 1d indicates a horizontal range of 4 km, and the red arrows are divergence directions)

波到温州北部, 浙江大部分地区出现 8~10 级雷雨大风。

综上, “7·12”过程以分散性强对流天气为主, 雷暴大风强度更强、局地性特征显著, 而“7·17”过程为系统性强对流天气, 雷暴大风影响范围更大。

1.3 地面气象要素演变分析

选择“7·12”过程中下击暴流发生地附近风力最大的鄞州站、“7·17”过程距离翡翠湾事故点最近的栖凤站 (距事故地东侧 0.6 km) 和塘头站 (距事故点西侧 3.9 km), 分析两次下击暴流过程中逐分钟气象要素的变化 (图 2)。鄞州站因为气象要素的分钟跳变超过气候统计阈值, 被自动质控, 故在 14:51—14:53 出现温度缺测, 14:52 出现气压缺测, 图 2a 中将缺测数据作线性插值处理, 并标为黑色, 不代表真实数值。

从图 2 可见, 两次过程气象要素都出现风速突增、风向突变、气压涌升和气温骤降等特征。“7·12”过程中鄞州站受下击暴流的影响时段为 14:50—14:54, 大风持续约 5 min, 风速在 2 min 内由 9.2 m·s^{-1} (14:49) 突增至 37.9 m·s^{-1} (13 级, 14:51), 风向由西南转为西北; 气压在 3 min 内 (14:51—14:54) 涌升了 3.2 hPa; 气温从 33 ℃ (14:49) 骤降至 27 ℃ (14:54), 15:00 的 1 h 变温达−13.5 ℃ (图 2a)。“7·17”过程中栖凤和塘头站受下击暴流影响时段为 12:25—13:00, 持续 35 min。栖凤站 12:24 之前风速较小, 为 2~8 m·s^{-1}, 12:25 起 10 min 左右风速逐渐增大到 30.1 m·s^{-1} (11 级, 12:35), 至 13:00 一直维持在 8~10 级; 期间气温骤降, 13:00 的 1 h 变温 8.8 ℃ (图 2b); 风向由偏南转为偏西, 顺转 90°。塘头站 12:25 起风力增大到 8 级以上, 此后出现多次起伏突变, 其中, 12:35—12:42 最为显著, 风速由 28.9 m·s^{-1} (11 级, 12:36) 1 min 内骤降至 6.1 m·s^{-1}, 然后由 4.9 m·s^{-1} (12:39) 突增加到 33.7 m·s^{-1} (12 级, 12:40); 风向顺时针旋转约 360°; 13:00 的 1 h 变温−13.1 ℃ (图 2c)。塘头站气压在 12:20—12:32 陡升了 4.5 hPa (图 2c)。塘头站气象要素变化比栖凤站更显著, 这是因为塘头站位于下击暴流风暴中心附近, 而栖凤站位于风暴东侧边缘, 但是栖凤站 10 级及以上大风持续时间更长, 12:30—12:37、12:47—12:48 共 10 min 测得 10 级及以上大风, 塘头站只出现 2 min。

两次下击暴流地面风场均呈现局地性和辐散特征。“7·12”过程下击暴流影响期间, 鄞州站北侧 2.2 km 的石碶站出现不足 7 级 (15.6 m·s^{-1}, 14:52) 的西南偏南风, 东侧 5.3 km 的陈婆渡站出现 8 级 (17.3 m·s^{-1}, 14:55) 西北风, 风场呈辐散特征 (图 1c)。根据 8 级以上大风影响范围和持续时间, 可见“7·12”下击暴流影响半径 4 km 左右, 影响时间 10 min 以内, 属于微下击暴流。“7·17”过程中, 翡翠湾北岸测站为偏南风, 东岸测站为西风, 南侧测站为西北风, 表现为辐散特征 (图 1d), 根据翡翠湾周边区域出现 8 级及以上大风的范围和持续时间来判断, 下击暴流大风影响半径 6~8 km, 持续时间 35 min 左右, 属于宏下击暴流。

2 天气形势和环境条件对比

2.1 天气形势对比

7 月 12 日 08 时长江中下游到华南地区均处于西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 的控制下, 500 hPa 高空浙江位于副高脊线南侧的弱偏东气流中, 低层西南风, 风速小 (图 3a), 0—3 km 和 0—6 km 的垂直风切变 (SHR3 和 SHR6) 均≤5 m·s^{-1}。热力场上, 低层高温高湿, 850 hPa 气温大于 24 ℃, 比湿大于 16 g·kg^{-1}, 500 hPa 在安徽南部、江西北部和浙江西部有小范围−4 ℃ 以下低值区, 表明有冷空气渗透, 增加了大气层结的不稳定性; 探空显示, 850 hPa 与 500 hPa 温差 ($T_{850\text{-}500}$) 大于 26 ℃ 的区域覆盖浙江, 杭州探空站 $T_{850\text{-}500}$ 达 26.4 ℃ (表 1), 较大的温度垂直递减率是对流发生和加强的有利条件。

7 月 17 日 08 时副高控制华南沿海, 中纬度 500 hPa 有高空槽东移, 浙江处于 500 hPa 高空槽前和副高北侧的偏西气流中 (图 3b),高空槽线呈前倾结构, 构成了“上干冷、下暖湿”的不稳定层结。对比两次过程杭州站探空 (表 1), 17 日 08 时 $T_{850\text{-}500}$ 为 23.8 ℃, 比“7·12”过程偏小 2.6 ℃; SHR3 和 SHR6 分别为 8 m·s^{-1} 和 10 m·s^{-1}, 比“7·12”过程略大。“7·17”过程的天气尺度强迫比“7·12”更明显。

综上, “7·12”过程发生在弱强迫和弱垂直风切变背景下, 副高控制不利于强对流发展, 但是较好的热力抬升条件和中层弱冷空气渗透形成了有利的不稳定层结, 在一定的触发条件下产生剧烈强对流。“7·17”过程热力抬升作用弱, 但高空槽的动力强迫明显, “上干冷、下暖湿”的垂直结构配合中等强度的垂直风切变, 更有利于风暴的组织化发展和雷暴大风的产生。

2.2 环境条件对比分析

选取杭州站探空资料, 通过动力、热力等特征参数对比, 分析“7·12”和“7·17”过程的大气环境条件 (表 1)。12 日 08 时和 17 日 08 时, 杭州站对流有效位能 (CAPE) 都大于 2 000 J·kg^{-1}, 对流抑制能量 (CIN) 均较小, 抬升指数 (LI) 低于−4 ℃, 抬升凝结高度 600 m 左右, 都有利于对流的发生。探空曲线上 (图 4), 两次过程都呈上干下湿的结构, 中层有明显的

