



一次对流单体风暴合并造成的下击暴流成因分析

陈正旭 韩颂雨 蒋璐璐 滕舟 李文娟 吴书成 封秀燕 钱卓蕾

Analysis of the mechanism of downburst caused by the merger of convective cell storms

CHEN Zhengxu, HAN Songyu, JIANG Lulu, TENG Zhou, LI Wenjuan, WU Shucheng, FENG Xiuyan, QIAN Zhuolei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-138>

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

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>

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>

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>

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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈正旭,韩颂雨,蒋璐璐,等.2026.一次对流单体风暴合并造成的下击暴流成因分析[J].暴雨灾害,45(4):468–478. CHEN Zhengxu, HAN Songyu, JIANG Lulu, et al. 2026. Analysis of the mechanism of downburst caused by the merger of convective cell storms [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4):468–478 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–138

一次对流单体风暴合并造成的下击暴流成因分析

陈正旭^{1, 2}, 韩颂雨^{1, 2}, 蒋璐璐³, 滕舟², 李文娟^{1, 4},
吴书成², 封秀燕², 钱卓蕾⁵

(1. 全国暴雨研究中心, 武汉 430205; 2. 浙江省气象信息网络中心, 杭州 310052; 3. 宁波市气象局, 宁波 315012;
4. 浙江省气象台, 杭州 310052; 5. 浙江省绍兴市气象局, 绍兴 312099)

摘要: 2022年7月17日浙江宁波发生一次由两个对流单体风暴合并造成的下击暴流灾害性过程。为深入理解多单体风暴背景下发生下击暴流的原因,特别是风暴合并过程对下击暴流触发形成机理,利用探空、自动观测站、双偏振天气雷达及双多普勒雷达反演风场资料对该过程的环境条件、风暴演变特征以及单体合并造成下击暴流的成因机制进行诊断分析。结果表明:(1)该下击暴流下沉气流区对应的塘头自动站,在事发前后气压突升,气温骤降、降水量突增,分钟极大风速增至 $33.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;同时下击暴流的流出区(事发地)对应的栖风站,风速增至 $30.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其风速峰值区间与塘头站各要素峰值时间均较好对应。(2)该下击暴流对应的多单体风暴整体向东北方向移动,事发前,其北侧一个单体风暴发展旺盛,上升气流处对应典型差分反射率因子 Z_{DR} (Differential Reflectivity Factors)柱,强烈的上升气流托起饱含水汽的云顶,随着南侧单体的靠近,受其高空出流的下沉气流及冷气流下压影响,削弱并抑制了北侧单体的发展,最终在两单体风暴合并时触发了北侧单体的云顶崩塌,驱动了下沉气流的产生。(3)降水粒子的拖曳、冰晶粒子的融化蒸发、高空干冷空气夹卷以及气旋式旋转等因素,加剧了下沉气流的强度影响。该强下沉气流对应产生的强辐散出流,直接造成了此次地面大风灾害性过程。此次过程表明,多单体风暴中邻近单体合并时,若目标单体云顶快速崩塌、强回波核下降,应警惕下击暴流,尤其需关注上游单体高空出流对目标风暴的抑制作用,这为地面大风预警提供了关键前兆信号。

关键词: 下击暴流; 风暴合并; 风暴崩塌; 风场反演; 成因分析

中图法分类号: P458.3

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–138

Analysis of the mechanism of downburst caused by the merger of convective cell storms

CHEN Zhengxu^{1, 2}, HAN Songyu^{1, 2}, JIANG Lulu³, TENG Zhou², LI Wenjuan^{1, 4}, WU Shucheng²,
FENG Xiuyan², QIAN Zhuolei⁵

(1. Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430205; 2. Zhejiang Meteorological Information Network Center, Hangzhou 310052; 3. Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo, 315012; 4. Zhejiang Province Meteorological Observatory, Hangzhou 310052; 5. Zhejiang Province Shaoxing Meteorological Bureau, Shaoxing, 312099)

Abstract: A downburst event triggered by the merger of two convective cells occurred in Ningbo, Zhejiang Province on July 17, 2022. To better understand the formation mechanisms of downbursts in multi-cell storm environments, particularly those initiated by convective cell merging, a detailed analysis was conducted using sounding data, minute-resolution automatic weather station (AWS) observations, dual-polarization radar data, and dual-Doppler wind field retrievals. This study focused on environmental conditions, storm evolution, and the downburst generation process during the cell merger. The results are as follows. (1) At the Tangtou AWS, located within the downburst downdraft region, a sharp pressure rise, temperature drop, heavy rainfall, and peak wind gusts up to $33.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were recorded. Simultaneously, the Qifeng AWS, situated in the outflow zone near the incident site, registered gusts of $30.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, with peak timings of various elements being well consistent with those observed at Tangtou. (2) The multi-cell storm system propagated northeastward. Before

收稿日期: 2025–07–23; 定稿日期: 2026–06–11

资助项目: 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Q26, BYKJ2025M04); 浙江省自然科学基金联合基金项目 LZJMY25D050002, LZJMD23D050001, LZJMY24D050001, LZJMY24D050009)

第一作者: 陈正旭, 主要从事气象数据产品应用研究。E-mail: 28142035@qq.com

通信作者: 韩颂雨, 主要从事天气雷达资料应用研究。E-mail: 514884835@qq.com

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

the downburst, a cell on the northern side intensified, exhibiting a strong updraft and a distinct Z_{DR} (differential reflectivity factors) column indicative of vigorous lofting of moist air. As the southern cell approached, its upper-level outflow and cold downdraft suppressed the northern cell's development. Eventually, the merger of the two cells triggered a collapse at the cloud top of the northern cell, initiating a strong downdraft. (3) This downdraft was further enhanced by precipitation loading, melting and evaporation of ice particles, entrainment of dry and cold mid-level air, and cyclonic rotation. The resulting intense divergent outflow directly caused the severe surface wind event. This event indicates that during the merger of neighboring cells in a multi-cell storm, if the target cell exhibits rapid cloud-top collapse and a descending strong echo core, a downburst should be warned. Special attention should be paid to the suppression effect of upper-level outflow from an upstream cell on the target storm, providing a key precursor signal for ground high-wind warnings.

Key words: downburst; storms merger; collapse at the cloud top; wind field retrieval; three-dimensional wind field

引言

下击暴流是一种突发性强、水平尺度小(通常<10 km)但破坏力极大的灾害性强风(可达F3级, $70\sim 92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),其危害程度与龙卷风相当(Fujita, 1985),60%~80%的雷暴天气可探测到下击暴流的发生(Wakimoto, 2001)。科学家们围绕下击暴流的形成机理开展了大量的研究,最主要集中于孤立的对流风暴(俞小鼎等, 2006; 李晓容等, 2018; 王一童等, 2022)和中尺度对流系统(MCSs)(Fujita, 1978, 1981; 郑永光等, 2016; 孟智勇等, 2016)这两类风暴系统下产生的下击暴流。

孤立风暴产生的下击暴流主要由风暴内强下沉气流在近地层辐散造成(王秀明等, 2023),该下沉气流的产生源于复杂的水凝物粒子(雨滴、冰雹)相变过程(如蒸发、融化及融化后蒸发)导致的强烈负浮力效应(Wakimoto and Bringi, 1988; Proctor, 1989; Fu and Luo, 2007),以及水凝物负载作用。双偏振雷达观测进一步揭示,冰雹融化形成的固液混合态粒子,其融化降温 and 载水作用对下沉气流增强和下击暴流形成至关重要(Richter et al., 2014; Kuster et al., 2016; Mahale et al., 2016)。此外,一些个例研究表明小尺度涡旋(如转子涡旋)和中气旋也被认为可能在触发或加速初始下沉气流方面发挥作用(Kessinger et al., 1988; Roberts and Wilson, 1989; Neilsen and Schumacher, 2018)。Zhu等(2025)利用X波段相控阵雷达观测资料及其同化结果,分析深圳一次微下击暴流个例,指出中层水凝物拖曳触发下沉气流,而低层涡旋产生的向下扰动气压梯度力加速其下沉。

