

江苏弱垂直风切变下的下击暴流雷达回波特征统计研究*

熊希颖^{1, 2} 王秀明² 俞小鼎²

1 湖北省气象台, 武汉 430074

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

摘要: 基于 12 部 SA 型多普勒天气雷达观测资料, 对 2019–2020 年 6–9 月江苏下击暴流样本集的风暴结构特征进行了统计分析, 结果表明: 弱垂直风切变天气背景下, 下击暴流风暴回波强度较强, 反射率因子核均值为 57 dBz, 距地面高度为 5.2 km, 脉冲风暴占比约 33.3%, 多伴有反射率因子核心高度下降和垂直累积液态水含量下降特征, 平均下降速度慢, 特征持续 1~2 个体扫, 预警时间提前量 0~12 min; 伴随阵风锋的比例为 47%, 风暴移速和阵风锋移速均慢, 均值约为 7 m s⁻¹; 中层径向辐合等特征占比不高, 约 33.3% 下击暴流风暴伴有中层径向辐合特征, 而弱回波区、后侧入流和中涡旋特征占比均不足 10%, 但脉冲风暴以及伴有中层径向辐合等特征的下击暴流强度更强, 且多在下击暴流出现后再次出现更强下击暴流; 中层径向辐合等特征持续时间集中在 12~36 min, 下击暴流和最强下击暴流预警时间提前量分别为 0~24 min 和 6~36 min。上述量化结构特征增加了对下击暴流风暴的了解, 表明仅部分下击暴流可基于业务天气雷达预警, 弱动力强迫下的下击暴流预警存在局限性。

关键词: 弱垂直风切变, 下击暴流, 风暴结构特征, 预警时间提前量

Statistical Study on the Radar Echo Characteristics of Downbursts Under Weak Vertical Wind Shear in Jiangsu Province

XIONG Xiyong^{1,2} WANG Xiuming² YU Xiaoding²

1 Hubei Meteorological Observatory, Wuhan 430074

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the observation data of 12 SA-Doppler weather radars, this paper statistically analyzes the storm structure characteristics of the downburst samples collected in Jiangsu Province from June to September during 2019–2020. The results show that under weak vertical wind shear, downburst storms exhibit stronger echo intensities, with the average reflectivity core value reaching 57 dBz, and the height above the ground getting to 5.2 km. About 1/3 of the downburst storms are pulse storms, often accompanied by a descending height of reflectivity core (DRC) and a decreasing vertical integrated liquid water content (VIL). The average decline speed

* 国家自然科学基金项目 (U2142203、41875058 和 42375018)、国家重点研发计划课题 (2022YFC3004104)、中国气象局短时临近预报教学科研团队项目和中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD07)共同资助

第一作者: 熊希颖, 主要从事天气雷达产品应用与短时临近天气预报研究.E-mail: 1074791779@qq.com

通讯作者: 王秀明, 主要从事灾害性强对流天气观测与数值模拟研究.E-mail: wangxm@cma.gov.cn

is slow with the feature persisting for 1–2 volume scans and the lead time of warning being 0-12 min. The accompanying gust fronts account for 47% of the downburst storm cases and the moving speeds of both storms and gust fronts are about 7 m s^{-1} . The proportions of mid-altitude radial convergence (MARC) and other radar signatures are not high. About 1/3 of the downburst storms are related to MARC, while weak echo zone, rear inflow, and meso-vortices occur in fewer than 10% of the cases. However, the pulse storms and the downbursts with MARC or other features in the middle layer tend to be more intense, and much stronger downbursts often reoccur after the initial appearance of downbursts. The duration of MARC and other features primarily lasts for 12-36 min, and downbursts and the most intense downbursts can be warned 0-24 min and 6-36 min ahead of time, respectively. The above quantitative structural characteristics advance the understanding of downburst storms, indicating that operational weather radars can only provide warnings for part of downbursts, and there are still limitations in warning downbursts under weak dynamic forcing.

Key words: weak vertical wind shear, downburst, storm structure characteristics, lead time of warning

引言

下击暴流最初由 Fujita (1976) 提出, 并指出其在航空领域对飞机起降的危害。研究表明, 导致飞机事故的多为水平出流尺度在 4 km 以下的微下击暴流 (Fujita, 1981; Wilson et al, 1984; Lundgren et al, 1992)。而后在气象领域, 下击暴流被进一步定义为可在地面或近地面产生破坏性大风的强下沉气流及其出流 (Fujita, 1978), 并根据水平出流尺度分为三类: 微下击暴流(4 km 以下)、宏下击暴流(4~10 km)、下击暴流簇(10 km 以上)(Fujita and Wakimoto, 1981; Johns and Doswell III, 1992; Wakimoto, 2001; Smith et al, 2004; 王秀明等, 2023)。