干层, 800 hPa 以下平均比湿都在 16 g·kg^{-1} 及以上, 表明低层有充沛的水汽条件。12 日干层位于 500—300 hPa 之间 (图 4a), 干层的平均温度露点差为 14.7 ℃, 17 日干层在 650—500 hPa 之间 (图 4b), 干层的平均温度露点差 9.1 ℃。12 日干层比 17 日的干层高度更高、厚度更厚、强度更强。800 hPa 以下平均比湿 18 g·kg^{-1}。12 日探空反映出强热力不稳定、弱垂直风切变、低层较深厚湿层和较低的自由对流高度, 符合脉冲风暴发展的有利条件 (孙继松等, 2014)。两次过程 0—3 km 温度垂直递减率 ($\gamma_{0\text{-}3}$) 大, 分别为 6.5 ℃·km^{-1} 和 6.8 ℃·km^{-1}。在有利的热力不稳定和大气层结条件下, 中层干空气卷入是两次过程产生极端大风的最主要原因, 低层较大的温度垂直递减率也是雷暴大风产生的有利因素之一。中层干空气卷入, 促使降水粒子相变降温, 降温效应增强气块负浮力和下沉运动, 低层温度垂直递减率越大, 下沉气流

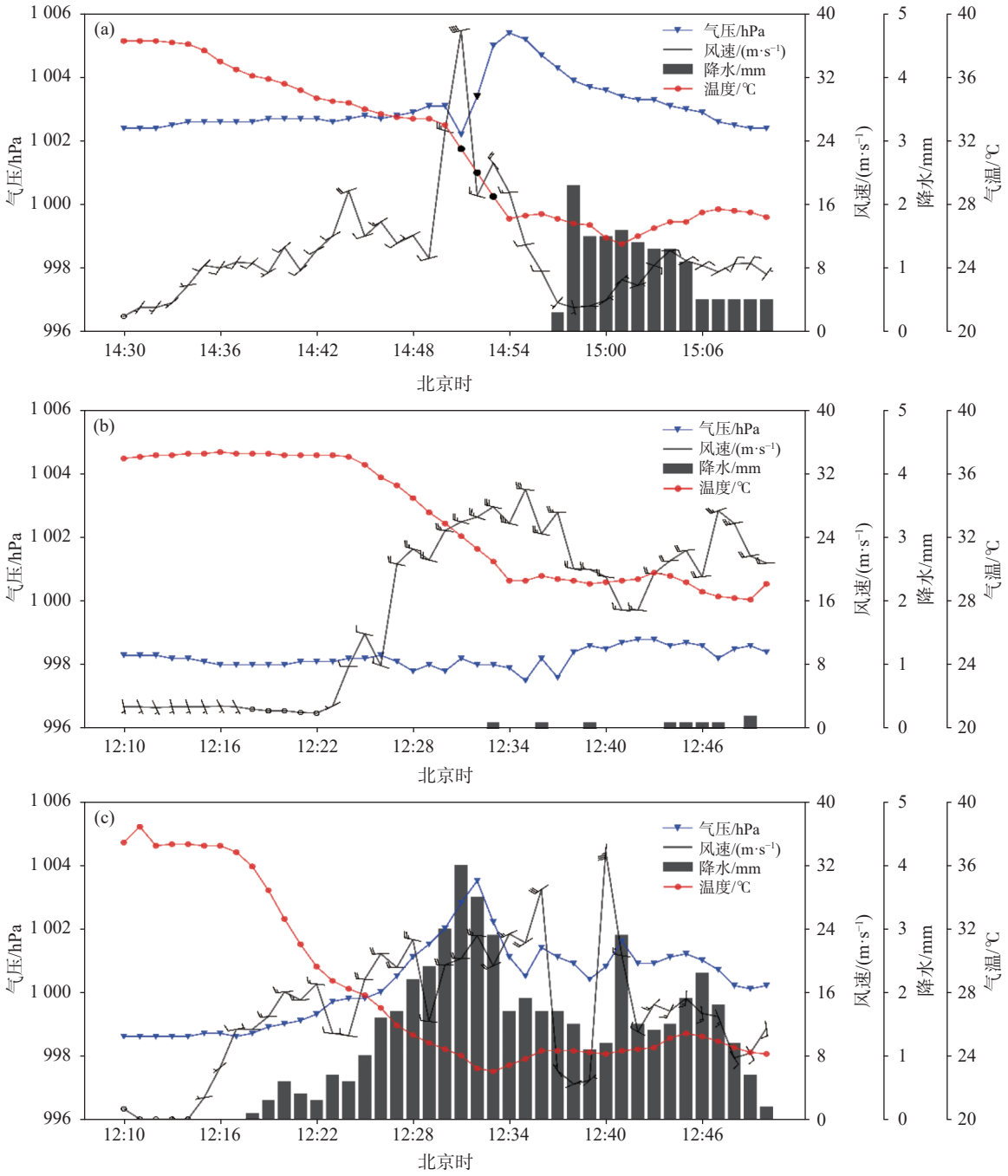


图 2 2022 年 7 月 12 日 14:30—15:10 鄞州站 (a)、7 月 17 日 12:10—12:50 栖凤站 (b) 和塘头站 (c) 风速、气压、气温和降水的时序图

Fig. 2 The variation of wind velocity, pressure, temperature, and rainfall at (a) Yinzhou station from 14:30 BT to 15:10 BT on 12 July, (b) Qifeng station and (c) Tangtou station from 12:10 BT to 12:50 BT on 17 July 2022

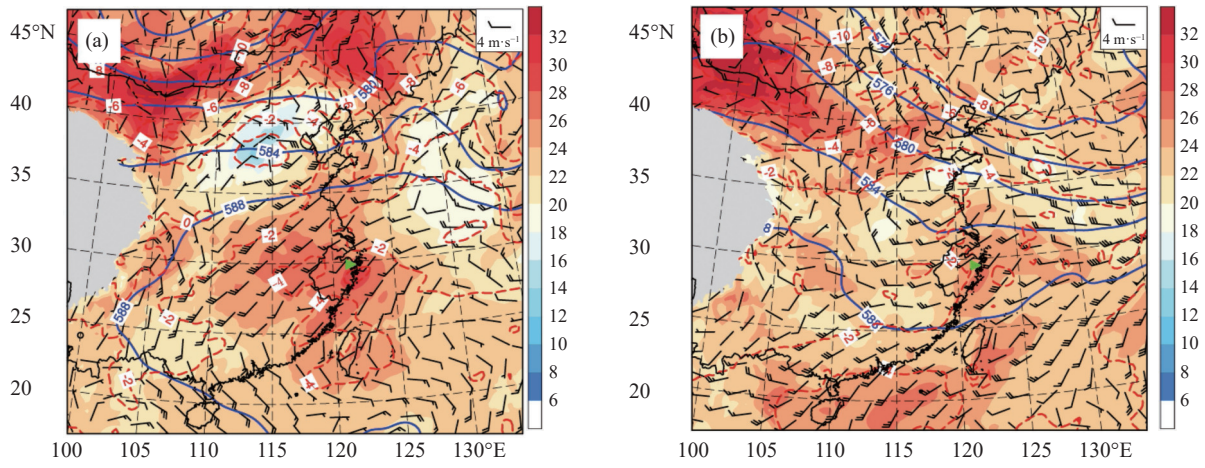


图 3 2022 年 7 月 12 日 08 时 (a) 和 17 日 08 时 (b) ERA5 客观分析 500 hPa 高度场 (蓝实线, 单位: dagpm)、500 hPa 温度场 (红色虚线, 单位: ℃)、850 hPa 风场 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 和 850 hPa 与 500 hPa 温差 $T_{850\text{-}500}$ (填色, 单位: ℃)
(绿色三角形为两次下击暴流发生地点)

