

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]. Meteor. Mon., 47(2):242-252(in Chinese).

桂林一次强下击暴流成因分析*

李彩玲¹ 蔡康龙^{1,2} 黄先香^{1,2} 植江玲¹ 陈志芳¹ 麦文强¹

¹ 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528315

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 2019 年 3 月 21 日广西桂林市临桂区发生一次极端大风天气过程(以下简称“3·21”临桂大风), 当日 21:13 临桂观测站记录最大阵风风速为 $60.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17 级)。通过风灾现场调查判断这是强度为 EF2 级的微下击暴流过程。应用常规观测资料以及加密自动气象站、探空、多普勒雷达等资料, 分析了“3·21”临桂大风的环流背景与影响系统及其形成原因。结果表明: 低层暖湿气流活跃, 中层显著干层, 强的低层垂直风切变是大风发生的有利条件, 地面中尺度辐合线、冷锋南压为其提供了触发机制。“3·21”临桂大风由 2 个超级单体风暴合并加强造成, 在下击暴流发生前, 风暴单体最强反射率因子核心高度(HGT)超过 6 km, 有中等强度中气旋伴随, 中层径向辐合明显, 辐合值达 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 当反射率因子减弱、风暴顶高下降、HGT 下降时, 下击暴流发生; 当 HGT 剧降, 一个体扫间隔下降 3.5 km, 17 级极端大风发生, 低层 0.5° 仰角在强中气旋的出流区观测到强的径向辐散, 其值达 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 中气旋表现出最强切变加强, 底高迅速下降到 1 km 以下等特征。本次下击暴流发生与极端强降水和冰雹的拖曳作用有密切关系, 冰雹与雨水粒子的拖曳和融化蒸发作用使下击暴流加强。当分钟降水量大于 3 mm 时, 风速超过 12 级; 当分钟降水量大于 6 mm 时, 则出现 17 级极大风速。

关键词: 下击暴流, 低层径向速度辐散, 中层径向辐合, 中气旋, 下降的反射率因子核心

中图分类号: P445, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.010

Cause Analysis of a Severe Downburst in Guilin

LI Cailing¹ CAI Kanglong^{1,2} HUANG Xianxiang^{1,2}

ZHI Jiangling¹ CHEN Zhifang¹ MAI Wenqiang¹

¹ Foshan Tornado Research Center/Foshan Meteorological Office of Guangdong Province, Foshan 528315

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: An extreme gale event, hereinafter referred to as “3.21 Lingui gale event”, occurred in Lingui, Guangxi on 21 March 2019. Maximum gust of $60.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Grade 17) was recorded at the Lingui Station at 21:13 BT. Based on the results of the wind damage survey with video and meteorological data, this paper shows that the serious wind damage was caused by a severe microburst. Using the data from conventional meteorological observations, dense automatic weather station, radiosonde, Doppler weather radar, this paper analyzes the environmental conditions and influencing systems of the “3.21 Lingui gale event”. Results are that the “3.21 Lingui gale event” occurred under some favorable conditions such as active low-level warm and humid air flow, mid-level significant dry layer and strong low-level vertical wind shear. The event was triggered by the surface mesoscale convergence line and the southward cold front. The “3.21 Lingui gale event” was caused by the merging of two supercells into one supercell. Before the downburst

* 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-A03, 2018LASW-B18)和佛山市气象局科技项目(201906)共同资助

2019 年 11 月 5 日收稿; 2020 年 12 月 28 日收修定稿

第一作者: 李彩玲, 主要从事龙卷等强对流天气的分析与研究. E-mail: 35440483@qq.com

occurred, the supercell developed to the most powerful stage. The maximum reflectivity core height (HGT) exceeded 6 km. There was a medium intensity of the mesocyclone accompanied by the (mid-altitude radial convergence, MARC) value of $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When the downbursts occurred, reflectivity factor began to weaken, the height of storm top dropped and HGT dropped. When HGT dropped sharply, the scanned volume interval dropped by 3.5 km, and the extreme gale of Grade 17 occurred. At this time, the low-level 0.5° elevation was observed in the high-altitude area of the cyclone, with a high radial divergence value of $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The mesocyclone had the strongest wind shear strengthening, the bottom height rapidly dropped to less than 1 km, and so on. In addition, the occurrence of downburst was closely related to the dragging effect of extreme severe precipitation and hail. Usually, when the minutely rainfall is higher than 3 mm, wind force is higher than Grade 12; when the minutely rainfall is higher than 6 mm, the extreme gale of Grade 17 occurs.

Key words: downburst, low-level radial velocity divergence, mid-altitude radial convergence (MARC), mesocyclone, drop of reflectivity factor core

引言

Fujita and Byers(1977)、Fujita and Wakimoto(1981)总结了强对流风暴导致的3类灾害性大风包括:龙卷大风、直线大风和下击暴流大风。龙卷大风路径一般相对比较狭窄,通常是高度辐合的旋转性风场,而下击暴流大风是有明显辐散特征的直线或曲线型大风(郑永光,2016b)。下击暴流多产生于发展成熟的强雷暴云中,是一种局部性的强下沉气流,风速超过 $17.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地面气流为辐散或直线型的灾害大风,根据下击暴流灾害范围和影响时间,又可分为微下击暴流和宏下击暴流,微下击暴流空间尺度小于4 km,时间尺度小于10 min,而宏下击暴流空间尺度大于4 km,时间尺度大于10 min。