多普勒天气雷达是监测下击暴流的重要观测设备, 其时空分辨率高, 能够观测引发下击暴流的风暴结构特征演变以及近地面出流情况。1978 年, Fujita 等人首次利用多普勒天气雷达进行了下击暴流的外场观测试验, 发现了下击暴流的径向速度形态特征, 包括径向速度大值区和辐散速度对, 以及强下击暴流风暴在雷达回波图上呈现的弓形形态, 为下击暴流的预警提供了参考依据 (Fujita, 1981; Wilson and Wakimoto, 2001)。Wilson et al (1984) 进一步总结了微下击暴流的统计特征, 包括雷达径向速度的辐散高度、径向风速、下击暴流尺度及持

续时间等。Roberts and Wilson (1989) 基于雷达观测给出了微下击暴流风暴四项先兆预警特征：(1) 连续下降的反射率因子核心；(2) 后侧入流缺口；(3) 增强的中层径向辐合；(4) 旋转特征，这些特征通常在下击暴流触地前 2~6 min 出现。

随着我国多普勒天气雷达布网的逐渐完善，气象学者也开展了大量下击暴流相关观测研究。孤立风暴导致的下击暴流，常伴随反射率因子核心下降、中层径向辐合增强等特征（俞小鼎等，2006；2020；梅婵娟等，2020；禹梁玉等，2021；李亚琴等，2023）。超级单体结构特征更为明显，雷达特征清晰且持续时间长，可产生致灾严重的极端或较为连续的大风，预警时间也更长（周后福等，2017；李彩玲等，2021；吴海英等，2023）。飏线、弓形回波等中等到强垂直风切变下的对流风暴引发的雷暴大风风力强，雷达特征显著（方翀等，2015；王一童等，2022；陈晓欣等，2022；王秀明等，2023；郭云云等，2024）。王福侠等（2016）、杨璐等（2018）、龙柯吉等（2020）基于雷达回波形态，对产生强风的带状、弓状、块状回波雷达特征进行了分类统计，指出孤立对流风暴的样本占比高但预警难度较大。

在弱垂直风切变环境下，风暴多表现为组织性相对差的一般单体、脉冲风暴或多单体风暴。熊希颖等（2025）统计表明，弱的动力强迫环境下（副高控制且弱垂直风切变）下击暴流发生频率较高。这类下击暴流相较超级单体大风、飏线大风等从强度、尺度、破坏力等方面来说均显著弱，但其发生频次高，监测预警难度大，对飞行安全特别是低空飞行有较大影响，我国目前尚无专门针对弱动力强迫下的下击暴流风暴结构特征的大样本统计研究。Roberts and Wilson (1989) 基于 31 个微下击暴流的外场观测结果给出的风暴雷达特征被广泛应用于个例分析中，这些雷达特征是否可用于我国下击暴流的监测预警仍有待大样本检验。值得注意的是，上述广泛应用的雷达特征通常在下击暴流触地前 2~6 min 出现，表明其预警时间提前量极为有限。为了提升对弱垂直风切变的下击暴流风暴结构的认识，进而为此类下击暴流监测预警提供量化参考依据，文章对熊希颖等（2025）筛选的下击暴流样本集的雷达特征及其相对下击暴流的时间提前量进行统计分析。

1 资料与方法

1.1 资料

研究区域及观测站点的空间分布如图 1 所示，包括江苏及其周边共 12 部 S 波段雷达站、4 个探空站和地面自动气象观测站。本研究基于江苏 2019–2020 年 6–9 月在副高控制且弱垂直风切变环境下，发生在雷达站 60 km 内的 525 个下击暴流样本开展，并根据其水平出流尺度进一步划分为：114 次微下击暴流（0~4 km）、250 次宏下击暴流（4~10 km）和 161 次下