Fig. 3 The 500 hPa height field (blue solid line, unit: dagpm), 500 hPa temperature field (red dashed line, unit: ℃), 850 hPa wind field (barb, unit: m·s^{-1}) and temperature difference field between 850 hPa and 500 hPa (filled color, unit: ℃) at (a) 08:00 BT on July 12 and (b) 08:00 BT on 17 July 2022
(The green triangle is the location of two downburst events)

表 1 2022 年 7 月 12 日 08:00 和 7 月 17 日 08:00 杭州站环境参数

Table 1 Environmental parameters of Hangzhou station at 8:00 BT on 12 and 17 July 2022

日期	CAPE/ (J·kg^{-1})	CIN/ (J·kg^{-1})	LI/ ℃	*K*/ ℃	SHR3/ (m·s^{-1})	SHR6/ (m·s^{-1})	$\gamma_{0\text{-}3}$/ (℃·km^{-1})	$T_{850\text{-}500}$/ ℃	DCAPE/ (J·kg^{-1})	IWINDEX/ (m·s^{-1})	IHMI	IMDPI	SWEAT
12日	2 981	132	−6	40	5	3	6.5	26.4	1 436	28.5	4.3	1.1	275
17日	2 144	91	−4	41	8	10	6.8	23.8	1 057	22.4	8.1	1.2	314

注: CAPE为对流有效位能; CIN为对流抑制能量; LI为抬升指数; SHR3为0~3 km垂直风切变; SHR6为0~6 km垂直风切变; $\gamma_{0\text{-}3}$为0~3 km垂直温度递减率; DCAPE为下沉对流有效位能; IWINDEX为大风指数; IHMI 为混合微下击暴流指数; IMDPI为微下击暴流日潜势指数; SWEAT为强天气威胁指数。

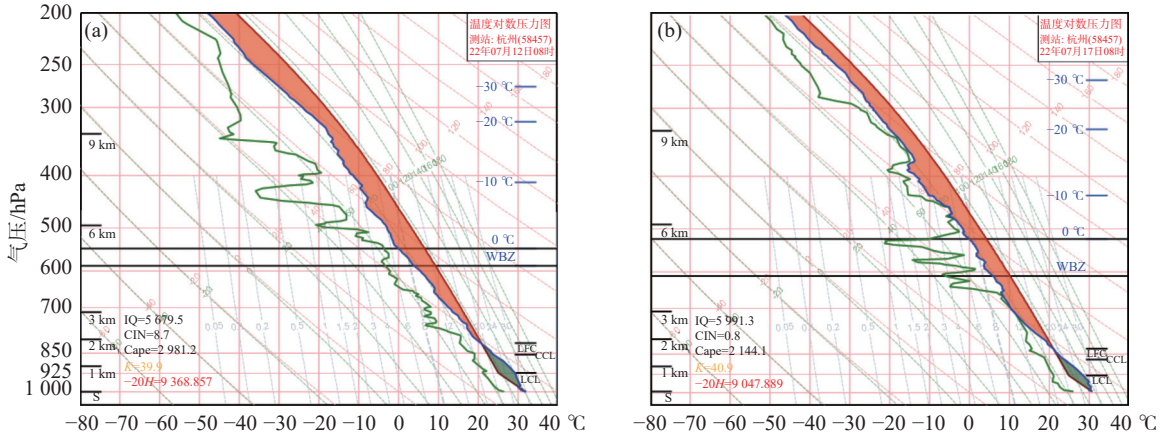


图 4 2022 年 7 月 12 日 08:00 (a) 和 7 月 17 日 08:00 (b) 杭州站探空图

Fig. 4 Sounding chart at Hangzhou station at (a) 08:00 BT on July 12 and (b) 08:00 BT on 17 July 2022

受到的负浮力越大, 可获得的向下加速度更大, 再叠加降水物的拖曳作用, 形成强烈的下击暴流, 造成近地面大风 (孙继松等, 2014; 盛杰等, 2019)。

下沉对流有效位能 (DCAPE, 记为D_{CAPE}) 是雷暴大风潜势预报中最常用的热力参数之一 (郑永光等, 2017; 方翀等, 2017), 反映干空气侵入后因蒸发冷却作用下沉到地面的最大位能。大风指数 (IWINDEX, 记为I_{WINDEX}) 在北京、杭州等地的潜势预报中表现出较好的应用效果 (廖晓农等, 2009; 樊李苗和俞小鼎, 2020), 它与层结状态和垂直温度递减率有关 (Mccann, 1994)。此外, 混合微下击暴流指数 (IHMI, 记为I_{HMI}) (Pryor, 2006)、微下击暴流日潜势指数 (IMDPI , 记为I_{MDPI}) (Wheeler, 1996) 等也在下击暴流潜势预报中得到越来越多应用。IHMI 可衡量干和湿混合型微下

击暴流的有利的条件, IMDPI 是假相当位温 (θ_{se}) 的函数。本文分析了上述 4 个雷暴大风指数。计算公式如下

$$D_{\text{cape}} = \int_{p_i}^{p_n} R_{\text{d}}(T_{\text{e}} - T_{\text{p}})\text{d}\ln p \tag{1}$$

$$I_{\text{WINDEX}} = 5[H_{\text{M}} R_{\text{Q}}(\Gamma^2 - 30 + Q_{\text{L}} - 2Q_{\text{M}})]^{0.5} \tag{2}$$

$$I_{\text{HMI}} = \Gamma + (T - T_d)_{850} - (T - T_d)_{670} \tag{3}$$

$$I_{\text{MDPI}} = \frac{\text{Max}[\theta_{\text{se}(s-850)}] - \text{Min}[\theta_{\text{se}(600-500)}]}{C} \tag{4}$$

式 (1) 中, T_{e}和T_{p}分别代表环境和下沉气块温度, p_{i}表示下沉气块起始处气压, 取 700 hPa 和 400 hPa 相当位温或 θ_{se} 极小值出现的高度气压; p_{n}表示下沉气块达到中性浮力层或地面时的气压。式 (2) 中, H_{M}为 0 ℃ 层距离地面高度 (km); Q_{M}表示 0 ℃ 层处混合比 (g·kg^{-1}); Γ为地面与 0 ℃ 层之间的温度直减率 (℃·km^{-1}); Q_{L}为近地面 1 km 层厚度内的平均混合比 (g·kg^{-1}); $R_{\text{Q}} = Q_{\text{L}}/12$, 不能大于 1 g·kg^{-1}; IWINDEX 以 knot 为单位, 1 knot=0.514 m·s^{-1}。式 (3) 中, Γ是 850 hPa 与 670 hPa 的温度直减率 (℃·km^{-1}); T和T_d分别是温度和露点 (℃),850 和 670 为气压层。式 (4) 中, θ_{se}为假相当位温, s 代表地面,分子表示地面到 850 hPa 最大 θ_{se}与 660 到 500 hPa 之间最小 θ_{se}差, Max、Min 分别代表取其中最大、最小值, C为常数, 取 15.5 m·s^{-1}。