国内外很多学者对下击暴流进行过相关研究。康岚等(2018)、盛杰等(2019)从下击暴流发生的环境条件和形成机理进行了详细分析,指出中层干冷,大的温度垂直递减率,高低空急流耦合等有利于下击暴流的发生;孙凌峰等(2003)、刘洪恩(2001)利用数值模式模拟指出,下击暴流产生的直接原因是降水的重力拖曳作用引起,其次是冰雹的融化和雨水蒸发的冷却作用。Potts(1989)认为下击暴流最可靠的特征是地面辐散,在多普勒速度图上表现为在雷达径向上的“牛眼”回波,并针对下击暴流下降的反射率因子核心和低层强辐散的流场特征,开发了基于多普勒天气雷达资料的下击暴流自动识别算法。由于环境风场的影响,这种特征并不一定非常对称。Schmocker et al(1996)也提出,中层径向辐

合(MARC)是下击暴流的一个重要特征,可以用于弓状回波识别下击暴流。Roberts and Wilson(1989)在研究了31个发生在美国科罗拉多州的下击暴流及其相应的风暴单体后,得出结论:利用下降的反射率因子核、反射率槽口、雷暴云中径向辐合以及旋转可以预报下击暴流。Eilts et al(1996)研究了85个在不同环境体制中形成的灾害性下击暴流后,得到了与Roberts相类似的结论。可以预报下击暴流的特征是:一个迅速下降的反射率因子核;强并且深厚的中层辐合(地面上2~6 km);产生下击暴流的单体的反射率因子核往往出现在比其他单体的反射率因子核更高的高度。近年来,俞小鼎等(2006b)、毕旭等(2007)、吴芳芳等(2009)、李向红等(2010)、刁秀广等(2011)、伍志方等(2014)、罗辉等(2015)、唐明晖等(2016)、费海燕等(2016)、李强等(2019)利用我国新一代天气雷达资料分析了发生在安徽、陕西、江苏、山东、湖北等地的下击暴流过程,指出下降的反射率因子核心并伴随云底以上的速度辐合的雷达回波特征,以及等效位能差、出流强度等可以用来提前预警下击暴流。

2019年3月21日21:13(北京时,下同)广西壮族自治区桂林市临桂区出现了17级极端大风,临桂区国家气象观测站(以下简称临桂观测站)及其附近的桂林师范高等专科学校临桂校区(以下简称桂林师专)等地出现了明显灾情,由于风灾发生在夜间,没有直接清晰的视频或照片资料佐证风灾类型,引起了社会对风灾类型的热议,佛山市龙卷风研究中心在风灾发生后赶赴现场,汇同桂林市气象局进行了详细的灾情调查,综合分析判断这是一次微下击

暴雨天气过程,蔡康龙等(2021)对本次过程的风灾调查进行了详细分析,本文补充说明了本次下击暴流现场灾情调查特征和气象观测特征,并应用常规观测资料以及加密自动气象站资料、探空资料、多普勒雷达资料等对这次风灾过程进行分析,总结雷达监测特征以及初步探讨了下击暴流的成因,为今后风灾现场调查和下击暴流的短时临近预警提供可借鉴的经验。

1 天气实况与灾情调查概况

2019年3月21日20—22时,广西壮族自治区柳州市融水、柳城,桂林市临桂、临川、全州等县区自西北向东南出现了短时强降水、雷雨大风、冰雹等强对流天气(以下简称“3·21”临桂大风),强降水主要集中在临桂中部几个乡镇,有3个国家气象观测站和5个自动气象站记录8级以上大风,其中临桂观测站出现了17级的极端大风。

从临桂观测站的气温、气压、相对湿度、风向、风速、降水量六要素变化可见(图1),临桂观测站3月21日21:08记录最大阵风风速为 $17.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8级),随后风速直线上升,21:09、21:10、21:11、21:12、21:13最大阵风风速分别为 $24.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (9级)、 $32.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11级)、 $34.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)、 $44.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (14级)、 $60.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (17级),而21:13相距几米外的备份测风仪测得 $59.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风速,期间风向从东北风转西北风再转偏西风,出现了逆时针旋转;21:00—21:30的30 min降水量为44.3 mm;21:10—21:12气压在2 min内下降了3 hPa,21:12—21:14气压又在2 min内上升了6.4 hPa,其中21:13气压数据为缺测值,对缺测原因做分析,气压仪1 min采集30个数值,气压陡降陡升,采样差值大,采集器认为出现错误数值,按缺测进行了质量控制。尽管有缺测,但前后数据说明在短时间内出现了巨大气压差,证明发生了猛烈的大风。由此可见,临桂观测站在21:10—21:12降水逐渐增强,气压下降,气温下降,风速直线上升,湿度上升,21:12—21:14降水骤增,气压陡升,风速达到最大值。

从临桂观测站的监控视频判断,21日21:00—21:13观测站附近自西北向东南受强对流天气影

响,风速递增,21:13前后遭遇了极大风速,致使监控信号中断,风向由东北转西北,为直线型大风,没有出现风向旋转,监控视频拍摄的情况与观测数据相符。受灾现场灾情指示物倒伏方向有明显的辐散状,其中存在多处百米量级的辐散条迹,为下击暴流条迹(郑永光等,2016a;2018),受灾明显处有多株直径大于30 cm的樟树被连根拔起,铁皮屋顶被掀翻,砂浆围墙倒塌等,根据McDonald and Mehta(2006)EF等级对风灾的定级标准判定,此次下击暴流强度最强达EF2级,风灾强度等级判断与临桂观测站观测的17级阵风风速相符。

以上分析可见,临桂观测站17级极端大风出现前后,其周边有多个国家气象观测站或自动气象站测得8~11级的瞬时大风,临桂观测站风速是线性增加的,且与备份测风仪测得的风速相差较小,由此判断临桂观测站17级大风的风速测量值是合理可信的。通过现场灾情调查并结合观测站温压湿观测数据等,综合判断这是一次强度为EF2级,影响长度在2 km范围的微下击暴流过程,影响时间为21:09—21:14(6 min),其中包含多个 β 小尺度(40~400 m)下击暴流条迹。