MCSs中的下击暴流通常涉及多种物理过程的共同作用,包括强对流单体的下沉辐散气流、雷暴高压冷池的密度流以及后侧入流急流(RIJ)的动量下传等(王秀明等, 2023)。数值模拟表明,RIJ动量下传或强下沉气流辐散均可导致地面强风(Mahoney and Lackmann, 2011),而极强的冷池气压梯度力本身也可产生致灾大风(Markowski and Richardson, 2010)。弓

形回波顶端的极端大风常被认为与RIJ及地有关(Weisman, 1993),但RIJ能否及地及主导其及地的机制仍存疑(Wakimoto, 2001)。此外,一些个例研究还强调了MCS内低层中尺度涡旋及其伴随的出流对地面强风形成的重要性(Sechenkman and Xue, 2016; Parker et al., 2020)。

Fujita和Wakimoto(1981)指出下击暴流存在不同尺度特征,但现有研究主要集中于孤立风暴和MCSs这两类系统下产生的下击暴流,对于在多单体风暴(介于孤立单体与成熟MCS之间的一种形态)相互作用背景下产生的下击暴流,其触发机制和演变规律的研究相对匮乏。具体而言,多单体风暴系统发生的频率较高,虽也有一些对于风暴合并与地面大风之间的相关研究(王珏等, 2022; 侯淑梅等, 2020),但对于多单体风暴系统内新生、成熟、消亡及合并中的单体如何相互作用,特别是单体合并过程如何影响下沉气流的触发和加强,进而导致下击暴流事件,其细致的物理机制尚不明确。2022年7月17日浙江宁波地区发生一次由多单体风暴造成的下击暴流事件(顾小丽等, 2025),多单体风暴整体向东北方向移动,在其南侧一直有后向传播向的对流单体生成,其中南侧的对流单体在与北侧对流单体风暴靠近合并时,北侧单体的强烈下沉气流导致了地面灾害性大风。

为深入理解多单体风暴背景下下击暴流的形成机制,探究单体合并过程对下击暴流触发形成的机理。本文以2022年7月17日宁波典型下击暴流事件作为研究对象,聚焦多单体风暴的相互作用(尤其是对流单体合并),利用探空、自动观测站、双偏振天气雷达及双多普勒雷达反演风场资料,对此次大风过程进行深入研究,详细分析该下击暴流过程的环境条件和多单体风暴演变特征,以及风暴单体合并过程与强下沉气流及地面大风触发的关联,旨在揭示单体合并对下击暴流触发的具体影响机制,为深入理解此类复杂背景下下击暴流的形成机理提供观

测依据和理论参考,也为提高下击暴流预警能力提供科学基础。

1 资料与方法

本文使用的资料为该下击暴流过程发生时段内(2022年7月17日11:00—14:00,北京时,下同)的以下几类资料:(1)浙江省气象局提供的各气压层风场、高度场以及杭州站高空探测资料,用于对该过程的环境条件分析。(2)浙江省气象局提供的地面分钟级自动站观测数据,用于分析该下击暴流事件过程的降水量、气温、湿度、风速、气压等要素。(3)浙江省气象局提供的宁波、绍兴、舟山、台州、杭州5部双偏振多普勒天气雷达数据,用于对该过程回波演变进行分析。其中选取宁波、绍兴这两部雷达对该过程进行微物理、动力结构特征分析。该两部雷达均具有双偏振能力,可以获得三维的微物理变量。本文对于差分反射率因子(Z_{DR})偏振参量进行了系统偏差处理(胡志群等, 2014),对于差分相位常数(K_{DP})偏振参量进行了重新估算(Wang et al., 2009),并且综合利用相关系数及信噪比参数等识别了非气象回波(吴翀, 2018)。

图1为两个对流单体风暴相对宁波、绍兴两部雷达的位置示意图,从图中可见,事件发生的对流单体位置相对于两部雷达近乎 90° 夹角,分别相距宁波雷达65 km、绍兴雷达88 km,是较为合适的双多普勒雷达三维风场反演的位置分布(Doviak et al., 1976),

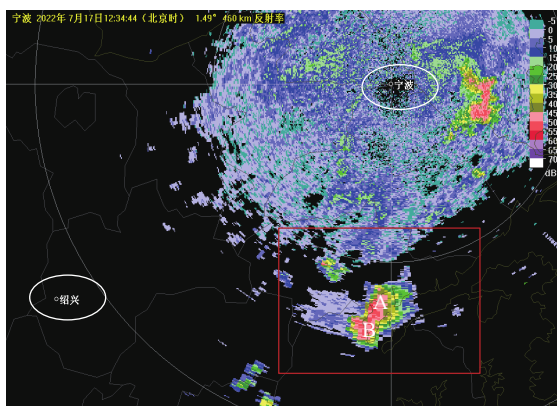


图1 两个对流单体 A、B 风暴相对宁波、绍兴两部雷达的位置示意图(底图是2022年7月17日12:34宁波雷达 1.49° 仰角观测到的反射率因子图,白色圆圈分别表示宁波、绍兴两部雷达,红框表示风场反演区域)

Fig. 1 Positions of two convective cells A and B relative to the radars in Ningbo and Shaoxing (And this is reflectivity factor observed at 3.3° elevation by Ningbo radar at 12:34 BT on July 17, 2022. White circles represent the radars in Ningbo and Shaoxing, while the red box represents the retrieval area)

可得到较为合理的三维风场结果。反演风场方法为动态地球坐标系下的双多普勒雷达风场反演组网方法(罗昌荣等, 2012),风场反演前对径向速度进行了自动退速度模糊处理(韩颂雨等, 2022),最终得到高度范围为500 m~10 km,分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ \times 500$ m的三维格点风场,该方法反演的风场与飞机报、秒级探空、风廓线资料对比,总体误差结果较小,反演的风场较为可靠(张晗昀等, 2020; 韩颂雨等, 2025)。

2 天气实况和环境条件

2022年7月17日中午浙江宁波地区出现了雷雨天、短时暴雨、强雷电等强对流天气,受强雷暴单体云团影响,12:30—12:36(北京时,下同)奉化区翡翠湾码头突遭下击暴流引发的强风,事发过程该水域涨潮并下雨,1艘停靠在码头的休闲渔船被吹翻,船只侧翻时间为12:32,导致16人落水,其中11人死亡(该事件发生的时间、地点及灾情均由“奉化区翡翠湾7·17”事故调查报告确认)。

图2a为2022年7月17日08时依据各气压层风场、高度场、温度场、湿度场等制作的中尺度分析图,从中可见,此次过程受西北太平洋副热带高压(以下简称副高)和高空槽共同影响,500 hPa南支槽位于江苏-安徽-江西一带,宁波地区处于高空槽前和副高北侧的偏西气流中。低层850 hPa切变线前侧存在西南风急流,向浙北输送充足的水汽。高空槽线呈明显前倾结构,高空槽后的干冷空气叠置于低层的暖湿空气之上,形成“上干冷、下暖湿”的垂直层结配置。由2022年7月17日12时距离风暴最近的杭州站探空图(图2b)可见,对流有效位能(CAPE)达 $2144.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,地面至500 hPa垂直风切变风矢量差为 $9.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,抬升凝结高度(LCL)为930.3 hPa,500 hPa和850 hPa温度差为 23.8°C ,K指数为 40.9°C 。探空曲线呈现上干下湿的结构,中层有明显的干层(650—500 hPa),干层的平均温度露点差为 9.1°C 。800 hPa以下平均比湿均在 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及以上,表明低层水汽充沛条件。此种层结配置下,中层干空气有利于降水蒸发冷却,增强下沉气流,促进雷暴大风或下击暴流发生。结合中等强度垂直风切变,环境条件有利于对流风暴组织化发展和雷暴大风的产生。下击暴流多出现在中等以上垂直风切变环境中(Doswell, 1984),且低层暖湿、中层干层、较大温度垂直递减率等条件均有利于其发生(俞小鼎等, 2006b; 李彩玲等, 2021; 王一童等, 2022)。