根据杭州探空和公式 (1)—(4), 得到“7·12”和“7·17”两次过程中四个参数见表 1。两次下击暴流过程D_{CAPE}分别为 1 436 J·kg^{-1} 和 1 057 J·kg^{-1}, 与已有研究对比 (方翀等, 2017; 樊李苗和俞小鼎, 2020), 下沉运动动能大, 有利于产生雷暴大风。IWINDEX 分别是 28.5 m·s^{-1} (10 级) 和 22.4 m·s^{-1} (9 级), 与樊李苗和俞晓鼎 (2020) 得到的杭州 79% 午后雷暴大风个例 IWINDEX 在 8 级风以上的结论吻合。IHMI 分别为 4.3 和 8.1, 根据 IHMI 的风险等级 (Pryor, 2006): <8 为不可能, [8,24]之间为有可能, >24 为高风险, 该参数对“7·12”过程参考价值小, 但是对“7·17”过程有指示意义。IMDPI 为 1.1 和 1.2, IMDPI≥1 预示发生微下击暴流的可能, 值越大表示上下两层的 θ_{se} 差越大, 相对干冷的环境空气对发展中下击暴流的影响就越大, IMDPI 在两次过程中都指示了下击暴流的可能。此外, 强天气威胁指数 (SWEAT) 分别是 275 和 314, 达到或超过浙江雷暴大风发生的临界值 (275) (赵放等, 2020)。可见, 除了 IHMI 在“7·12”过程中参考性差外, 其余参数都表现为有利条件, IWINDEX 预报出 10 级和 9 级大风的潜势。

比较两次过程, 虽然 12 日动力条件较弱, 但是比 17 日具有更高的能量、更好的低层水汽和更强的高空干层条件, 这可能是 12 日实况监测到更强风力的主要原因。

2.3 触发条件对比分析

7 月 12 日上午 10 时起, 宁波中部近地面出现海陆风辐合线 (图 5a), 午后气温达到 38~40 ℃, 海陆风辐合线附近有西北向东南方向伸展的暖舌, 水汽、热力条件好, 13:30—14:00 在辐合线和暖舌西侧有对流单体生成发展。海陆风辐合和热力抬升是“7·12”过程的主要触发条件。

“7·17”过程发生前, 来自西部山区的西风、来自三门湾的南风以及象山港的东南风, 在事发地上游形成地面风场辐合 (图 5b)。12 时宁波气温升至 38 ℃ 以上, 热力抬升作用显著, 加上高空槽前的动力降压, 在西部山区触发多个风暴单体, 风暴单体东移至辐合区附近时迅速合并加强, 产生下击暴流。

3 多普勒雷达回波特征对比

3.1 “7·12”过程雷达回波演变特征

雷达监测显示, 7 月 12 日 13:30 宁波西部有一个对流单体生成 (1 号单体, 图略), 在发展过程中缓慢东移, 给周边地区带来 8~9 级大风。14:15 在 1 号单体移动方向左前侧 10 km 处, 有一个脉冲风暴 (2 号单体) 快速发展 (图 6a), 给附近地区带来 9 级大风。14:28 在 2 号脉冲风暴左前侧 6 km 处的阵风锋上, 3 号脉冲风暴发展 (图 6c), 于 14:44—15:00 产生下击暴流, 给周边带来 9~13 级大风。14:44 在 3 号脉冲风暴左前方 5 km 的阵风锋上, 4 号脉冲风暴生成 (图 6e), 给周边带来 8~9 级大风。可见, “7·12”过程下击暴流由一系列孤立脉冲风暴造成, 脉冲风暴呈现前向传播特征, 阵风锋的形成和向东推进, 是新单体不断触发并迅速发展的重要因素。

“7·12”过程中鄞州站 13 级大风由 3 号脉冲风暴造成, 该单体从生成到减弱消散, 生命史 36 min, 回波演变可分为三个阶段:14:40 之前发展阶段, 14:40—14:46 强盛阶段, 14:46 之后减弱到消亡阶段。发展阶段脉冲风暴由初生到强盛, 质心强度从 36.5 dBz 增强到 65 dBz, 质心高度由 8 km 下降至 5.8 km, 45 dBz 及以上回波的顶高 (简称 45 dBz 顶高) 伸展到 12.5 km (图 6h—j)。14:40—14:46 风暴发展到最强盛, 60 dBz 以上强回波范围达到最大, 单体内部有南北两个质心, 其中南侧质心强度达 62 dBz, 高度 8.5 km, 北侧质心强度 60 dBz, 高度 5 km 以下, 在剖面上回波呈

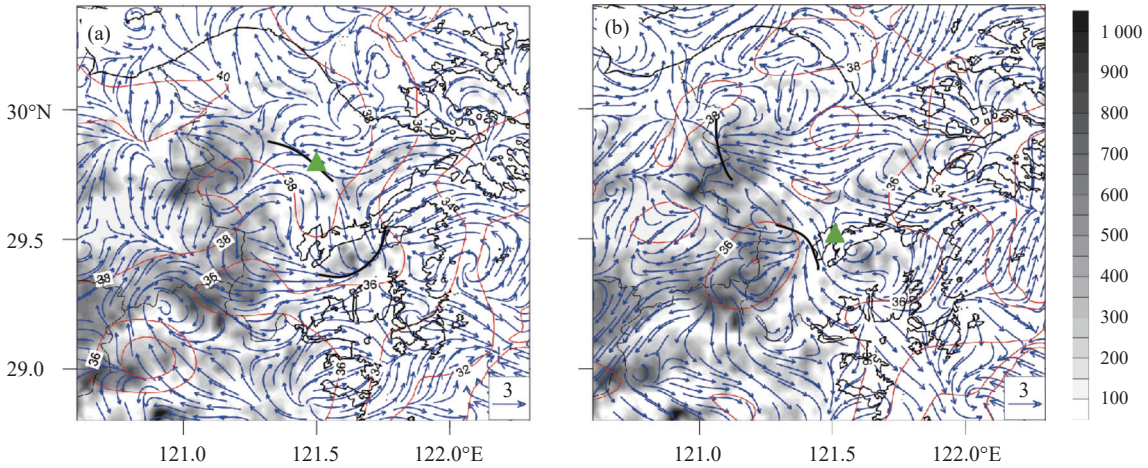


图 5 2022 年 7 月 12 日 14:00 (a) 和 7 月 17 日 12:00 (b) 地面流场 (蓝色箭头)、温度场 (红色实线) 和地形高度 (填色, 单位: m) (绿色三角形为两次下击暴流发生地点)

Fig. 5 Surface flow field (blue arrow), temperature field (red solid line), and terrain height (filled color, unit: mm) at (a) 14:00 BT on 12 July and (b) 12:00 BT on 17 July 2022 (The green triangle is the location of the two downburst events)