88 击暴流簇（10 km 以上）（筛选方法及标准详见熊希颖等，2025）。

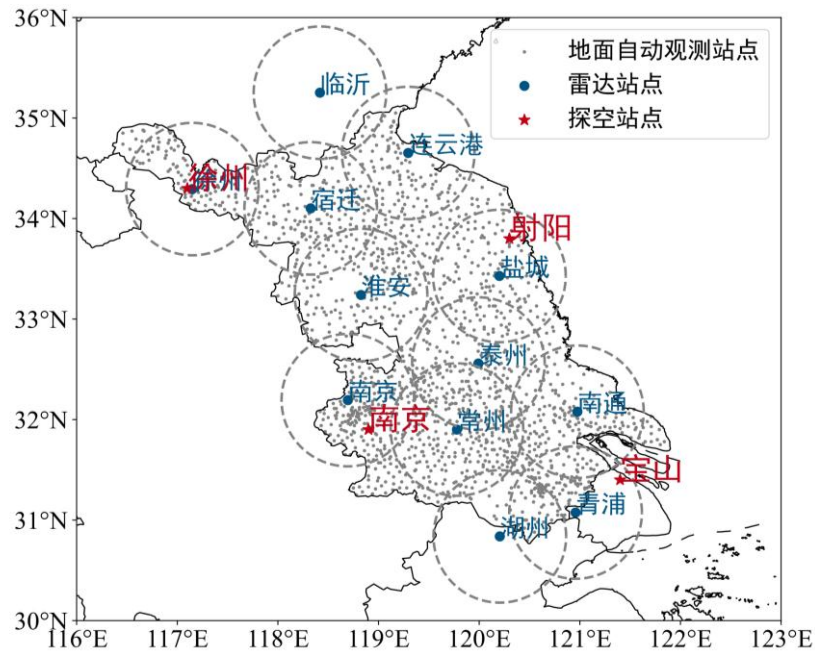


图 1 研究区域内观测站分布

Fig.1 Distribution of observation stations in the study area

89
90
91
92
93 本研究对上述下击暴流样本的对流风暴的雷达回波结构特征进行统计，即仅针对弱动力
94 强迫（副高控制、弱垂直风切变）下的下击暴流开展研究。统计使用上述 12 部 S 波段天气
95 雷达基数据回放的产品，包括：径向分辨率 1 km 的 19 号反射率因子产品、径向分辨率 0.5 km
96 的 26 号径向速度产品、58 号风暴追踪信息产品（STI）、62 号风暴结构产品（SS），时间分
97 辨率均为 6 min。

98
99 **1.2 雷达回波特征统计方案**

100 熊希颖等（2025）规定下击暴流事件的统计时段为：1）一般情况下，以雷达 0.5° 仰角
101 上 17 m s^{-1} 的低层径向速度首次出现时刻为节点，分别向前、后延伸 5 个体扫和 10 个体扫，
102 将这 1.5 h 作为统计时段；2）若低仰角大风在 10 个体扫后持续存在，结合雷达回波强度及
103 其与雷达中心距离，适当延长结束时间；3）对于因发展导致尺度变化的下击暴流事件，根
104 据尺度阈值划分每类下击暴流统计时段。对于由孤立对流单体导致的下击暴流，将统计时段
105 内所有单体列为风暴样本；若下击暴流由大范围连续回波产生，雷达 STI 产品识别出的单体
106 多且生消快，选取其中与大风位置最近的最强单体作为风暴样本。525 次下击暴流共筛选出
107 4585 个体扫用于统计以下反射率因子和径向速度特征。

反射率因子类特征：反射率因子核心强度和高度、反射率因子核心下降（DRC）特征及下降速度、弱回波区（WER）、垂直累积液态水含量（VIL）及其减小特征。径向速度类特征：低仰角（ 0.5° ）径向速度、中层径向辐合（MARC）、中涡旋、后侧入流（RI）、风暴单体移速、阵风锋移速。其中，风暴单体移速特征值取自雷达基数据回放的 STI，风暴反射率因子核心强度、高度及 VIL 取自 SS。对 DRC 及 VIL 值减小特征，若没有明显的连续下降过程，即如果下降特征仅持续一个体扫且下降幅度小（反射率因子核心高度下降不超过 0.2 km；VIL 值减小量不超过 2 kg m^{-2} ），不计入统计样本。

Roberts and Wilson（1989）提出的后侧入流缺口特征缺乏客观判识标准，后侧入流缺口或单体弓形回波本质上是较强的 RI 作用结果，因此本研究仅统计 RI，即风暴后侧朝向其移动方向的径向流入速度。统计过程中亦发现弓形回波或后侧入流缺口特征出现比例极低。统计规定 MARC、RI、中涡旋（旋转速度和尺度阈值均不及中气旋）特征的高度范围均为 2~7 km，强度阈值分别为辐合强度 $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ 、RI 强度 $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ 、旋转速度 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$ ，对于中涡旋，还要求其涡旋特征至少在两个连续仰角上出现。当风暴特征存在时，统计各体扫特征强度、高度、尺度值。在雷暴母体影响范围内，于同一仰角或同一高度上识别辐合区的径向速度对，计算正、负速度中心差值，取多个连续仰角或高度上的最大值作为 MARC 强度，并记录其对应的高度，MARC 尺度则为正、负速度中心的距离，通常小于 10 km。中涡旋强度定义为以雷达径向为中心左右排列的速度对的最大旋转速度，同样记录其高度和尺度（表 1）。