2 环流背景与影响系统

2.1 天气形势

由3月21日20时综合分析图可见(图2a):“3·21”临桂大风发生前,高层200 hPa高空急流位于长江流域一带,急流轴由贵州、湖南、江西中北部一直延伸至日本,急流中心风速达 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,临桂区处于其入口右侧;在500 hPa,临桂处于高空小槽前,受西南气流影响,西南风急流位于广西中部、湖南南部、江西中南部一带,临桂处于急流轴左侧;850 hPa从北部湾到北海、梧州一带有偏西南急流在临桂一带辐合;从温度露点差($T-T_d$)的高低空配置来看,临桂恰好处于850 hPa $T-T_d\leq 2^\circ\text{C}$,500 hPa $T-T_d\geq 30^\circ\text{C}$ 区域,上干下湿形势明显;在地面场上,21日20时冷空气前锋南压至江西中南部、湖南南部至广西东北部一带,湖南、广东、广西交界处有地面辐合线存在,23时冷空气前锋已经过境临桂观测站到达广西中部一带。

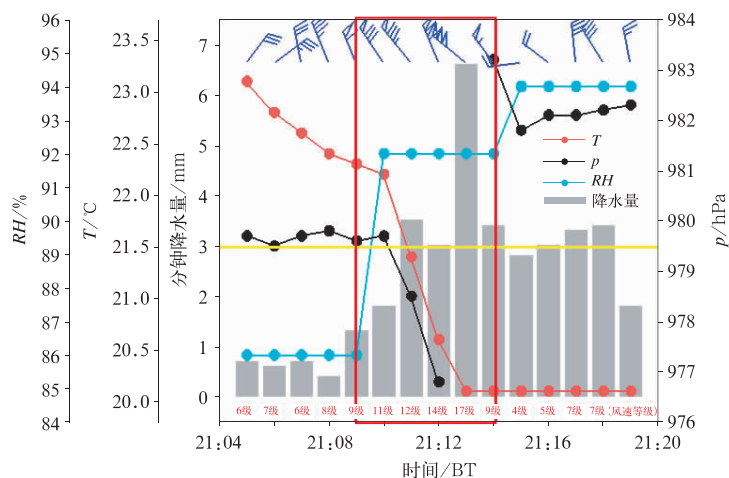


图1 2019年3月21日21:04—21:20桂林市临桂观测站各要素演变趋势
(红框表示下击暴流发生时段,黄线表示分钟降水量为3 mm)

Fig. 1 Variation of weather elements at Lingui Automatic Weather Station in 21:04–21:20 BT 21 March 2019

(Red box is the time for downburst, yellow line is 3 mm contour of minutely rainfall)

2.2 大气层结条件

分析桂林站3月21日20时的探空资料可见(图略),温度层结曲线是明显的上干下湿结构,低层暖平流明显,风场由1000 hPa弱的西南风($1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)顺转为500 hPa强盛的偏西风($31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),0~6 km的垂直风切变达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,850~700 hPa的 $T-T_d < 2^\circ\text{C}$,而700~400 hPa平均和最大的 $T-T_d$ 分别达19.5和 35°C ,远高于我国极端雷暴大风发生的平均值13.6和 25.7°C ,表明本次对流发生前中层处于非常干的环境,利于极端大风的发生(马淑萍等,2019);850与500 hPa温度差达 25°C ,温度垂直递减率大,有利于强冰雹、区域性的雷暴大风天气的出现。用850、700、500和300 hPa这4层的平均风向风速表征风暴承载层的风向风速,21日20时桂林站风暴承载层平均风速达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均风向为 240°),已超过2002—2017年我国95个极端大风个例的最大值(马淑萍等,2019),统计数据表明,风暴承载层平均风速越大,越有利于中层干冷空气的夹卷过程,致使下沉气流动量下传,对地面大风贡献也越大(高晓梅等,2018)。

3月21日20时强对流天气发生前,桂林站K指数达到 39°C ,SI指数为 -3.02°C ,二者均表明在强对流天气发生前桂林附近大气层结不稳定,对流有效位能(CAPE)为 $769.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,虽然不算大,

但足以为强对流提供充足的抬升能量,最大上升速度为 $39.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而1 km以下有弱的对流抑制有效位能(CIN),有利于能量的积聚。22日08时强对流天气发生后,临桂观测站K指数明显减小,SI指数为正值,CAPE和CIN均为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,从另一方面也反映了此次过程伴有强烈的能量释放。

2.3 地面中尺度辐合线

从广西国家气象观测站风场分析看(图2b和2c),随着冷空气东移南压,21日20:00广西中北部有一东北—西南走向的中尺度辐合线逐渐南压,同时,在该辐合线附近开始出现东北—西南向的带状云系(图略),21:05地面辐合线南压到临桂观测站,风场由东南风逆转为东北风,同时,21:05—21:20以临桂为中心,桂林、永福和雁山附近维持一中尺度气旋式涡旋存在,有利于对流云系在临桂附近加强发展。21:25—21:30,中尺度涡旋伴随地面切变线南压到雁山以南减弱,降水云系逐渐南压减弱。

以上分析表明,“3·21”临桂大风发生在高空槽前强西南气流区,低空暖湿气流活跃,西南气流在临桂附近汇合,中层存在显著干层,风暴承载层平均风速大,0~6 km垂直风切变强等,均表现出有利于地面极端大风的发生,而地面中尺度涡旋、冷锋南压为本次强对流产生提供了触发机制。