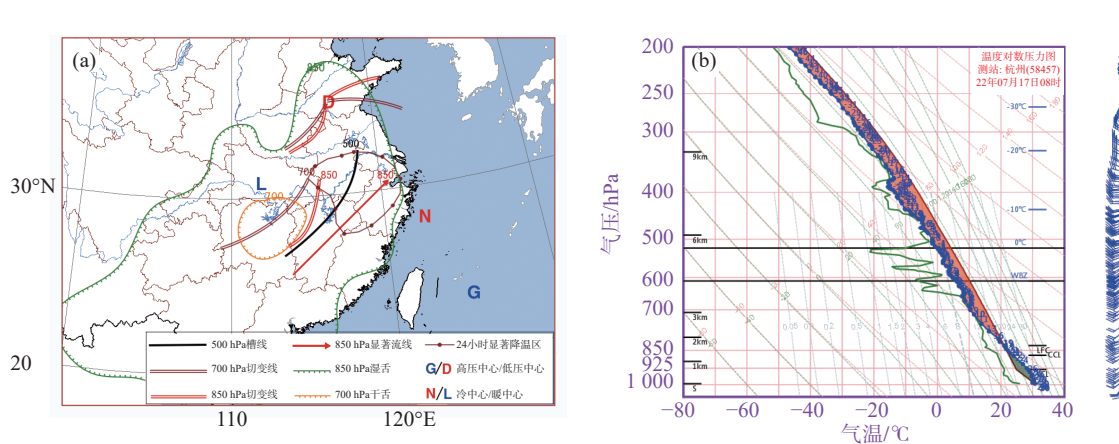


图2 2022年7月17日08:00中尺度分析图(a)和杭州站探空图(b)

Fig. 2 (a) Mesoscale analysis map and (b) radiosonde map of the Hangzhou Station at 08:00 BT on July 17, 2022

3 自动站观测特征

图3为此次过程12:00—13:00的自动站极大风情况,莪湖塘头站(黄色圈)12:40时出现 $33.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 极大风速(12级);莪湖栖凤站(紫色圈)12:35时出现 $30.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 极大风速(11级),该站最靠近事发地位置。

由逐分钟观测的自动站各气象要素演变(图4a)可见,塘头站在12:33(事发时间)前后,气压突升(14 min时间内陡升4.8 hPa),气温骤降(15 min时间内降低 12.9°C),湿度增加(由46%增至100%),降水量也在12:31达到 $4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的峰值,与气压、温度峰值均有较好对应,降水的极端性较大。并且极大风速不断增加,在12:40风向 90° 突变,由西风转为南风,达到12级极大风速。

而靠近事发地的栖凤站,也存在气温骤降、湿度

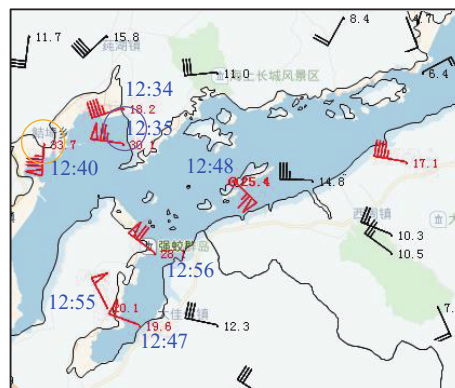


图3 2022年7月17日12:00—13:00时事发地附近的自动站极大风(风羽)分布及出现时间(黄圈为塘头站,紫圈为栖凤站)

Fig. 3 Distribution of maximum wind speeds (wind bars) and occurrence times from automatic stations near the incident site from 12:00 BT to 13:00 BT on July 17, 2022 (The yellow circle marks the position of Tangtou Station, and the purple circle marks the position of Qifeng station)

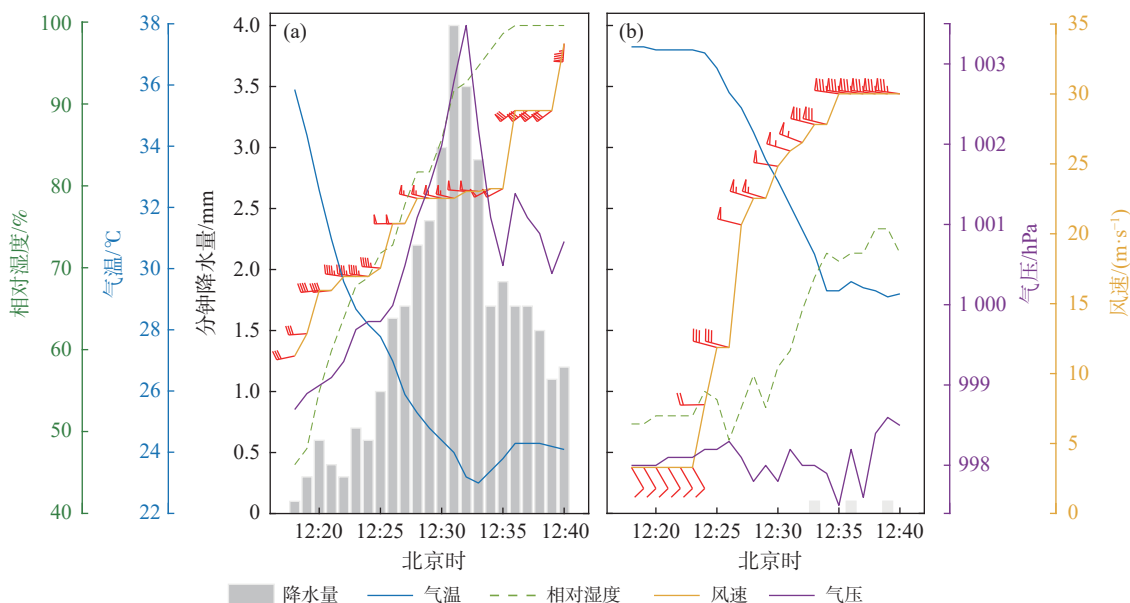


图4 2022年7月17日12:18—12:40塘头站(a)和栖凤站(b)各气象要素演变趋势

Fig. 4 Evolution trend of various meteorological elements of (a) Tangtou and (b) Qifeng stations from 12:18 BT to 12:40 BT on July 17, 2022

增加的现象(图 4b),与塘头站相比特征不明显,气压微增但幅度不大。但其风速突增明显,风力峰值区间与塘头站气压要素等峰值时间范围(12:35 前后)基本相对应,达到极大风 11 级风速,并且风向也有 90° 突变,由一开始的偏南风转为西风。与塘头站不同的是,该站几乎没有降水量。

由自动站观测要素特征,结合对流风暴的移动轨迹(自事发地的西偏南方向开始,向东北偏东方向移动),大致判断该对流风暴其下击暴流的下沉气流区发生在塘头站附近,而下击暴流的水平风辐散出流主要影响栖凤站,导致了附近码头事故的发生。

4 雷达观测特征

4.1 雷达回波特征

这次过程是由团状的多单体风暴引发的,多单体风暴整体向东北方向移动,在其南侧一直有后向传播向的对流单体生成。新生的对流单体成熟、消亡或者合并,经历着不同的生命史阶段。由宁波雷达回波演变图 5 所示,造成该次宁波码头下击暴流事件的原因是由南侧对流单体(单体 B)与北侧对流单体(单体 A)靠近合并引起的,该北侧风暴单体的下沉气流导致了地面大风的发生,具体如图 5a—e 所示。12:18,单体 A(成熟阶段)的南侧存在一个普通