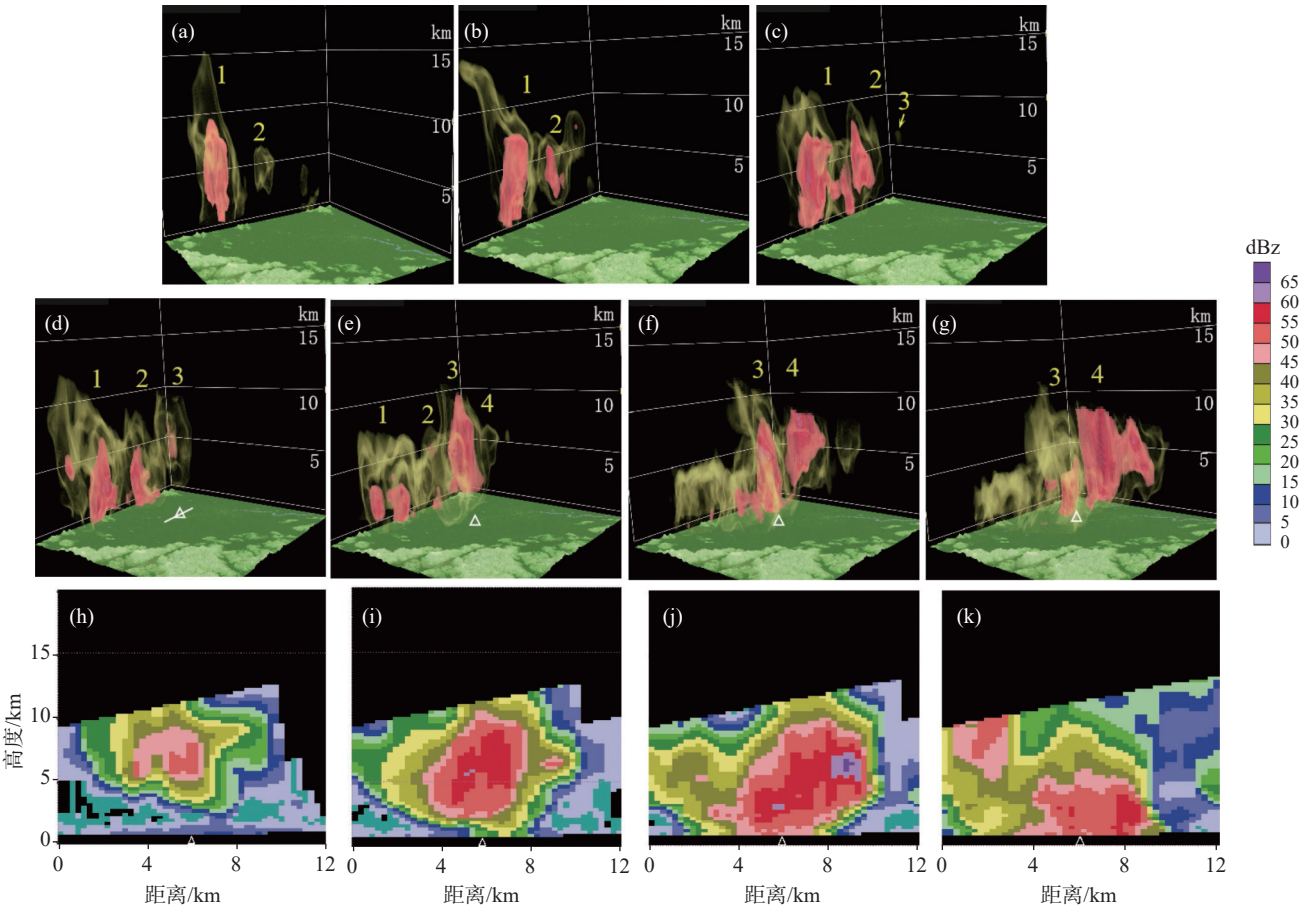


图 6 2022 年 7 月 12 日 14:15 (a)、14:22 (b)、14:28 (c)、14:34 (d)、14:40 (e)、14:46 (f)、14:52 (g) 宁波雷达反射率因子的三维演变, 14:34 (h)、14:40 (i)、14:46 (j)、14:52 (k) 反射率因子的垂直剖面 (图 a—g 的三维视角为东南方向, 白色三角形为鄞州站位置, 雷达站位于鄞州站北侧, 数字 1—4 为单体编号, 图 6d 中白色实线为图 6h—k 剖面位置, 剖面方面自北向南)

Fig. 6 Three-dimensional evolution of the radar reflectivity at (a) 14:15 BT, (b) 14:22 BT, (c) 14:28 BT, (d) 14:34 BT, (e) 14:40 BT, (f) 14:46 BT, (g) 14:52 BT on 12 July 2022 in Ningbo, and cross sections of reflectivity at (h) 14:34 BT, (i) 14:40 BT, (j) 14:46 BT, (k) 14:52 BT on 12 July 2022 (The three-dimensional view in panels Fig. 6a to Fig. 6g is from the southeast. The white triangles are the location of Yinzhou station. The Ningbo radar station is located north of Yinzhou station. Numbers 1 to 4 are the cell number. The white solid line in panel Fig. 6d is the vertical profile location shown in panels Fig. 6h to Fig. 6k, with the profile direction from north to south)

现倾斜结构 (图 6j)。减弱阶段脉冲风暴质心强度减弱, 强回波 (60 dBz 及以上) 范围减小, 同时伴随质心高度下降和 45 dBz 回波顶坍塌现象, 质心高度从 6.5 km 迅速下降到最低仰角高度 (1 km) (图 6k), 45 dBz 顶高也由 10 km 降至 4.2 km (图 8a)。脉冲风暴减弱阶段对应着下击暴流影响时段, 14:49—14:52 鄞州站地面风速激增, 由 9.2 m·s^{-1} 跃增至 37.9 m·s^{-1}, 这期间 3 号脉冲风暴质心高度和 45 dBz 顶高下降速度分别达 13.8 m·s^{-1} 和 22.2 m·s^{-1}。

“7·12”过程的径向速度场分析表明, 在 3 号脉冲风暴发展阶段呈现低层弱辐合高层明显辐散特征 (图略), 表明风暴中上升气流主导; 从风暴最强盛到减弱阶段, 1.5—5 km 的中层出现明显径向辐合 (图 9a), 正负速度中心分别为 7.5 m·s^{-1} 和-25 m·s^{-1}, 强烈的下沉气流表征下击暴流的发生。

3.2 “7·17”过程雷达回波演变特征

“7·17”过程的下击暴流由 4 个风暴单体合并加强为一个单体后产生。从 4 个风暴单体生成到合并后强单体消散, 生命史约 100 min, 回波演变可分三个阶段: 11:30—12:20 为发展阶段, 12:21—12:26 强盛阶段, 12:27—12:58 为减弱到消亡阶段。发展阶段, 在翡翠湾西部山区 4 个风暴单体生成, 单体最大中心强度 46 dBz。12:21 4 个单体移到地面辐合线附近 (图 5b), 合并为一个强单体 (图 7a), 其内部有南北两个中心, 此时北侧中心处于最强盛阶段, 质心强度达 60 dBz, 质心高度 5.5 km (图 7b 和图 8b), 南侧中心于 12:46 发展到最强盛, 质心强度 62 dBz,质心高度 6 km。12:27 风暴单体北侧质心高度开始降低 (图 7d), 下击暴流开始影响翡翠湾水域, 塘头站和栖凤站自 12:25 起风力相继增大到 8~10 级 (图 2b—c)。12:27—12:46 风暴单体北侧质心高度由 5.3 km 降至 3.4 km, 45 dBz 顶高则从 9.8 km 下降到 6 km, 北侧质心高度和 45 dBz 顶高最大下降速度达 3.0 m·s^{-1} 和 9.1 m·s^{-1}, 期间塘头站和栖凤站分别测得 33.7 m·s^{-1} 的偏南大风和 30.1 m·s^{-1} 的偏西大风。12:46—12:58 风暴单体南侧质心强度和质心高度下降, 下击暴流继续影响翡翠湾水域, 导致塘头站和栖凤站大风持续时间长达 35 min。