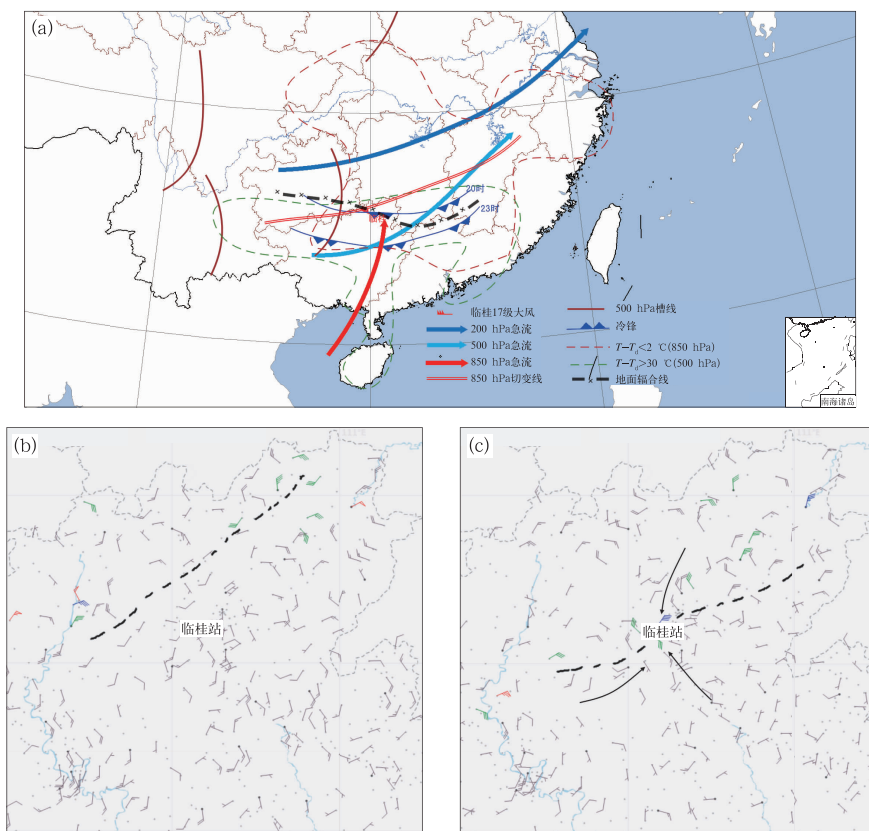


图 2 2019 年 3 月 21 日 (a)20:00 综合分析,
(b)20:00 和 (c)21:05 地面风场演变

Fig. 2 (a) Comprehensive analysis at 20:00 BT 21 March, (b, c) evolution of surface wind at (b) 20:00 BT and (c) 21:05 BT 21 March 2019

3 雷达资料分析

桂林雷达站距离临桂观测站约 16 km, 受雷达静锥区影响, 强对流风暴影响临桂观测站附近时, 最大探测高度在 8 km 以下, 对回波的垂直结构观测有一定影响。并且反射率因子强度图(图略)显示, 在 0.5° 和 1.5° 仰角的 $230^\circ \sim 270^\circ$ 方向上有遮挡, 因此下文分析反射率因子强度演变使用 2.4° 仰角资料。3 月 21 日 21:06—21:12 仅在 19.5° 仰角可观测到三体散射特征(TBSS), 尽管雹块扩展到地面, 但 19.5° 以下均未能观测到 TBSS 特征, 此时风暴距离雷达站在 20 km 内, 19.5° 仰角以下对风暴的探测高度在 6 km 以下, 三体散射回波可能位于风暴体回波内而无法辨认。

文中用到的雷达资料包括反射率因子、径向速度、风暴编号、风暴参数、垂直累积液态含水量(VIL)、最大反射率因子($R_{\max}$)及其所在高度(HGT)以及

中气旋参数等。

3.1 雷达回波演变特征

从 3 月 21 日 20—22 时雷达回波的演变分析可知(图 3a), “3·21”临桂大风是由一编号为 E0 的超级单体风暴引起。21 日 20:00 一条东北—西南向的多单体线状回波带自桂林柳州两市交界处向东南方向移动, 回波的走向和移动方向与地面辐合线的一致(图 2b), 回波带南侧有 2 个强度大于 55 dBz 的超级单体风暴, 其编号分别为 A0(268/52)和 E0(265/67), A0 和 E0 向东南方向移动过程逐渐靠近, 21:00—21:06 回波带到达临桂观测站前, 风暴 A0 并入 E0, 使 E0 强度迅速加强, 并在随后的两个体扫时间里(21:12 和 21:18)自西北向东南过境临桂观测站。