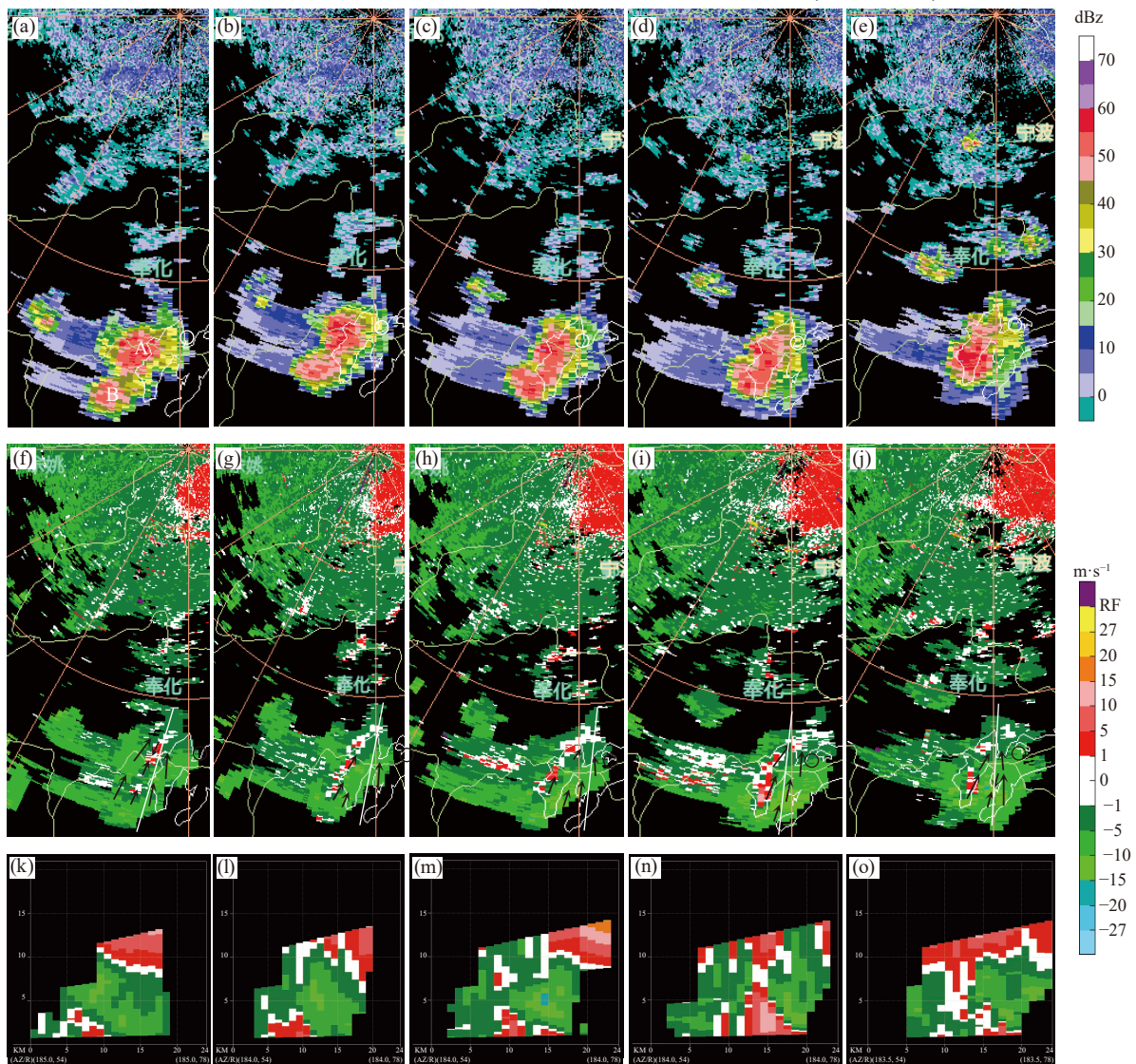


图 5 2022 年 7 月 17 日 12:18 (a, f, k)、12:24 (b, g, l)、12:30 (c, h, m)、12:36 (d, i, n)、12:42 (e, j, o) 宁波雷达 3.3° 仰角雷达反射率因子(a—e)、 2.4° 仰角径向速度(f—j)以及沿着图(f—j)中对应白线过风暴单体的径向速度垂直剖面(k—o)(黑色箭头表示径向速度的指向,圆圈处表示事发受灾地,下同)

Fig. 5 The (a-e) radar reflectivity factor at 3.3° elevation angle, (f-j) the radial velocity at 2.4° elevation angle, and (k-o) the vertical profiles of radial velocity along the corresponding white lines in the storm cells from Ningbo radar at (a, f, k) 12:18 BT, (b, g, l) 12:24 BT, (c, h, m) 12:30 BT, (d, i, n) 12:36 BT, and (e, j, o) 12:42 BT on July 17, 2022 (Black arrows indicate the direction of radial velocity, and circles denote the affected disaster locations, the same below)

单体 B; 12:24, 南侧单体 B 逐渐发展并靠近北侧单体 A; 12:30—12:36, 两单体合并, 北侧原风暴单体 A 减弱, 该灾害事件即在此时段发生; 12:42, 北侧单体 A 已经消散。由图 5f—j 显示的 2.4° 仰角径向速度图中也可见, 随时间变化南侧单体 B 的辐合在逐渐加强, 而北侧单体 A 的辐合逐渐减弱。此外, 在图 5k—o 显示的 (沿着图 5f—j 中对应的白线) 过风暴单体的径向速度垂直剖面中可见, 3~4 km 高度

处有明显的中层径向辐合。

图 6 为 12:33 所有观测到此事件的最低层 0.5° 仰角雷达径向速度雷达图, 从中可见, 事发地附近低空有较为明显辐散, 尤其是图 6a, 宁波雷达观测在 1.1 km 高度事发地处在南北方向的辐散气流中, 虽然径向速度指示的速度较小, 均在 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下 (仅图 6c 舟山雷达观测的风速稍大一些), 但其辐散的特征较为明显。

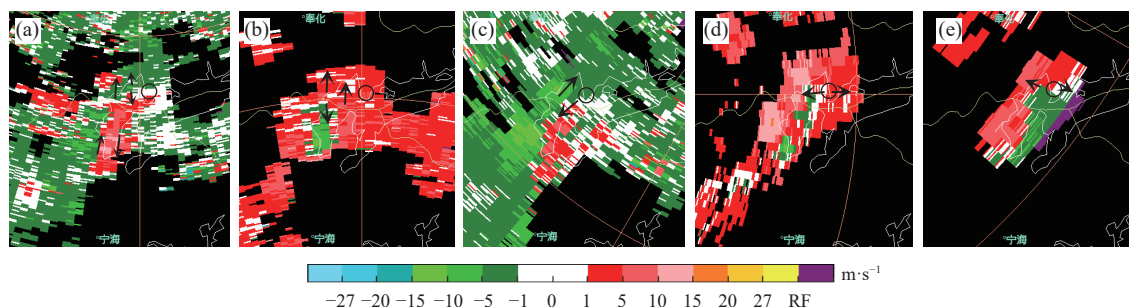


图 6 2022 年 7 月 17 日 12:33 受灾前后宁波 (a)、台州 (b)、舟山 (c)、绍兴 (d)、杭州 (e) 雷达最低层 0.5° 仰角观测的径向速度图 (这 5 部雷达分别位于相对该图约北侧、南侧、东北侧、西侧、西北侧的方位)

Fig. 6 Radial velocity of the lowest 0.5° elevation observations of radar in (a) Ningbo, (b) Taizhou, (c) Zhoushan, (d) Shaoxing, and (e) Hangzhou around the disaster time at 12:33 BT on July 17, 2022 (These five radars are located in the approximate north, south, northeast, west, and northwest directions relative to the area shown in this figure)

另外由宁波雷达反射率因子观测 (图略) 可知, 北侧单体中 55 dBz 以上回波的最大高度, 12:30—12:36 由 7 483 m (6° 仰角) 下降到 5 610 m (4.3° 仰角), 6 min 内下降了近 2 km。且在 12:30, 4 420—5 500 m 高度仍有大于 60 dBz 的强回波核, 12:36 风暴内已无大于 60 dBz 的回波, 均预示着北侧风暴及其上升气流的减弱。

4.2 反演风场特征

图 7a—d、e—h 为双多普勒雷达反演的 2 km 高度水平风场 (图中 4 个时次反演的风场均已减去整体风暴中心平均移动速度: 向正东分量 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 向正北分量 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 下同)。由图可见, 12:16 北侧风暴单体内的气旋性辐合相较于南侧风暴单体更明显, 12:22—12:33 两风暴相互靠近, 其气旋式辐合也渐渐合并并在两单体间的中心位置, 12:33 北侧风暴的气旋式辐合明显减弱, 此时发生了下击暴流事件。