径向速度图上 (图 9c), 0.5°仰角于 12:21—12:46 在一片负速度中出现南北两个正速度区, 正速度区被零速度带包围, 北侧中心值在 6~12 m·s^{-1} 之间, 表明下击暴流发生时, 翡翠湾北部出现风场辐散, 南部为下击暴流辐散出流与环境风场的辐合区; 9.9°仰角于 12:27—12:52 在一片正速度场中出现负速度区, 垂直剖面图上无明显的中层径向辐合特征 (图 9d)。

3.3 两次过程雷达回波演变特征对比

比较可见, “7·12”过程的下击暴流强风由一系列孤立脉冲风暴产生, 这些脉冲风暴具有原地生消和

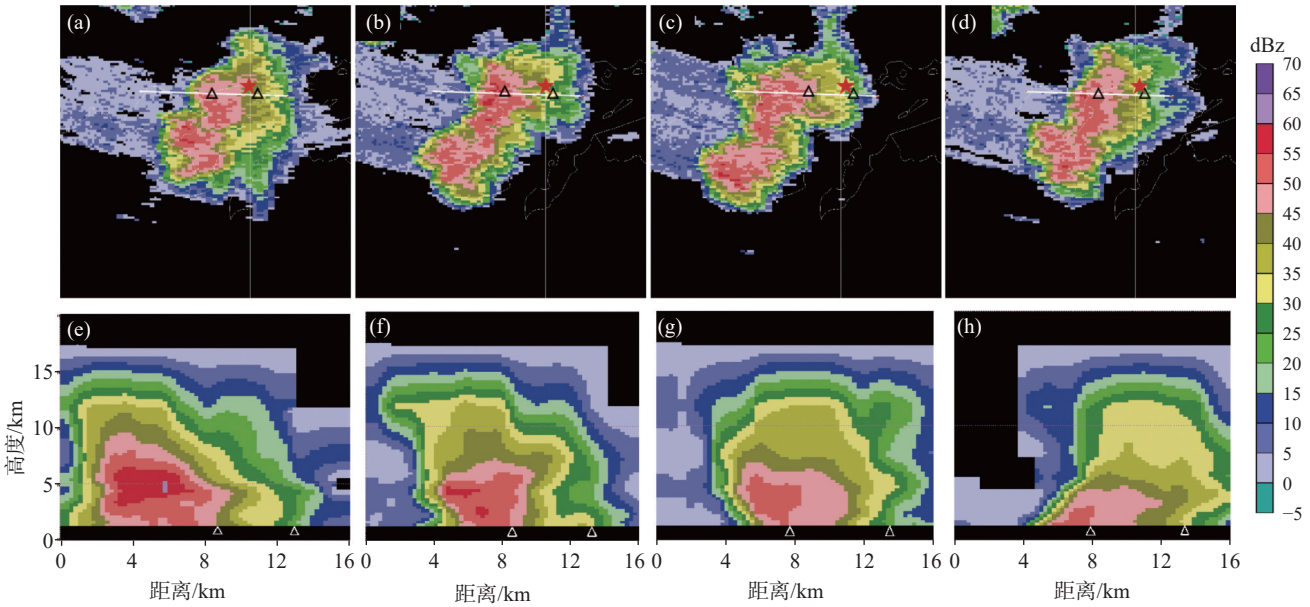


图 7 2022 年 7 月 17 日 12:21 (a, e)、12:27 (b, f)、12:33 (c, g)、12:39 (d, h) 宁波雷达 1.5°仰角雷达反射率因子 (a—d) 和垂直剖面 (e—h) (三角形为塘头站 (左) 和栖凤站 (右) 位置, 红色五角星为事故发生地, 图 a—d 中白色实线分别为图 e—h 的剖面位置, 剖面方面均为从左向右)

Fig. 7 (a-d) Radar reflectivity at 1.5° elevation and (e-h) cross sections from Ningbo radar at (a, e) 12:21 BT, (b, f) 12:27 BT, (c, g) 12:33 BT and (d, h) 12:39 BT on July 17, 2022 (The triangles are the locations of Tangtou station and Qifeng station. The red pentagram is the location where the boat capsized. The white solid lines in panels Fig. a to Fig. d are locations of cross-sections shown in panels Fig. e to Fig. f, with the section directions from left to right)

前向传播的特征, 其中产生 13 级强风的脉冲风暴尺度较小、生命史较短, 但初始回波高度高、质心强度强; “7·17”过程强风由多个风暴单体合并加强后产生, 合并后的风暴单体尺度较大, 影响范围大, 影响时间长。两次过程的雷达回波均出现质心强度和高度、45 dBz 顶高下降的特征, “7·12”过程质心高度和 45 dBz 顶高的下降速度比“7·17”过程更快, 相应的地面自动站测得的极大风更强。在径向速度上, “7·12”过程有明显中层径向辐合和风暴顶辐散, 与已有研究结果一致 (俞小鼎, 2006a; 李彩玲等, 2021), “7·17”过程仅表现为低层辐散。

“7·12”过程的中层径向辐合出现时间 (14:46) 比地面 8 级大风出现时间 (14:50) 早 4 min; 45 dBz 顶高下降、风暴质心强度和高度下降的开始时间 (分别为 14:43、14:49) 在地面出现 8 级风之前 1~7 min。而“7·17”过程中, 表征下击暴流的回波特征都滞后于地面 8 级风出现时间 (12:25), 其中风暴质心强度和高度、45 dBz 顶高的出现时间滞后 8 min, 低层辐散特