分析 21:00—21:18 反射率因子和径向速度的垂直剖面(图 3b, 沿雷达径向经过临桂观测站做剖面)可见, 超级单体风暴有钩状回波特征, 低层有入

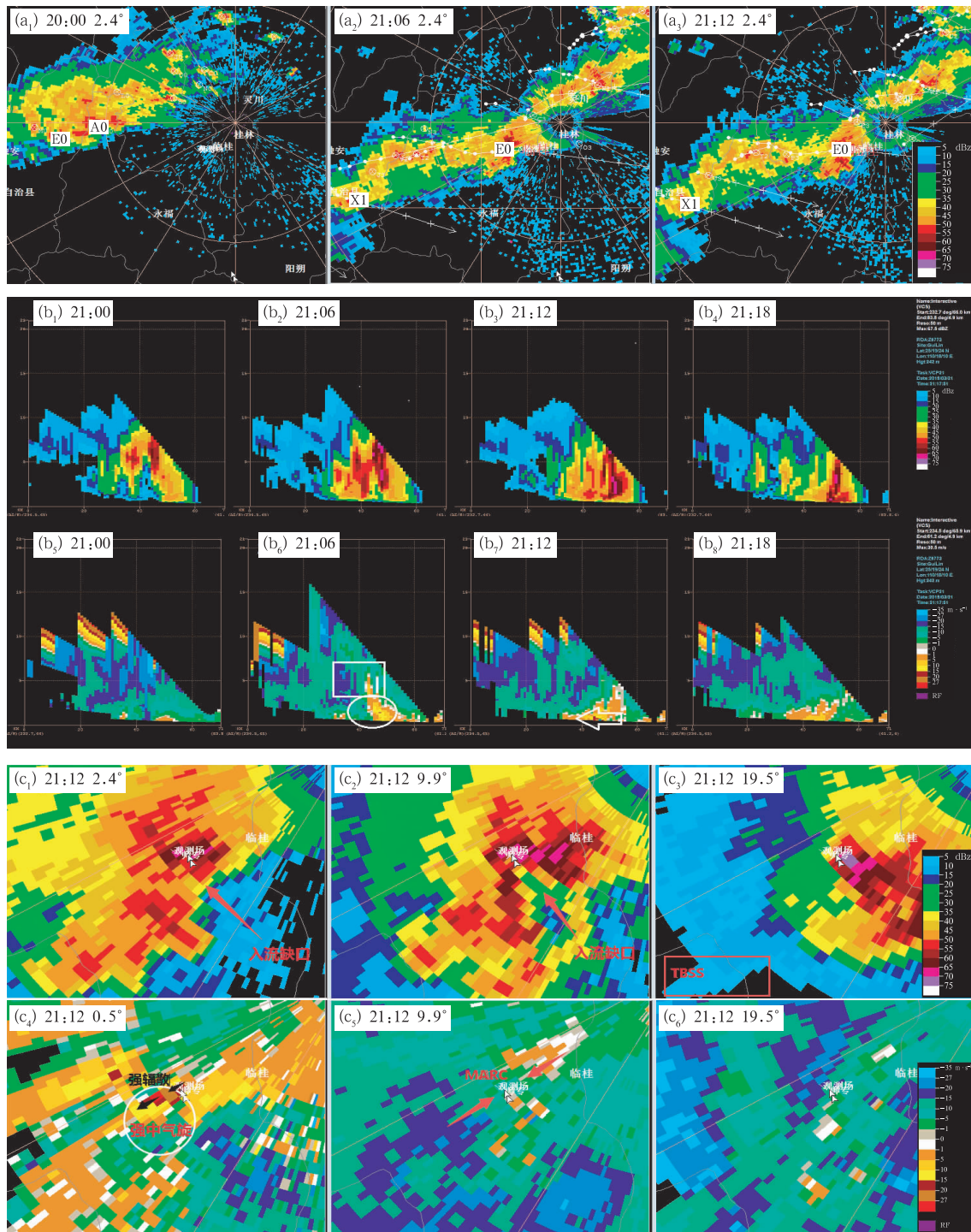


图3 2019年3月21日(a)20:00—21:12反射率因子演变,
 (b)21:00—21:18沿雷达径向过临桂观测站的(b₁~b₄)反射率因子和(b₅~b₈)径向速度的垂直剖面,
 (c)21:12仰角为(c₁)2.4°、(c₄)0.5°、(c₂,c₅)9.9°和(c₃,c₆)19.5°的(c₁~c₃)反射率因子和(c₄~c₆)径向速度
 Fig. 3 (a) Evolution of radar reflectivity at 20:00—21:12 BT, (b) the radial and Lingui Automatic
 Weather Station cross-section of (b₁—b₄) radar reflectivity and (b₅—b₈) racial velocity
 in 21:00—21:18 BT, (c₁—c₃) radar reflectivity and (c₄—c₆) radial velocity at
 (c₁) 2.4°, (c₄) 0.5°, (c₂, c₅) 9.9° and (c₃, c₆) 19.5° at 21:12 BT March 21 2019

流缺口,反射率因子在垂直方向上向强入流一侧(东南方)倾斜。21:06 超级单体风暴反射率因子核心维持在 5 km 以上,中层回波悬垂和有界(BWER)弱回波区明显,上升气流强盛,在对流风暴的中层(3~6 km)有 MARC 特征(白色方框),辐合值达 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与超级单体风暴伴随的中气旋达到中等强度(白色椭圆), 19.5° 仰角监测到三体散射特征,可见此时风暴处于快速发展阶段;21:12 反射率因子核下降到 2~3 km,有界弱回波区消失。由图 3c 可见,中气旋强度加强为强中气旋($23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),直径达 2~3 km,临桂观测场位于中气旋的出流区,出流辐散值达 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3c 黑色箭头所指),距离地面高度为 400~500 m,表明此时有强下沉气流已经到达地面, 19.5° 仰角仍监测到三体散射特征;21:18 反射率因子核下降到地面,对应径向速度图上低层是弱的辐散。对流风暴成熟阶段平均移动方向为 280° ,偏向风暴承载层平均风右侧 40° ,移动速

度为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,是风暴承载层平均风速的 53%,由此可见,风暴承载层平均风速远远大于风暴移动速度,使超级单体风暴得以维持或加强,利于下沉气流动量下传,促使下击暴流的发生(高晓梅等,2018)。

21:00—21:18 下击暴流发生前后,从雷达上连续识别出中气旋或三维切变的只有 X1 和 E0 两个风暴单体(图 3a),从表 1 可见,与风暴 E0 相关的中气旋直径从 3.7 km 缩小到 2.7 km,逐渐紧缩加强,最强切变从 $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 加大到 $15 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,底高在 21:12—21:18 期间迅速下降到 0.2 km;而风暴 X1 的反射率因子强度在 50~60 dBz,中气旋直径是一个减小又增大的过程,最强切变虽然比较大,但底高维持在 2.6 km 以上,风暴 X1 给永福县带来短时强降水和 5 级左右阵风。可见,风暴单体的中气旋直径紧缩,强度增加,最强切变加强,中气旋底高骤降并下降到 1 km 以下,更利于地面大风的发生。