在低层 2 km 高度处 (图 7a—d), 随时间演变北侧风暴渐渐出现 55 dBz 的强回波, 预示强回波核的下降。结合图 7e—h K_{DP} 参量的演变也同样可见, 低层 2 km 高度北侧风暴 K_{DP} 值随时间演变逐渐增大, 也说明低层含水量的增加和强降水的发生。此外图 7d 出现的强回波核位置对应图 7h 中 K_{DP} 参量大值区域 (两个白色圆圈处), 该位置与塘头自动站的位置相对应, 12:33 塘头站出现了气压陡增等下击暴流特

征, 而受灾处就在其圆圈东侧附近。

在 5 km 高度处 (图 7i—l), 反演的风场也呈现两侧风暴单体气旋性辐合合并的特征, 并随时间演变, 北侧单体中层大于 55 dBz 的强回波核范围逐渐减少, 也说明了强回波核的下降。而气旋式旋转的特征可能也与下击暴流的产生有关, 旋转导致地面气压下降, 形成向下的气压梯度力扰动 (Wakimoto, 1985; 俞小鼎等, 2006)。整体来看, 双多普勒雷达反演的风场特征与图 5 径向速度图的分析特征较为一致, 反演结果基本可靠。

由图 8 双多普勒雷达反演的垂直剖面风场可见, 12:16, 北侧风暴单体发展旺盛 (图 8a—c), 图 8c 中上升气流处对应典型的 Z_{DR} 柱 (大值区) (Snyder et al., 2015), 这是强烈上升气流将液态水带入融化层之上的一种反映, 也为雹胚的形成和增长提供了必要的过冷液态水环境。同时图 8b 中融化层以上也对应了 K_{DP} 大值区 (白色圆圈处), 其表现为上升气流托起饱含水汽的云顶, Kuster 等 (2021) 研究也提到, 融化层附近的 K_{DP} 核是可靠的下击暴流预警信号。而此时南侧风暴单体发展弱一些, 上升气流较小。此外, 由图 8a 可以看到南侧风暴单体的高空其东北侧有明显的下沉气流 (白色箭头指示)。

12:22 (图 8d—f), 南侧单体的高空下沉气流 (白色箭头指示) 出流靠近了北侧单体, 而北侧单体内也

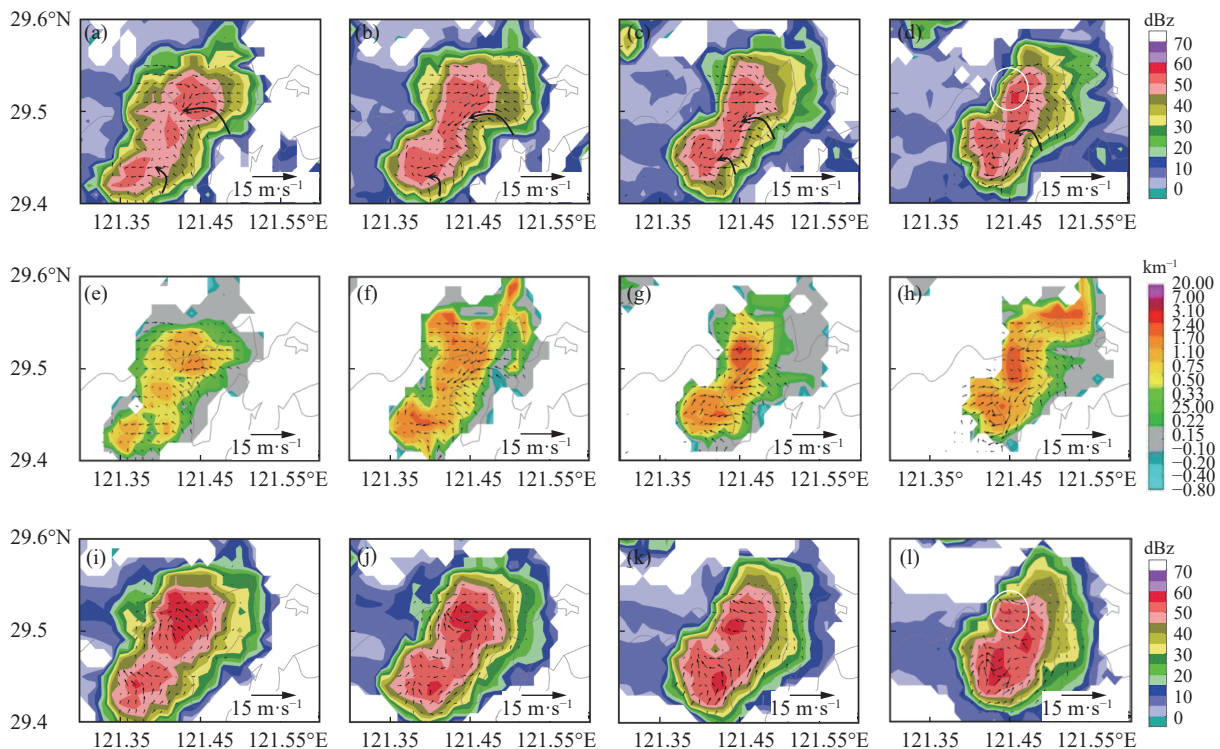


图 7 2022 年 7 月 17 日 12:16 (a, e, i)、12:22 (b, f, j)、12:28 (c, g, k)、12:33 (d, h, l) 双多普勒雷达反演的 2 km 高度水平风场 (风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和反射率因子 (填色, 单位: dBZ) (a—d)、2 km 高度水平风场 (风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和差分相位常数 (填色, 单位: km^{-1}) (e—h)、5 km 高度水平风场 (风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和反射率因子 (填色, 单位: dBZ) (i—l)

Fig. 7 (a-d) 2 km height horizontal wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) with reflectivity factor (shaded, unit: dBZ), (e-h) 2 km height horizontal wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) with specific differential phase (shaded, unit: km^{-1}), and (i-l) 5 km height horizontal wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) with reflectivity factor (shaded, unit: dBZ) obtained from the dual-Doppler radar retrieval at (a, e, i) 12:16 BT, (b, f, j) 12:22 BT, (c, g, k) 12:28 BT, and (d, h, l) 12:33 BT on July 17, 2022

出现了下沉气流 (图 8d), 同时北侧单体 K_{DP} 大值区高度下降 (图 8e), 上升、下沉气流共存, Z_{DR} 柱特征不再明显 (图 8f)。

12:28 (图 8g—i), 北侧单体强回波区高度下落, 而南侧单体发展回波直立伸展, 并且南侧单体的高空东北侧下沉气流 (白色箭头指示) 越加靠近北侧风暴 (图 8g), 北侧单体 K_{DP} 大值区高度继续下降 (图 8h), Z_{DR} 值已减小 (图 8i)。

12:33 (图 8j—l), 北侧单体强回波区下降更为明显, 风暴整体崩塌减弱, 南侧单体发展较好, 其东北侧的下沉气流已经与北侧风暴内的下沉气流靠近合并, 对应降水粒子的强烈下落, 在事发地西侧 (121.48°E , 29.49°N) 5 km、3 km 高度处反演的下沉气流分别为 $19.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 8j)。下沉气流处对应 K_{DP} 较大值区域 (图 8k), 并对应中小雨滴的下落 (1.5—2 dB 范围的 Z_{DR} 值) (图 8l)。且在更靠近塘头自动站即事发地西侧位置, 结合下沉气流的低层 K_{DP} 大值区域表现得更为明显 (图略), 可以印证事发地附近低空确实存在较强的下沉气流和降水发生, 并对应反射率因子回波的向下崩塌。

5 下击暴流成因分析

下击暴流的形成和雷暴云顶的上冲和崩溃有极大关联。上升气流在其上升和上冲的过程中从高层大气运动中获得了水平动量, 随着上冲高度的增加, 其动能逐渐变为重力势能而被储存起来, 表现为上升气流托起饱含水汽的沉重云顶 (图 8b 显示的 K_{DP} 大值区)。