记录各项特征首次出现时间，计算其相对雷达低仰角 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 径向速度和最大径向速度的时间提前量和特征持续时间。

表 1 下击暴流风暴雷达特征统计方案

Table 1 Statistical scheme for radar characteristic parameters of downburst storms

特征	强度	高度	水平尺度
MARC	径向速度对中心最大速度差	最强辐合速度对对应的高度	最强辐合速度对中心距离
中涡旋	最大旋转速度	最强旋转速度对对应的高度	最强旋转速度对中心距离
RI	风暴后侧最大径向流入速度	风暴后侧 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 径向入流的 伸展上界	—
WER	弱回波区上方反射率因子核心 最大值	WER 强度所在高度	—

- 阵风锋的识别方法有以下两种，满足其一即认为下击暴流伴随阵风锋：
- 0.5° 仰角反射率因子图像上，在下击暴流风暴周围有环形或弧形窄带回波；
 - 0.5° 仰角径向速度图像上，在下击暴流风暴前沿有正、负速度形成的弧形辐合线。

在风暴样本统计时段内，记录阵风锋出现和消失时间，当其首次出现时，标记风暴前侧阵风锋曲率最大位置作为特征点，逐体扫描追踪特征点沿阵风锋扩散方向的位置变化，测距并计算移速。若阵风锋在统计时段起始时刻已存在或在统计结束时仍未消失，取统计时段起始或结束时刻的阵风锋位置进行计算。

对统计结果量化处理：1) 是否存在对应特征及占总体样本的比例；2) 强度、高度、尺度等特征值分布；3) 特征持续时间分布；4) 特征相对雷达低仰角 $\geq 17^\circ$ 径向速度和最大径向速度出现的提前时间。

2 下击暴流风暴雷达特征统计结果

2.1 雷达特征占比

525 个下击暴流样本的风暴结构特征所占比例如图 2。伴随 DRC 特征的对流风暴比例最高，为 74%，与王一童（2022）对超级单体风暴中该项特征的统计结果相近（77%）。弱垂直风切变下，风暴单体生命史短、生消快，在其衰亡过程中伴随 DRC 和 VIL 降低（70%）。此外，分别有 86 个和 58 个样本观测到反射率因子核心高度和 VIL 的二次下降。该现象主要与多单体风暴有关，多个单体的下沉导致下击暴流事件持续时间较长，且在雷达低仰角首次探测到 $\geq 17^\circ$ 径向风后出现更强的径向风，约 52%伴随 DRC 和 VIL 下降的样本后续出现了更强风。

以往研究（Eilts et al, 1996；高帆等，2023）表明，MARC 是下击暴流最常见的风暴结构特征之一，比例高达 80%。而本研究仅 32%样本（图 2）识别出 MARC 特征，比例显著偏低。强垂直风切变下有组织的强风暴同时存在倾斜强上升和下沉气流，而弱垂直风切变下的下击暴流风暴中上升和下沉气流近乎叠置且持续时间短，MARC 特征不易识别。此外，本研究所选样本均发生在距雷达站 60 km 内，有部分距雷达站较近的风暴难以探测到其径向速度图上完整的中层（2~7 km）结构，类似情况发生在 Roberts and Wilson（1989）的研究中，其距雷达 30 km 范围内的 31 个微下击暴流样本中，云内（3~8 km）和云底（3 km 以下）径向辐合增强的比例分别为 45%和 81%，有 35%的样本观测不到云底以上的径向特征。

中涡旋、WER 和 RI 特征的伴随比例均不足 10%，其中 RI 仅 5%。一般来说，中层 RI 与较强的风暴下沉出流相关性强，水平动量随下沉气流向下传输，从而出现近地面辐散大风概率高，强后侧入流急流对飑线和弓形回波系统下致灾大风有重要贡献（王福侠等，2016；高帆等，2023），但本研究统计结果 RI 的比例非常低。WER 指示风暴中强上升气流，上升气流强下沉气流亦较强，多单体强风暴多具有 WER 特征；中涡旋表明风暴具有一定的组织

性，且上升气流相对强。

在弱垂直风切变环境下，下击暴流风暴 DRC 和 VIL 下降占比较高，MARC 占比约 1/3，其他特征低于 10%。Roberts and Wilson(1989)基于微下击暴流统计提出的四项先兆特征中，除 DRC（48%）外，其他特征比例均高于本研究。原因在于其使用三部雷达进行协同外场观测，雷达数据空间分辨率为 0.15 km，体扫周期为 2~2.5 min，其时空分辨率远高于本研究的 6 min 和 0.5 km。此外多雷达反演对于云内涡旋和径向辐合等与速度有关的特征探测能力更强，本研究要求至少 2 个连续仰角存在涡旋速度对亦会导致涡旋占比低。多个与速度有关的雷达特征占比低，表明用现有的业务雷达基于风暴雷达特征预警弱动力强迫下的下击暴流风暴存在一定难度。