表 1 2019 年 3 月 21 日 21:00—21:18 中气旋特征

Table 1 Features of mesocyclone in 21:00—21:18 BT 21 March 2019

时间/BT	风暴编号	方位/ $^\circ$	距离/km	平均直径/km	底高/km	最强切变/ (10^{-3} s^{-1})
21:00	X1	241	89.8	3.3	5.3	29
	E0	229	28.6	3.7	3.0	8
21:06	X1	245	88.1	2.0	4.2	33
	E0	220	25.3	2.8	4.4	11
21:12	X1	246	86.0	5.4	2.7	3
	E0	231	21.3	2.9	0.2	13
21:18	X1	250	85.3	6.1	2.6	5
	E0	222	20.0	2.7	0.2	15

3.2 风暴特征分析

超级单体风暴 A0 并入 E0 前(20:00—20:54)(图略), R_{max} 在 60~67 dBz 波动增大,HGT 先升后降,风暴强反射率因子核从中层(20:36 前)逐渐下降,可见 A0 强度变化不大,逐渐从中层向地面发展。

从 E0 的风暴参数看(图 4),E0 经历了波动变化到迅速增强的过程,其中 20:24—20:48 呈现波动变化过程,20:48—21:06 随着 A0 靠近并入后迅速增强,风暴顶高发展到 6.8 km,底高向下发展到 0.2 km, R_{max} 增大到 71 dBz,HGT 达到 6.6 km,可见此时风暴体最大、反射率因子最强;21:06—21:12 风暴体略有下降, R_{max} 略减小、VIL 略降,HGT 略降,降幅为 0.6 km,此时段下击暴流发生,风速线性

增加;21:12—21:18 风暴体下降、 R_{max} 减小、VIL 下降,HGT 骤降,从 6 km 下降到 2.5 km,降幅达 3.5 km,此时段风速骤增,下击暴流加强。

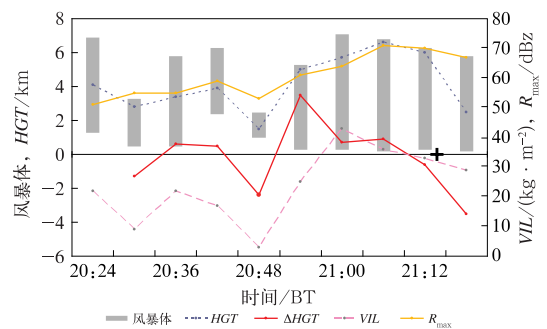


图 4 2019 年 3 月 21 日 20:24—21:18

风暴 E0 各参数随时间的变化

Fig. 4 The parameters of Storm E0 in 20:24—21:18 BT 21 March 2019

图5为21:12—21:18下击暴流加强期间,各风暴单体 HGT 及 HGT 差,可见 21:12 HGT 超过 4 km 的风暴有 3 个,超过 6 km 的风暴有 2 个(E0 和 Y1); 21:18 有 2 个风暴的 HGT 上升,其他风暴的 HGT 均有所下降,下降高度超过 1 km 的风暴有 2 个,超过 3 km 的仅有 1 个(E0),可见只有风暴 E0 同时具有较高的 HGT 和较快的下降速度,可以判断该风暴为造成此次强下击暴流的风暴。

以上分析表明,21:06—21:12 超级单体风暴核心下降,MARC 明显,地面风速线性增大,下击暴流发生;21:12—21:18 超级单体风暴核心进一步下降到地面,中气旋流出区出现强辐散,下击暴流进一步加强,风速剧增达到极大值。可见,在下击暴流到达地面之前,表现出反射率因子核心持续下降,径向速度上有 MARC 的特征,这与俞小鼎等(2006a)的研究结论一致,可以为下击暴流预警提供重要判定依据。

4 极端大风成因分析

强烈下沉气流的产生受到 3 个因素的影响,包括降水粒子负载、浮力和垂直扰动气压梯度力(俞小鼎等,2012)。孙凌峰等(2003)通过数值模拟得出,有些下击暴流的爆发以风暴反射率因子核的下降为前兆,因此可以判断降水(冰雹和雨滴)的拖曳作用是下击暴流产生的主要初始动力,冰雹融化和雨水蒸发冷却作用是次要原因;周后福等(2017)研究指

出,当 6 min 降水达 4 mm 以上时,是发生下击暴流的征兆之一。通过 3.1 和 3.2 节分析可见,此次下击暴流的发生以反射率因子核心下降为前兆,下文对此次下击暴流发生前后降水粒子的拖曳作用、浮力和垂直扰动气压梯度力等方面进行分析,对下击暴流的形成原因进行初步探讨。

4.1 降水粒子的拖曳作用

图6为临桂观测站逐分钟降水量和风速演变图,由图可见,风速变化和降水强度有很好的对应关系,3月21日21:08—21:14降水量迅速递增,对应风速线性增大,下击暴流发生。21:11—21:14分钟降水量在 3 mm 以上,地面风速在 12 级以上,其中 21:13—21:14 的分钟降水量达 6.6 mm,此时段内 HGT 下降速度非常快,空气中降水粒子较大,拖曳作用强,此时风速增大到极大值(17 级),降水的极端强度远远超过周后福等(2017)研究的下击暴流发生征兆的雨量值,21:15—21:16 降水量有所下降,风速明显下降(4~5 级),21:17—21:18 的分钟降水量再次在 3 mm 以上,风速对应有所增大过程(7 级)。可见,降水的拖曳作用在本次下击暴流中起启动和增强作用。由 3.1 节雷达回波演变分析可知,在下击暴流发生前,21 日 21:06 反射率因子和径向速度图上均出现了 TBSS,表明风暴中有大冰雹存在,并在地面出现了 2 cm 左右的冰雹,21:12 TBSS 维持,21:18 TBSS 消失。因此,冰雹和雨滴的下降拖曳是本次下击暴流发生和加强的主要原因。