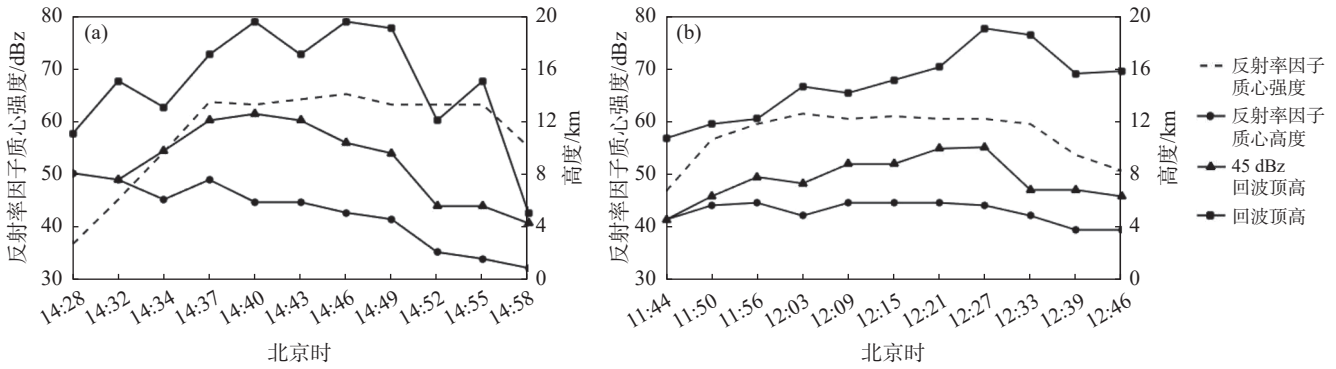


图 8 2022 年 7 月 12 日 3 号脉冲风暴 (a) 和 7 月 17 日对流单体 (b) 宁波和舟山雷达的反射率因子质心强度和高度以及不同回波顶高随时间演变图

Fig. 8 Evolution of reflectivity core intensity, height and different echo-top-height for (a) pulse storm No.3 on July 12 and (b) storm cell on 17 July 2022

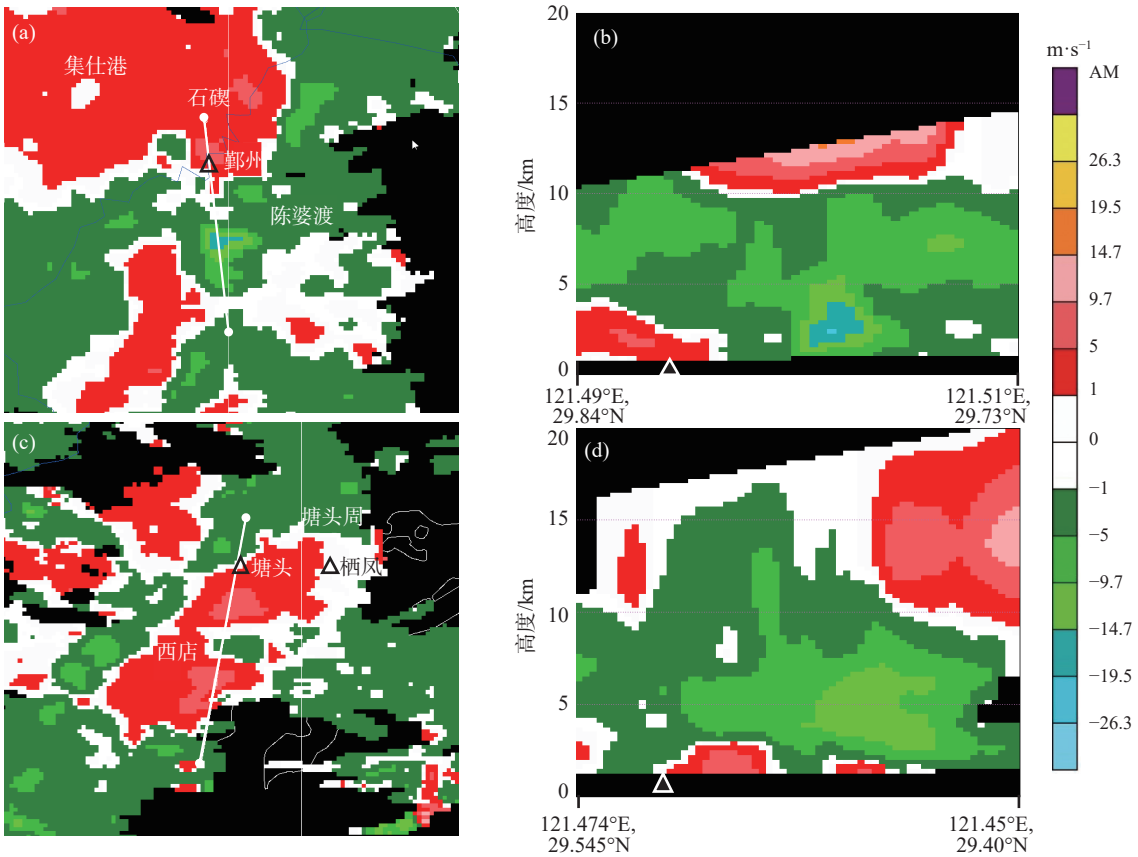


图 9 2022 年 7 月 12 日 14:52 2.4°仰角的径向速度 (a) 和垂直剖面 (b) 以及 7 月 17 日 12:27 0.5°仰角的径向速度 (c) 和垂直剖面 (d)

Fig. 9 (a) The radial velocity at 2.4° elevation, (b) cross-section from Ningbo Radar at 14:52 on July 12, (c) radial velocity at 0.5° elevation, and (d) cross-section at 12:27 on 17 July 2022

征出现时间滞后了 2 min，故此次过程雷达回波特征难以为大风预警提供有效参考。

4 结 论

本文使用多源观测资料，对比分析了 2022 年 7 月 12 日和 17 日两次下击暴流过程的环境条件、雷达回波演变特征，得到以下主要结论：

(1) 两次过程发生的环境条件差异在于，“7·12”过程发生在副高控制下的弱天气尺度系统强迫和弱垂直风切变背景中；“7·17”过程发生在前倾槽背景下的“上干冷、下暖湿”大气环境中，天气尺度系统强迫更为显著，低层垂直风切变中等，宁波的极端强风由本地生成的孤立对流系统所诱发。两次过程均存在中层干空气侵入和较高的 0—3 km 温度垂直递减率，“7·12”过程干层所在高度更高、强度更强，这是 12 日出现更强风力的主要原因。多个表征雷暴大风、下击暴流和强天气威胁的指数 (如 DCAPE、IWINDEX、IMDPI 和 SWEAT) 对这两次过程均有较好的指示意义，在潜势预报阶段可为预报员提供有价值参考。

(2) 两次过程中产生极端强风的风暴单体及演变不同。“7·12”过程中孤立的风暴单体产生阵风锋，阵风锋在移动过程中触发一系列脉冲风暴，导致系列微下击暴流。“7·12”过程的 13 级大风为脉冲风暴所致，该脉冲风暴具有生命史较短、影响范围小、原地生消的特征。“7·17”过程中多单体风暴在移动过程中合并加强为强风暴，其引发的宏下击暴流持续时间更长，影响范围比“7·12”过程更广。

(3) 两次过程雷达回波均出现质心强度和高度下降、45 dBz 回波顶坍塌现象，与“7·17”过程相比，“7·12”过程脉冲风暴的回波初始高度更高，质心高度和 45 dBz 顶高的下降速度更快，达到 13.8 $m\cdot s^{-1}$ 和 22.2 $m\cdot s^{-1}$，地面自动站测得的极大风也更强；“7·12”过程有明显中层径向辐合和风暴顶辐散，“7·17”过程仅表现出低层辐散。“7·12”过程中质心强度和高度下降、45 dBz 回波顶坍塌等回波特征出现时间早于地面 8 级风 1~7 min，而“7·17”过程中上述回波特征的出现时间滞后于地面 8 级风 2~8 min，若据此开展临近预警，存在预警时效性不足、防御时间窗太短等问题，因此潜势阶段雷暴大风预报仍是致灾性下击暴流预警的重要支撑依据。