尽管由于探测原因，下击暴流风暴的部分雷达特征占比不高，但由于本研究样本总量大，各类特征样本数仍有几十个，可通过进一步统计增加对下击暴流风暴特征的认识。

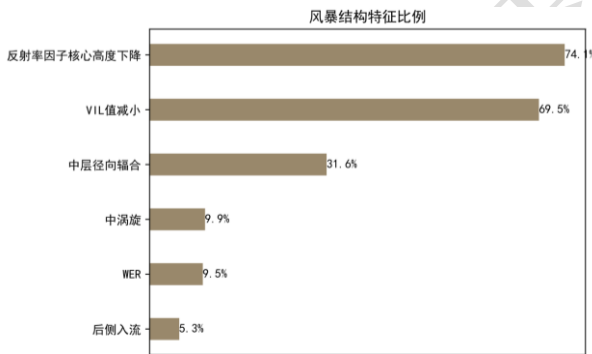


图 2 2019—2020 年 6—9 月江苏下击暴流对流风暴雷达回波特征比例（样本量：525）

Fig 2 The proportion of radar echo characteristics accompanying downburst storms in Jiangsu Province from June to September in 2019–2020 (525 samples)

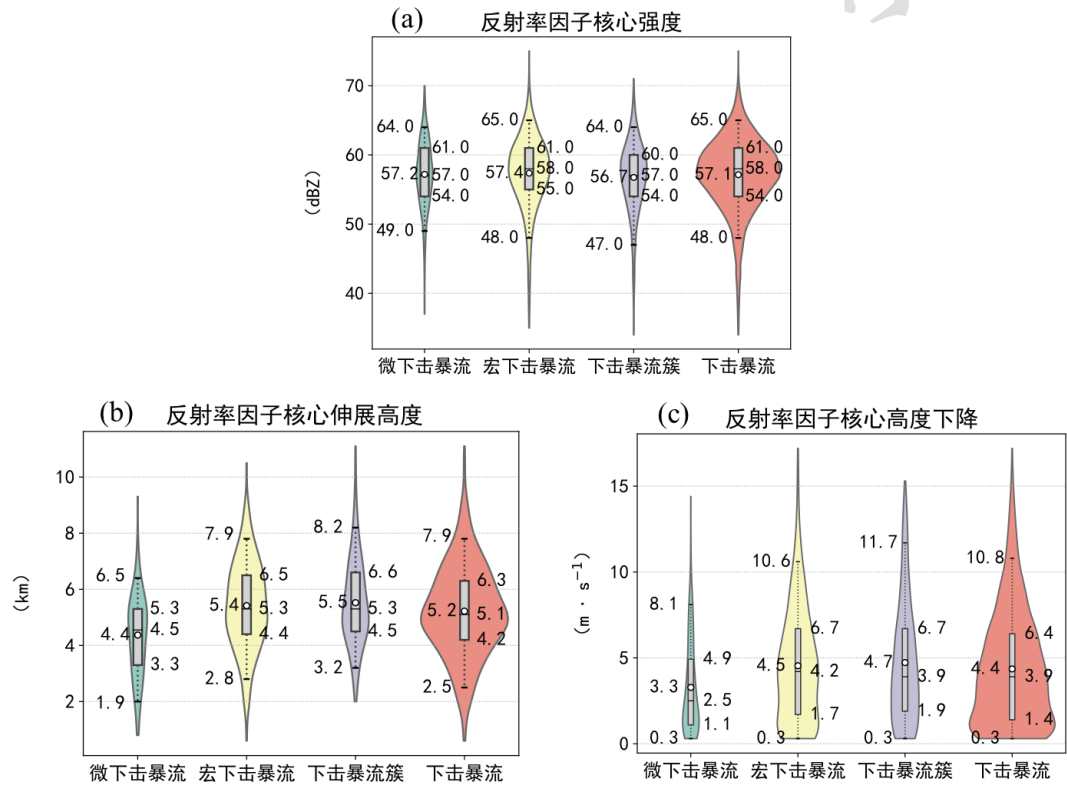
2.2 风暴结构量化特征

2.2.1 反射率因子核心和 VIL

反射率因子核心相关特征值的统计结果如图 3 所示。统计时段内风暴反射率因子核心强度平均值为 57 dBz，50%分位值和概率密度最大值均为 58 dBz，三类下击暴流差异不大（图 3a），表明在副高控制的低层高湿环境下，引发下击暴流的风暴回波强度强且维持时间长，为伴有降水的湿下击暴流。统计时段内，反射率因子核心的平均高度为 3 km，伸展高度的统计平均值为 5.2 km，其中微下击暴流、宏下击暴流、下击暴流簇分别为 4.4、5.4、5.5 km（图 3b），核心平均下降速度为 $4.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （每个体扫时间下降约 1.6 km），微下击暴流风暴的反射率因子核心高度和下降速度均小于宏下击暴流和下击暴流簇风暴，三类下击暴流风暴