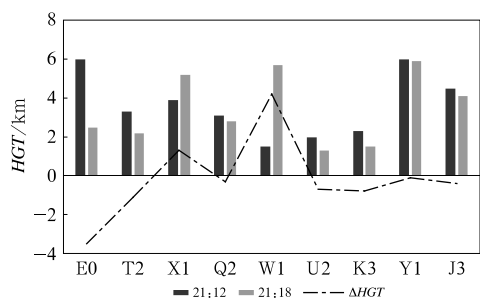


图5 2019年3月21日21:12—21:18下击暴流加强期间各风暴 HGT 及 Δ HGT (负值表示下降高度,正值则表示上升高度)

Fig.5 The HGT of the storms and HGT difference during downburst developing intensification in 21:12—21:18 BT 21 March 2019 (Negative value indicates descending height, positive value indicates ascending height)

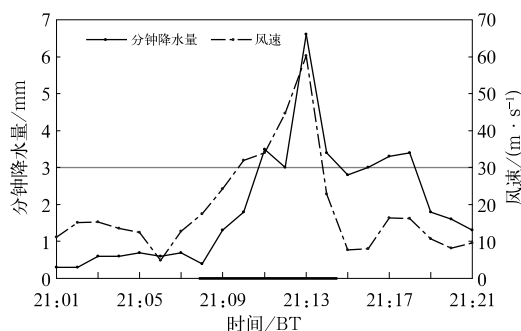


图6 2019年3月21日21:01—21:21分钟降水量和最大瞬时风速 (黑色横线为下击暴流时间, 灰色横线为分钟降水量 3 mm 线)

Fig.6 Minutely rainfall and maximum instantaneous wind speed in 21:01—21:21 BT 21 March 2019 (Black line is the time for downburst, gray bold line is minutely rainfall 3 mm contour)

4.2 负浮力和气压梯度力作用

本次过程中对流层中上层存在明显干层,且风暴承载层风速大,风暴周边相对干的空气被夹卷进入风暴,使得下沉气流内雨滴或冰雹迅速蒸发造成下沉气流降温,下沉气流内温度明显低于环境温度而产生向下的负浮力,导致下沉气流加速下降,同时对流层中下层环境温度垂直递减率大,利于下沉气流负浮力进一步加大(俞小鼎等,2012;章国材,2011)。从下击暴流发生前后地面气温的明显降低,大致可以说明负浮力情况。下击暴流发生前,临桂观测站气温为 25.5°C ,21:08 气温下降到 22.4°C ,降幅达 3.1°C ,21:13 极大风发生时,气温下降到最低(20.1°C)后维持,可见下击暴流过程前后降温幅度达 5.4°C ,按 1°C 温差造成的浮力可抵消约 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水物质产生的重力拖曳, 5.4°C 的温差造成的负浮力效应大致相当于 $21.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的重力拖曳作用。另外,本次过程超级单体发展成熟时中气旋底高向地面发展,导致 21:12 地面中气旋附近气压下降,与下沉气流在地面附近形成的高压间产生强的气压梯度,雷暴内下沉气流到地面后在该强烈气压梯度作用下风速也得以进一步加强。

以上分析可见,本次下击暴流的发生以反射率因子核下降为前兆,且雷暴云中有冰雹下降到地面,在下击暴流启动时,分钟降水量大于 3 mm ,气温下降大于 3°C ,风线性增大,降雨和冰雹的拖曳及水成物的蒸发造成的负浮力效应为下击暴流的启动提供主要贡献;下击暴流加强时,分钟降水量大于 6 mm ,冰雹等各种水凝物在重力拖曳作用加速下沉,气温在 3 min 内降幅大于 2°C , 2 min 气压上升大于 6 hPa ,风速剧增,出现 17 级极大风速,由此可以推断,本次下击暴流首先由于雨水和冰雹粒子的拖曳作用触发产生,伴随大的降水粒子和冰雹的下降,水成物蒸发造成的负浮力增大以及强大气压差使得下击暴流得以加强。

5 结 论

(1)2019 年 3 月 21 日桂林市临桂区 17 级极端大风过程是一次空间尺度在 2 km 范围内、时间尺度为 6 min 、强度为 EF2 的微下击暴流过程,其中包

含多个 β 小尺度下击暴流条迹,现场灾情调查和气象观测实况吻合。

(2)“3·21”临桂大风是发生在高空槽、切变线及地面冷空气共同配合的大尺度环境条件下,具有低空暖湿气流活跃,中层存在显著干层,大的温度垂直递减率,强的低空垂直风切变等有利条件,地面中尺度辐合线、冷锋南压为本次强对流产生提供了触发机制。

(3)本次下击暴流是由 2 个超级单体风暴合并加强后引起,下击暴流发生前超级单体风暴具有反射率因子核心下降、MARC 特征,当反射率因子开始减弱、风暴顶高下降、HGT 下降时,下击暴流发生;当 HGT 剧降时,下击暴流加强,17 级大风发生地位于中气旋出流区强辐散中心,辐散值达 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中气旋有最强切变加强,底高迅速下降到 1 km 以下等特征。

(4)下击暴流造成的地面风速线性增加与雨强有密切关系,本次过程出现极端的分钟级降水量,当分钟降水量大于 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,风速超过 12 级,当分钟降水量大于 $6\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,出现 17 级极大风速。初始大风首先由雨水和冰雹粒子的拖曳作用引起,在下降过程中负浮力的热力不稳定和气压梯度力也加剧了下沉运动。