在此个例过程中, 12:16, 原本北侧风暴单体发展, 上升气流较强 (图 8a 雷达回波剖面 and 图 8c 显示的 Z_{DR} 柱等特征)。12:22—12:28, 随着南侧风暴单体靠近, 其高空出流的下沉气流一方面削弱了北侧单体的上升气流 (图 8d—f 和图 8g—i 风场剖面显示南侧风暴下沉气流靠近北侧风暴单体), 使该上升气流减弱; 另一方面将冷气流从云顶下压, 使得北侧风暴不能继续上升发展。12:33, 就在两单体风暴合并时, 北侧风暴云层迅速崩塌 (图 8a、d、g、j 雷达回波剖面 and 图 7 指示的强回波质心下降以及径向反射率显示 55 dBZ 以上回波 6 min 下降近 2 km), 重、冷云顶下沉, 下沉气流出现 (事发地西侧在 3 km 高度约

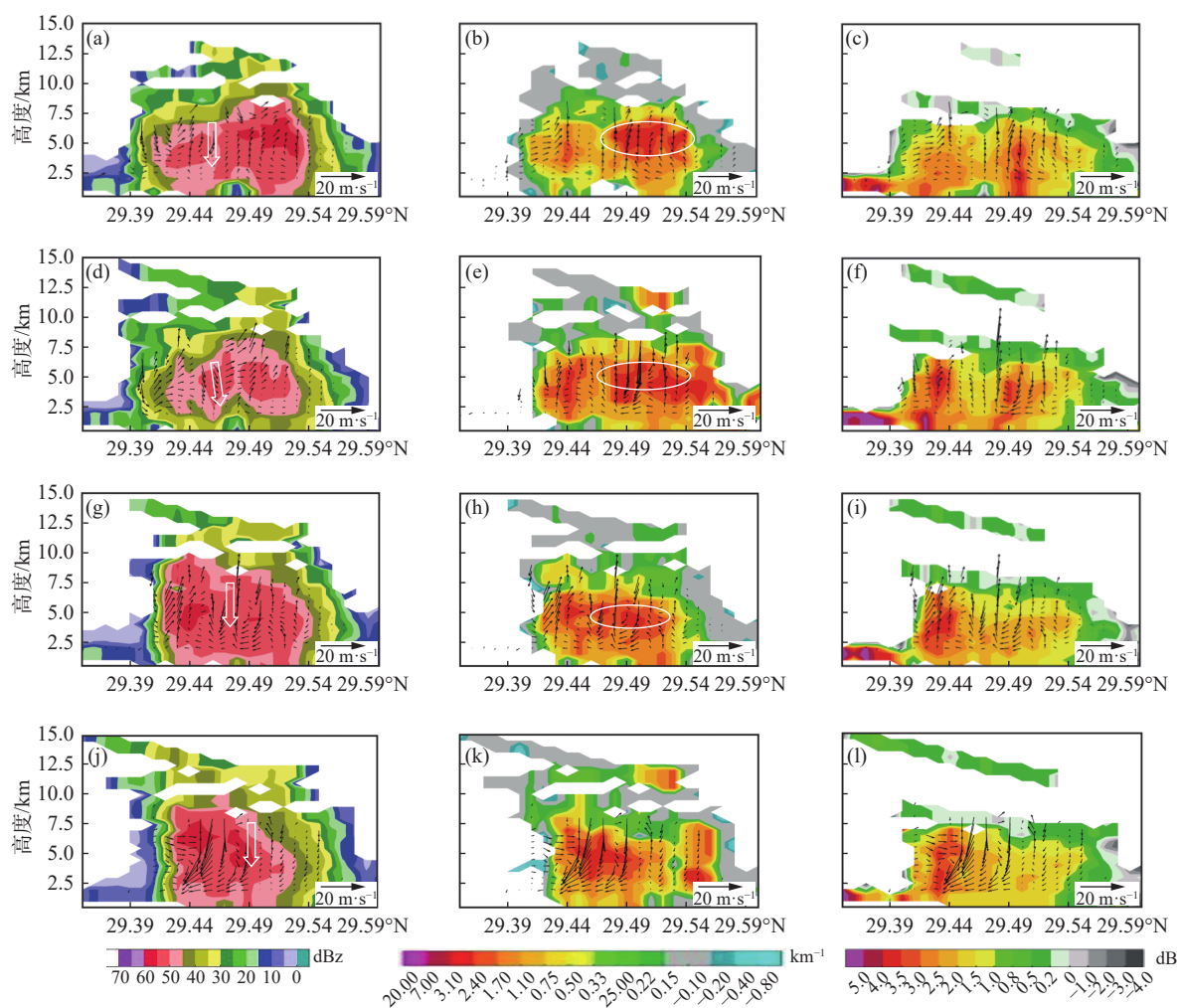


图8 2022年7月17日12:16过(121.34°E, 29.35°N)点(a)、(121.33°E, 29.35°N)点(b)、(121.33°E, 29.35°N)点(c); 12:22过(121.37°E, 29.35°N)点(d)、(121.34°E, 29.35°N)点(e)、(121.35°E, 29.35°N)点(f); 12:28(g—i)过(121.36°E, 29.35°N)点; 12:33(j—l)过(121.38°E, 29.35°N)点南北向顺时针旋转30°的双多普勒雷达反演的垂直剖面风场(风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)叠加反射率因子(填色, 单位: dBZ)(a, d, g, j)、叠加差分相位常数(填色, 单位: km^{-1})(b, e, h, k)、叠加差分反射率因子(填色, 单位: dB)(c, f, i, l)(图中白色箭头表示下沉气流的位置, 椭圆代表 K_{DP} 大值区域)

Fig. 8 The (a, d, g, j) vertical profile wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) retrieved from dual-Doppler radar with reflectivity factors (shaded, unit: dBZ), specific differential phase (shaded, unit: km^{-1}), and (c, f, i, l) differential reflectivity factors (shaded, unit: dB) at 12:16 BT, the rotation of points (a) (121.34°E, 29.35°N), (b) (121.33°E, 29.35°N), and (c) (121.33°E, 29.35°N) at 12:22 BT, the rotation of points (d) (121.37°E, 29.35°N), (e) (121.34°E, 29.35°N), and (f) (121.35°E, 29.35°N), at (g-i) 12:28 BT, the rotation of points (121.36°E, 29.35°N) clockwise by 30° in the north-south direction on July 17, 2022 (The white arrows indicate the locations of descending air currents, the ellipses represent the high K_{DP} value regions)

$9.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。McCann (1979) 提到下击暴流触发的本质, 云顶崩塌与风暴云下方的飑锋移动相关, 飑锋形成后向风暴云前部的上升区加速移动, 逐渐远离风暴云的母体, 会使得维持上升运动的暖湿空气供应被飑锋切断, 造成上升运动的削弱和消失, 导致冷而重的云顶崩塌, 产生下沉气流。而本个例中南侧个例的靠近也可以类似理解为是其促使了北侧风暴云飑锋的加速前移, 阻碍了上升气流的发展, 直接造成了云顶的崩塌。

同时降水粒子的拖曳作用可能进一步加强了下沉气流(俞小鼎等, 2006; 杨秀庄等, 2025), 表现为雨

滴、冰晶粒子汹涌而下; 下沉过程中冰晶粒子融化、液态水和雨滴持续蒸发降温冷却也加强了下沉气流(图5b、c中存在大于70 dBZ强回波以及图8b对应的 K_{DP} 大值区也说明可能有冰雹等固态粒子存在); 另外南侧风暴单体高空出流的干冷空气夹卷进入下沉气流使得雨滴迅速蒸发, 更加强了下沉气流强度。此外, 中层的气旋式旋转(图7)造成向下气压梯度力扰动, 也可能一定程度上加强下沉气流。