187 的反射率因子核心下降速度概率密度最大值约为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，表明大部分样本下降速度较慢
188 （图 3c）。

189 脉冲风暴是弱垂直风切变下的强风暴，其回波结构有三个特征：初始回波高度高（6~9
190 km）、回波中心强度强（>50 dBZ）、强回波中心高度高（-10℃等温线高度附近）（俞小鼎，
191 2011；王秀明等，2013）。脉冲风暴的核心特征是其较强的上升气流，上述三个回波特征均
192 为强上升气流的表象特征，但由于风暴本身组织性差，强上升气流持续时间不长，脉冲风暴
193 伴随的下击暴流与水凝物粒子相变和拖曳有关。受雷达观测时空分辨率所限，对于接续产生
194 的对流风暴生消演变过程，初始回波的判识比较困难，其高度难以捕捉，而基于反射率因子
195 核强度及其伸展高度两个指标亦可判识脉冲风暴。统计表明，在 525 个样本中，有 30.1%（158
196 个样本）的下击暴流在其统计时段内反射率因子核心高度达到 6 km 以上，其中有 16.6%（87
197 个样本）先于下击暴流出现。若以反射率因子核心强度>50 dBZ 且伸展高度 $\geq 6 \text{ km}$ 作为脉
198 冲风暴的判识标准，则有近 33.3%的下击暴流与脉冲风暴相关。



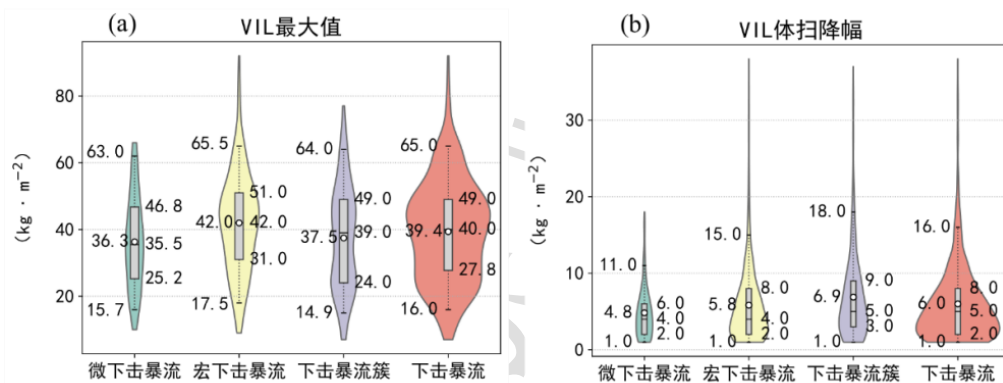
199
200 图 3 2019—2020 年 6—9 月江苏不同类型下击暴流风暴的反射率因子核心 (a) 强度 (样本量: 4585)、(b)
201 伸展高度 (样本量: 525) 和 (c) 下降速度 (样本量: 901) 统计

202 Fig.3 Statistics of the reflectivity factor cores of different types of downburst storms in terms of (a) intensity
203 (sample size: 4585), (b) vertical extension height (sample size: 525), and (c) descent speed (sample size: 901) in
204 Jiangsu Province from June to September in 2019—2020

205

206 风暴样本的 VIL 统计结果如图 4。VIL 统计平均最大值为 39 kg m^{-2} ，概率密度最大值约
207 为 48 kg m^{-2} （图 4a），每个体扫时间平均减小 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ （图 4b）。同时，风暴回波强度较
208 强、强回波伸展高度较高，表明大部分下击暴流风暴内有冰雹粒子。东高红和吴涛（2007）
209 将天津 6–7 月 VIL 超过 40 kg m^{-2} 及其快速减小特征作为地面灾害性大风的预警指标，时间
210 提前量为 12~18 min。图 4 表明，弱垂直风切变环境下约有 50.0% 的下击暴流风暴样本 VIL
211 达到 40 kg m^{-2} ，微下击暴流风暴的 VIL 极值及其减小速度均小于另两类下击暴流风暴。