参考文献 (References)：

刁秀广,赵振东,高慧君,等.2011.三次下击暴流雷达回波特征分析[J].气象,37(5):522−531. Diao X G, Zhao Z D, Gao H J, et al. 2011. Doppler radar echo features of three downbursts [J]. Meteorological Monthly,37(5):522−531 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.5.002

樊李苗,俞小鼎.2020.杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J].气象,46(12):1621−1632. Fan L M, Yu X D. 2020. Analysis on the environment conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou [J]. Meteorological Monthly,46(12):1621−1632 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.12.009

方翀,王西贵,盛杰,等.2017.华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J].高原气象,36(5):1368−1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al. 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics [J]. Plateau Meteorology,36(5):1368−1385 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00083

郭飞燕,丁锋,褚颖佳,等.2024.两次强下击暴流致灾大风过程对比[J].应用气象学报,35(5):590−605. Guo F Y, Ding F, Zhu Y J, et al. 2024. Comparison of two damaging wind events cased by strong downbursts [J]. Journal Applied Meteorological Science,35(5):590−605 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20240507

李彩玲,蔡康龙,黄先香,等.2021.桂林一次强下击暴流成因分析[J].气象,47(2):242−252. Li C L, Cai K L, Huang X X, et al. 2021. Cause analysis of a severe downburst in Guilin [J]. Meteorological Monthly,47(2):242−252 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.02.010

廖晓农,于波,卢丽华.2009.北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J].气象,35(9):18−28. Liao X N, Yu B, Lu L H. 2009. Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing [J]. Meteorological Monthly,35(9):18−28 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2009.9.003

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 Applied Meteorological Science,30(3):292−301 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190304

盛杰,郑永光,沈新勇,等.2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J].气象,45(2):141−154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al. 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018 [J]. Meteorological Monthly,45(2):141−154 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.02.001

孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:54-75. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. Basic principles and technical methods of strong convection forecasting [M]. Beijing:Meteorological Press:54-75 (in Chinese)

王秀明,周小刚,俞小鼎.2013.雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J].气象学报,71(5):839−852 Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures [J]. Acta Meteorological Sinica,71(5):839−852 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.073

王易,郑媛媛,庄潇然,等.2022.江苏典型下击暴流风暴结构特征统计分析[J].气象学报,80(4):592−603. Wang Y, Zheng Y Y, Zhuang X R. et al. 2022. Statistical analysis of the structural characteristics of typical downburst storms in Jiangsu [J]. Acta Meteorological Sinica,80(4):592−603 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.023

王一童,王秀明,俞小鼎.2022.两个超级单体导致的冀豫交界区极端下击暴流预警分析[J].暴雨灾害,41(3):254−265. Wang Y T. Wang X M, Yu X D. 2022. Analysis of early warning of extreme downbursts induced by two supercell storms in the border area between Hebei and Henan Provinces [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):254−265 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.03.002

俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.2006a.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].

北京:气象出版社: 102 Yu X D, Yao X P, Xiong Y N. et al. 2006a. Doppler weather radar principles and operational applications [M]. Beijing:Meteorological Press:102 (in Chinese)

俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等.2006b.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(4):385−393. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al. 2006b. Doppler radar analysis on a series of downburst events [J]. Journal Applied Meteorological Science,17(4): 385−393 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20060401

禹梁玉,王啸华,顾荣直,等.2021.江苏一次下击暴流过程致灾大风成因分析[J].热带气象学报,37(21):801−811. Yu L Y, Wang X H, Gu R Z, et al. 2021. Analysis of the causes of a downwash storm in Jiangsu [J]. Journal of Tropical Meteorology,37(21):801−811 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2021.074

郑永光,朱文剑,姚聃,等.2016.风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J].气象,42(11):1289−1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province [J]. Meteorological Monthly,42(11):1289−1303 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.11.001

郑永光,陶祖钰,俞小鼎.2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641−652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting [J]. Meteorological Monthly,43(6):641−652 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.06.001

郑永光,朱文剑,田付友.2018. 2015 年“东方之星”翻沉事件和 2016 年阜宁 EF4 级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理[J].气象科技进展,8(2):44−54. Zheng Y G, Zhu W J, Tian F Y. 2018. Environmental conditions, structures, and mechanisms of convective storms of 2015 “Oriental Star” capsizing event and 2016 Funing EF4 tornado [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 8(2):44−54 (in Chinese). doi:10.39/j.issn.2095−1973.2018.02.005

赵放,潘劲松,李文娟,等.2020.浙江智能网格强对流天气短临预报预警技术应用[M]. 北京:气象出版社:128 Zhao F, Pang J S, Li W J, et al. 2020. Zhejiang intelligent grid strong convective weather short-range forecast and early warning technology application [M]. Beijing: Meteorological Press: 128 (in Chinese)

张弛,支树林,许爱华.2019.一次罕见强飑线 10 级大风的雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,38(2):135−143. Zhang C, Zhi S L, Xu A H. 2019. Analysis of radar echo characteristics of rare force 10 gale with a strong squall line event in Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(2):135−143 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.005

张怡,赵志宇.2012.豫东地区“6.3”与“7.17”两次致灾大风雷达资料对比分析[J].高原气象,31(2):515−529. Zhang Y, Zhao Z Y. 2012. Contrast of radar information between two destructive gales occurred in the east of Henan Province on June 3 and July 17 [J]. Plateau Meteorology,31(2):515−529 (in Chinese)

周后福,刁秀广,赵倩,等.2017.一次连续下击暴流天气的成因分析[J].干旱气象,35(4):641−648. Zhou H F, Diao X G, Zhao Q, et al. 2017. Cause analysis of a continuous downburst weather [J]. Journal of Arid Meteorology,35(4):641−648 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2017)−04−0641

Doswell C A. 1984. Mesoscale aspect of a marginal severe weather event [C]. 10th Conference on Weather Forecasting and Analysis, 131-137

Eilts M D, Johnson J T, Mitchell E D, et al. 1996. Damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D [C]. 18th Conference on Severe Local Storms, San Francisco: AMS: 541-545

Fujita T T. 1979. Objectives, operation, and results of Project NIMROD [C]. 11th Conference on severe local storms, Kansas City, MO: American Meteorology Society:259-266

Pryor K L. 2006. The GOES hybrid microburst index [C]. Preprints, 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, 12(113): 5-19

Roberts R D, Wilson J W. 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar [J]. Journal of Applied Meteorology,28(4):285−303. doi:10.1175/1520−0450(1989)028<0285:APMNPU>2.0.CO;2

Wheeler M. 1996. Verification and implementation of microburst day potential index (MDPI) and wind INDEX (WINDEX) forecasting tools at Cape Canaveral Air Station [R]. Applied Meteorology Unit, NASA Contractor Report CR-201354:13-22

Mccann D W, 1994. WINDEX – a new index for forecasting micro-burst potential [J]. Weather Forecasting,9(3):233-240

(责任编辑　闵爱荣)