强烈的下沉气流及地后, 在近地面产生了强烈的辐散出流, 以致造成了此次游船码头突发性地面大风的灾害事件。据事故调查报告记录, 在事发过

程中该水域涨潮并大雨,也印证了该强烈下沉气流对事件的影响。

总体分析可见,由于南侧单体对北侧单体的靠近与合并,北侧单体受南侧单体高空出流及冷气流的影响,触发了此次过程中强下沉气流的产生。如图 9 所示为此次过程两单体风暴演变的三维示意图,两风暴整体向偏东方向移动,南侧单体在移动过程中渐渐靠近北侧单体,并不断向上发展,其高空出

流的下沉气流逐渐影响了北侧单体(如图 9 黑色粗线下沉气流所示),不仅削弱其北侧单体的上升气流,且冷气流的下压也抑制了北侧单体的发展。以致在图 9 中 T2—T3 时刻,北侧单体的云顶崩塌(55 dBz 以上回波 6 min 内由约 7.5 km 下降到约 5.5 km),驱动了下沉气流的产生。而该强下沉气流产生的强辐散出流,直接造成了地面大风灾害性事件的发生。

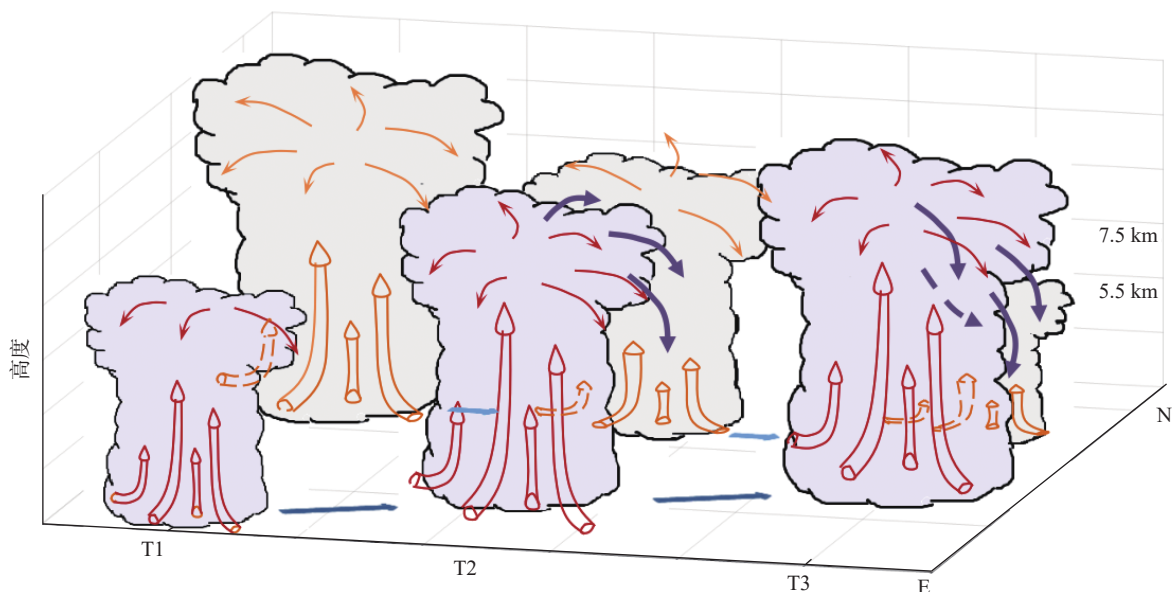


图 9 2022 年 7 月 17 日宁波地区此次下击暴流过程两单体风暴演变的示意图(红色气流代表的是南侧单体风暴,橙色气流代表的是北侧单体风暴,紫色粗线箭头代表南侧单体高空出流的方向,横坐标代表东西方向,纵坐标代表南北方向,T1、T2、T3 代表 3 个时刻风暴所处位置)

Fig. 9 Evolution of two individual cells during this downburst process in Ningbo Zhejiang Province on July 17, 2022 (The red airflow represents the southern cell, while the orange airflow represents the northern cell, and the purple arrow with thick lines represents the direction of high-altitude outflow from the southern cell, the horizontal axis represents the east-west direction, and the vertical axis represents the north-south direction. T1, T2, and T3 denote the positions of the storm at three different moments)

6 结论与讨论

目前针对多单体风暴相互作用下下击暴流的触发机理认识尚不充分,本文通过中尺度分析和探空资料,地面分钟级自动观测站、双偏振天气雷达以及双多普勒雷达反演的三维风场,对发生在宁波地区由两个单体风暴靠近合并所造成的下击暴流事件进行详细的诊断分析,深入了解了两单体风暴的相互作用对下击暴流形成的机理。得出主要结论如下:

(1) 2022 年 7 月 17 日宁波地区发生的下击暴流,在前倾槽背景下“上干冷下暖湿”的大气环境中,配合中等强度的垂直风切变(地面至 500 hPa),利于风暴的组织化发展。下击暴流的下沉气流区发生在靠近塘头自动站附近,该站事发前后,气压突升、气温骤降、降水量突增,极大风风速增加至 12 级;而下击暴流的出流区(事发地),靠近栖凤自动站,该站风

速突增至 11 级,风向由偏南风转为西风,且风速峰值区间与塘头站气压、降水、温度要素峰值均有很好的对应。

(2) 该多单体风暴整体向东北偏东方向移动,其南侧单体与北侧单体靠近合并时,北侧单体产生的强烈下沉气流导致下击暴流和地面大风事件。低层雷达径向速度显示,随着两单体靠近,南侧单体辐合增加,北侧单体辐合减弱;事发地低空有明显的辐散特征。雷达反射率显示,事发时强回波核有显著下降的特征(6 min 内下降近 2 km),低层强回波核位置与 K_{DP} 大值区相对应,且与塘头自动站位置对应。

(3) 双偏振多普勒天气雷达反演三维风场显示,两单体风暴内低层气旋式辐合明显,随着两风暴相互靠近,北侧气旋式辐合减弱。事发前,北侧单体发展旺盛,上升气流处对应典型 Z_{DR} 柱,随着南侧单体

的靠近,其高空出流的下沉气流及冷空气靠近北侧单体,北侧单体 K_{DP} 大值区高度下降;事发时刻,两单体风暴合并,北侧单体风暴整体崩塌减弱,形成强烈的下沉气流。

(4)由雷达观测分析可见,此次下击暴流事件,是南侧风暴单体向北侧单体靠近合并时,其高空出流及冷气流的影响,触发了北侧单体的云顶崩塌,从而驱动下沉气流的产生。而降水粒子的拖曳、冰晶粒子等融化蒸发、高空干冷空气夹卷以及气旋式旋转等因素,加剧了下沉气流的强度。同时该强下沉气流产生的强辐散出流,直接造成此次地面大风灾害性事件。

此次对流单体的双多普勒雷达反演风场特征与径向速度特征吻合,反演风场可靠,可为对流系统演变动力结构特征提供定性的分析参考。较为遗憾的是此次个例观测的雷达均为 S 波段雷达,最为靠近的 X 波段雷达仍因距离过远,未能反演到低层的风场信息。此外,该过程中两个单体的靠近合并,触发了北侧单体风暴的崩塌及强烈下沉气流的产生,虽有较为定性的观测加以印证,但仅该个个例并未能完全说明对流单体的靠近合并一定会触发强烈下沉气流的产生。未来仍需搜集大量对流风暴靠近合并的个例,对其是否发生下击暴流事件进行统计研究或集合分析,并对其具体的相互作用影响机制进行深入研究。

参考文献 (References):