212 下击暴流风暴的 DRC 和 VIL 减小特征变化基本一致，特征出现比例高（74.1% 和 69.5%），
213 但持续时间短，预警时间提前量少。DRC 通常持续 6~12 min，孤立风暴大多在雷达低仰角
214 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 径向速度出现后逐渐衰亡，反射率因子核心不再下降，VIL 减小过程也趋于结束。
215 DRC 及 VIL 减小特征在雷达低仰角 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 径向速度和最大径向速度出现前 0~12 min 出
216 现。



217

218 图 4 2019—2020 年 6—9 月江苏不同类型下击暴流风暴的 (a) VIL 最大值 (样本量: 525) 和 (b) VIL 每
219 个体扫时间降幅 (样本量: 1241) 统计

220 Fig.4 Statistics of different types of downburst storms in terms of (a) maximum VIL (sample size: 525) and (b)
221 VIL decreasing speed at per volume scan (sample size: 1241) in Jiangsu Province from June to September in
222 2019—2020

223 王一童（2022）对超级单体风暴特征的统计结果显示，60 dBz 以上强回波伸展高度达
224 6~9 km，VIL 高（平均值 56 kg m^{-2} ），风暴中伴随大冰雹的概率高，水凝物粒子拖曳作用使
225 得反射率因子核心下降速度更快（平均值 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），VIL 减大幅度大（平均每个体扫时间
226 减小 9.0 kg m^{-2} ）。因而本研究样本风暴中 DRC 及 VIL 减小速度均较超级单体风暴显著偏低。
227 Wang et al（2023a）等统计表明，产生 8 级以上地面大风的风暴特征反射率因子核心强度、
228 高度及 VIL 值分布峰值分别约为 55 dBz、4.5 km 和 20 kg m^{-2} 。本研究关注的弱垂直风切变
229 环境下击暴流，虽地面大风均值低于 8 级，但上述三个风暴特征峰值均更高，且 DRC 和 VIL

230 值的下降幅度更为显著，表明盛夏弱动力强迫下的下击暴流风暴具有更强的水凝物载荷。

231 **2.2.2 中层径向辐合等特征**

232 由图 2 可见，弱垂直风切变环境下 WER、RI、MARC、中涡旋特征出现比例低，对达
233 到标准的特征统计结果见表 2。总体而言，弱垂直风切变下下击暴流风暴的各特征强度均显
234 著低于以往强风暴的研究结果，特别是表征强上升气流的 WER 高度（平均值 4.7 km）及其
235 强度（平均值 60 dBz），以及与下沉出流密切相关的 RI 强度（平均值 21 m s^{-1} ）。王一童（2022）
236 统计表明，超级单体 WER 上方反射率因子核心强度为 62.5~65 dBz，位于距地 7 km 高度
237 以上，RI 强度平均值接近 26 m s^{-1} 。中等到强垂直风切变环境下致灾强风暴的统计研究结果
238 也表明，强风暴后侧入流急流伴随比例可达 100%，强度 27 m s^{-1} 以上，较普通风暴结果显
239 著偏高（杨璐等，2018；高帆等，2023）。

240 Eilts et al (1996)认为强度超过 22 m s^{-1} 的 MARC 与致灾大风相关，以往研究 (Schmocker,
241 1996; 俞小鼎等, 2020) 建议将 25 m s^{-1} 的 MARC 强度作为雷暴大风预警标准。弱垂直风
242 切变环境下风暴 MARC 强度均值为 22.5 m s^{-1} ，有约 25% 的样本达到 25 m s^{-1} 标准。MARC
243 有时并不完全沿雷达径向分布，为辐合式旋转。中涡旋强度平均值为 12.5 m s^{-1} ，概率密度
244 最大值为 11 m s^{-1} 。Yu et al (2012)、王易等 (2018)、王一童等 (2022) 统计表明，中气旋
245 的旋转速度多为 $15\sim 25 \text{ m s}^{-1}$ ，表明弱垂直风切变下，中涡旋不仅识别概率低，强度亦较弱。
246 Wang et al (2023a, b) 对湖北地区风暴（多为非线性状对流系统）统计显示，约 80% 的样本不
247 伴随旋转特征或旋转速度低于 5 m s^{-1} ，即使伴随旋转其旋转速度多低于 10 m s^{-1} （约占 18%）。
248 本研究旋转速度高频区约 11.1 m s^{-1} ，出现频率约 10%。二者均表明风暴内旋转不显著。