致 谢:感谢桂林市气象局在现场灾情调查过程给予的大力支持和协助。

参考文献

- 毕旭,罗慧,刘勇,2007. 陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J]. 气象,33(1):70-73. Bi X, Luo H, Liu Y, 2007. Doppler radar echo features of a downburst in central part of Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 33(1):70-73(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 37(5):522-531(in Chinese).
- 蔡康龙,俞小鼎,李彩玲,等,2021. 2019 年广西临桂微下击暴流和广东湛江龙卷现场灾情调查对比分析[J]. 气象,47(2):230-241. Cai K L, Yu X D, Li C L, et al, 2021. Comparative analysis of damage survey of micoburst in Lingui, Guangxi and tornado in Zhanjiang, Guangdong in 2019[J]. Meteor Mon, 47(2):230-241(in Chinese).
- 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析[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]. Meteor Mon, 42(12):1513-1521(in Chinese).
- 高晓梅,孙雪峰,秦瑜蓬,等,2018. 山东一次强对流天气的环境条件和对流风暴特征[J]. 干旱气象, 36(3):447-455. Gao X M, Sun X F, Qin Y P, et al, 2018. Environmental conditions and convective storm features of a severe convective weather process in Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 36(3):447-455(in Chinese).
- 康岚,刘炜桦,肖递祥,等,2018. 四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J]. 气象, 44(11):1414-1423. Kang L, Liu W H, Xiao D X, et al, 2018. Analysis on formation reason and forecast of an extreme gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 44(11):1414-1423(in Chinese).
- 李强,王秀明,张亚萍,等,2019. 一次副高影响下的局地强风暴触发及维持机制探析[J]. 气象, 45(2):203-215. Li Q, Wang X M, Zhang Y P, et al, 2019. Analysis and explanation on triggering and maintaining mechanism of a localized severe storm under the influence of subtropical high[J]. Meteor Mon, 45(2):203-215(in Chinese).
- 李向红,唐熠,郑传新,等,2010. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象, 36(8):61-71. Li X H, Tang Y, Zheng C X, et al, 2010. The analysis of the radar echo features for many kinds of convective events[J]. Meteor Mon, 36(8):61-71(in Chinese).
- 刘洪恩,2001. 微下击暴流的特征及其数值模拟[J]. 气象学报, 59(2):183-195. Liu H E, 2001. Characteristics and numerical simulation of microburst[J]. Acta Meteor Sin, 59(2):183-195(in Chinese).
- 罗辉,张杰,朱克云,等,2015. 下击暴流的雷达预警量化指标研究[J]. 气象学报, 73(5):853-867. Luo H, Zhang J, Zhu K Y, et al, 2015. Study of the radar quantitative index of forewarning downburst[J]. Acta Meteor Sin, 73(5):853-867(in Chinese).
- 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]. J Appl Meteor Sci, 30(3):292-301(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019. 2018年一次罕见早春飏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]. Meteor Mon, 45(2):141-154(in Chinese).
- 孙凌峰,郭学良,孙立潭,等,2003. 武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究[J]. 大气科学, 27(6):1077-1092. Sun L F, Guo X L, Sun L T, et al, 2003. A numerical study of the airplane disaster-producing microburst on 22 June 2000 in Wuhan[J]. Chin J Atmos Sci, 27(6):1077-1092(in Chinese).
- 唐明晖,姚秀萍,杨湘婧,等,2016. 基于多普勒天气雷达资料的“6.1”监利极端大风成因分析[J]. 暴雨灾害, 35(5):393-402. Tang M H, Yao X P, Yang X J, et al, 2016. Cause analysis of an extreme gale event occurred in Jianli on 1 June 2015 based on Doppler weather radar data[J]. Torr Rain Dis, 35(5):393-402(in Chinese).
- 吴芳芳,王慧,韦莹莹,等,2009. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 35(1):55-64. Wu F F, Wang H, Wei Y Y, et al, 2009. Analysis of a strong gust front and downburst with Doppler weather radar data[J]. Meteor Mon, 35(1):55-64(in Chinese).
- 伍志方,庞古乾,贺汉青,等,2014. 2012年4月广东左移和飏线内超级单体的环境条件和结构对比分析[J]. 气象, 40(6):655-667. Wu Z F, Pang G Q, He H Q, et al, 2014. Comparative analysis of environmental conditions and structural features for the left moving supercell and the supercell in squall line in April 2012 Guangdong[J]. Meteor Mon, 40(6):655-667(in Chinese).
- 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, Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Doppler Weather Radar Principles and Operational Applications[M]. Beijing: China Meteorological Press(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]. J Appl Meteor Sci, 17(4):385-393(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 章国材,2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:338-400. Zhang G C, 2011. Severe Convection Weather Analysis and Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press: 338-400(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1):1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016a. Survey and multi scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1):1-13(in Chinese).
- 郑永光,田付友,周康辉,等,2018. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查[J]. 气象科技进展, 8(2):55-61. Zheng Y G, Tian F Y, Zhou K H, et al, 2018. Forecasting techniques and damage survey of convectively driven high winds and tornadoes[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2):55-61(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016b. 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, 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province [J]. Meteor Mon, 42(11):1289-1303(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]. J Arid Meteor, 35(4):641-648(in Chinese).
- 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, Byers H R, 1977. Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner[J]. Mon Wea Rev, 105(2):129-146.
- Fujita T T, Wakimoto R M, 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980[J]. Mon Wea Rev, 109(7):1438-1456.
- McDonald J R, Mehta K C, 2006. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale)[R]. Lubbock: Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University.
- Potts R, 1989. Microburst precursors observed with Doppler radar [C] // 24th Conference on Radar Meteorology. Tallahassee: AMS; 158-162.
- Roberts R D, Wilson J W, 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar[J]. J Appl Meteor, 28(4): 285-303.
- Schmocker G K, Przybylinski R W, Lin Y J, 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature [C] // 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting. Norfolk: AMS; 306-311.