- 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*,43(1):1-12. Gu X L, Xiao W X, Tu X P, 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*,43(1):1-12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-157
- 韩颂雨,刘永生,骆阳,等.2022.适用 S 波段多普勒天气雷达的径向速度自动退模糊方法[J].*气象学报*,80(5):1-15. Han S Y, Liu Y S, Luo Y, et al. 2022. Automatic radial velocity dealiasing algorithm for S-band Doppler weather radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,80(5):1-15 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.059
- 韩颂雨,王丽吉,康丽莉,等.2025.基于最优插值方法分析的雷达反演三维风场与再分析风场融合试验[J].*高原气象*,44(3):757-769. Han S Y, Wang L J, Kang L J, et al. 2025. Analysis of the combined three-dimensional wind field retrieved by Radar and reanalysis wind field based on optimum interpolation technique [J]. *Plateau Meteorology*,44(3):757-769 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2024.00089
- 胡志群,刘黎平,吴林林.2014. C 波段偏振雷达几种系统误差标定方法对比分析[J].*高原气象*,33(1):221-231. Hu Z Q, Liu L P, Wu L L. 2014. Comparison among several system biases calibration methods on C-band polarimetric radar [J]. *Plateau Meteorology*,33(1):221-231 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00134
- 侯淑梅,闵锦忠,王改利,等.2020.传播运动在对流风暴合并过程中的作用[J].*大气科学学报*,43(2):347-357. Hou S M, Min J Z, Wang G L, et al. 2020. Effect of propagation moving on the convective storm mergence process [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,43(2):347-357 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20180416002
- 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
- 李晓容,高青云,周虹.2018.一次新生脉冲风暴分析[J].*高原山地气象研究*,38(3):80-84,96. Li X R, Gao Q Y, Zhou H. 2018. Case analysis of a newborn strong thunderstorm [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,38(3):80-84,96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2018.03.013
- 罗昌荣,池艳珍,周海光.2012.双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究[J].*大气科学*,36(2):247-258. Luo C R, Chi Y Z, Zhou H G. 2012. Characteristics of 3-D wind structure of typhoon outer intensive banded echo using dual-Doppler weather radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,36(2):247-258 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.10222
- 孟智勇,姚聃,白兰强,等.2016.基于实地灾害调研和雷达观测对“东方之星”倾覆地点附近强风的估计[J].*科学通报*,61(7):797-798. Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, et al. 2016. Wind estimation around the shipwreck of riental Star based on field damage surveys and radar observations [J]. *Chinese Science Bulletin*,61(7):797-798 (in Chinese). doi:10.1360/s11434-016-1005-2
- 王珏,肖艳姣,冷亮,等.2022. 2021 年 5 月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析[J].*暴雨灾害*,41(2):119-129. Wang J, Xiao Y J, Leng L, et al. 2022. Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(2):119-129 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.002
- 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
- 吴翀.2018.双偏振雷达的资料质量分析,相态识别及组网应用[D].南京:南京信息工程大学. Wu C. 2018. Data quality analysis, hydrometeor classification and mosaic application of polarimetric Radars in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 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

- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等.2006.一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. 2006. Doppler radar analysis on a series of downburst events [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,17(4): 385–393 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.04.001
- 张晗昀,罗昌荣,崔梦雪,等.2020.利用 AMDAR 数据分析厦门、泉州双雷达三维风场反演误差[J].*大气科学学报*,43(4):699–706. Zhang H Y, Luo C R, Cui M X, et al. 2020. Error analysis of the three-dimensional wind field retrieval from the Xiamen-Quanzhou radars by using AMDAR data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,43(4): 699–706 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190401001
- 郑永光,田付友,孟智勇,等.2016.“东方之星”客船翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J].*气象*,42(1):1–13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016. Survey and multiscale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing” [J]. *Meteorological Monthly*,42(1):1–13(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.001
- Doswell C A III. 1984. Mesoscale aspect of a marginal severe weather event [C]//10th Conference on Weather Forecasting and Analysis: 131-137
- Doviak R J, Ray P S, Strauch R G, et al. 1976. Error estimation in wind fields derived from dual-Doppler radar measurement [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,15(8):868–878. doi:10.1175/1520-0450(1976)015<0868:EEIWF>2.0.CO;2
- Fujita T T. 1978. Wind shear at Dulles airport on May 18 1977 [R]. SMRP Research Paper:159
- Fujita T T. 1981. Rotations 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
- Fujita T T. 1985. The downburst, microburst, and macroburst [R]. SMRP Research Paper Number:210
- Fujita T T, Wakimoto R M. 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980 [J]. *Monthly Weather Review*, 109(7):1438–1456. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<1438:FSOAAW>2.0.CO;2
- Fu D H, Luo G X. 2007. Numerical study on a severe downburst-producing thunderstorm on 23 August 2001 in Beijing [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,24(2):227–238. doi:10.1007/s00376-007-0227-2
- Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W. 1988. Observations of a storm containing mesocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations [J]. *Monthly Weather Review*,116(10):1959–1982. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1959:OOASCM>2.0.CO;2
- Kuster C M, Bowers B R, Carlin J T, et al. 2021. Using K_{dp} cores as a downburst precursor signature [J]. *Weather and Forecasting*,36(4): 1183–1198. doi:10.1175/WAF-D-21-0005.1
- Kuster C M, Heinselman P L, Schuur T J. 2016. Rapid-update radar observations of downbursts occurring within an intense multicell thunderstorm on 14 June 2011 [J]. *Weather and Forecasting*,31(3):827–851. doi:10.1175/WAF-D-15-0081.1
- Mahale V N, Zhang G F, Xue M. 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, downburst through dual-polarization radar observations and hydrometeor classification [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,55(12):2635–2655. doi:10.1175/JAMC-D-16-0062.1
- Mahoney K M, Lackmann G M. 2011. The sensitivity of momentum transport and severe surface winds to environmental moisture in idealized simulations of a mesoscale convective system [J]. *Monthly Weather Review*,139(5):1352–1369. doi:10.1175/2010MWR3468.1
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes [M]. Chichester:Wiley-Blackwell:407
- McCann D W. 1979. On overshooting-collapsing thunderstorm tops [C]// 11th Conf on Severe Local Storms:427-432
- Nielsen E R, Schumacher R S. 2018. Dynamical insights into extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,75(9):2983–3009. doi:10.1175/JAS-D-17-0385.1
- Parker M D, Borchardt B S, Miller R L, et al. 2020. Simulated evolution and severe wind production by the 25-26 June 2015 nocturnal MCS from PECAN [J]. *Monthly Weather Review*,148(1):183–209. doi:10.1175/MWR-D-19-0072.1
- Proctor F H. 1989. Numerical simulations of an isolated microburst. Part II: sensitivity experiments [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(14):2143–2165. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<2143:NSOAI M>2.0.CO;2
- Richter H, Peter J, Collis S. 2014. Analysis of a destructive wind storm on 16 November 2008 in Brisbane, Australia [J]. *Monthly Weather Review*,142(9):3038–3060. doi:10.1175/MWR-D-13-00405.1
- 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:APMNP>2.0.CO;2
- Schenkman A D, Xue M. 2016. Bow-echo mesovortices: a review [J]. *Atmospheric Research*,170:1–13. doi:10.1016/j.atmosres.2015.11.003
- Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al. 2015. A Z_{DR} column detection algorithm to examine convective storm updrafts [J]. *Weather and Forecasting*,30(6):1819–1844. doi:10.1175/WAF-D-15-0068.1
- Wakimoto R M. 1985. Forecasting dry microburst activity over the high plains [J]. *Monthly Weather Review*,113(7):1131–1143. doi:10.1175/1520-0493(1985)113<1131:FDMAOT>2.0.CO;2
- Wakimoto R M, and Bringi V N. 1988. Dual-polarization observations of microbursts associated with intense convection: the 20 July storm during the MIST project [J]. *Monthly Weather Review*,116(8):1521–1539. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1521:DPOOMA>2.0.CO;2
- Wakimoto R M. 2001. Convectively Driven High Wind Events [M]. Severe Convective Storms. Boston:American Meteorological Society: 255-298
- Wang Y, Chandrasekar V. 2009. Algorithm for estimation of the specific differential phase [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,26(12):2565–2578. doi:10.1175/2009JTECHA1358.1
- Weisman M L. 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,50(4):645–670. doi:10.1175/1520-0469(1993)050<0645:TGOSLL>2.0.CO;2
- Zhu Y Q, Zhou A, Zhao K, et al. 2025. The observed and simulated evolution of a microburst using X-band phased-array radar data assimilation with EnKF [J]. *Journal of Geophysical Research*,130(1):1–18. doi:10.1029/2024JD042614