249 表 2 风暴样本的特征统计结果

250 Table 2 Statistics of characteristic parameters of storm samples

特征	比例（样本数）	强度	高度	水平尺度
WER	9.5% (50)	平均值 60.2 dBz	平均值 4.7 km	—
		概率密度最大值 61.5 dBz	概率密度最大值 4.4 km	
RI	5.3% (28)	平均值 $20.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均值 5.3 km	—
MARC	31.6% (166)	平均值 $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均值 4.1 km	平均值 5.9 km
				概率密度最大值 4.9 km
中涡旋	9.9% (52)	平均值 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均值 3.6 km	平均值 4.7 km
		概率密度最大值 $11.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		

251 将具有 WER、RI、MARC、中涡旋特征的下击暴流强度分别与总样本（图 5 对照组 A）
252 对比（图 5）表明，伴随上述四种特征的下击暴流强度相对较强，其平均值在 23 m s^{-1} 以上，

而对照组仅 22 m s^{-1} 。这表明，尽管上述雷达特征占比不高，但出现这些特征时产生较强下击暴流的概率高。

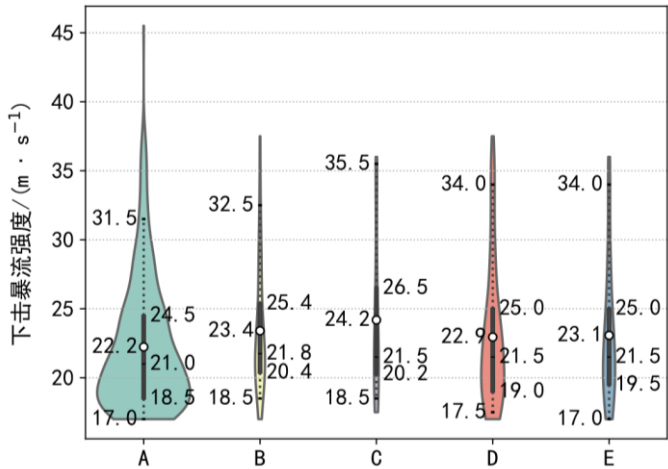


图 5 2019—2020 年 6—9 月江苏伴随不同风暴结构特征的下击暴流强度统计

Fig.5 Intensity statistics of downbursts with structural characteristics of different storms in Jiangsu Province from June to September in 2019–2020

表 3 总结了不同风暴雷达特征预警下击暴流的时间提前量。下击暴流风暴 DRC 及 VIL 减小特征通常提前 0~12 min 出现。风暴伴随 MARC 时，相对雷达低仰角 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 径向速度提前 6~18 min，相对雷达低仰角最大径向速度提前 12~24 min，MARC 较其他特征占比高且预警时效略长，特征更清晰更具有指示性。当然，与超级单体 MARC 相对 25 m s^{-1} 大风提前约 14~42 min 相比，预警时间提前量仍较短。WER、RI 以及中涡旋特征相对雷达低仰角 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 径向速度提前 6~24 min 出现，相对最大径向速度提前 12~36 min。总体而言，基于雷达特征的下击暴流预警时间提前量均较短。考虑到体扫数据处理和传输，有效预警时间被进一步压缩，预警难度大。

表 3 下击暴流风暴雷达特征预警时间提前量(单位: min)

Table 3 Lead time of radar-based warning for downburst storm signatures (unit: min)

特征	相对雷达低仰角 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 径向速度提前时间	相对雷达低仰角最大径向速度提前时间
	度提前时间	
DRC	0~12	—
VIL 减小	0~12	—
WER	6~24	12~36
RI	6~12	12~18
MARC	6~18	12~24
中涡旋	6~18	12~30

注：“-”表示未计算。

2.2.3 风暴及阵风锋移速

风暴单体移速和阵风锋移速统计结果如图 6 所示。平均风暴单体移速为 7.3 m s^{-1} ，三类风暴中微下击暴流风暴单体移速相对快（平均值 8.9 m s^{-1} ）（图 6a）。弱动力强迫下，风暴移速显著慢于超级单体、飢线等风暴（移速通常高于 15 m s^{-1} ）（Yu et al, 2012; 龙柯吉等, 2020; 高帆等, 2023; 王一童等, 2022），但与非线状中尺度对流系统为主的风暴移速接近（Wang et al, 2023a, b）。

有 245 次下击暴流伴随阵风锋，占比约 47%，远高于王一童（2022）对超级单体的统计结果。主要因为其通过雷达反射率因子上窄带回波特征判识，本研究在此基础上增加了径向速度判识。此外，弱垂直切变下孤立风暴的下击暴流出流常在风暴周围形成清晰的环状或弧形窄带回波，因而实际上由窄带回波特征判识的阵风锋比例更高。

由图 6b 可见，阵风锋移速很慢，平均值为 7.1 m s^{-1} ，远低于俞小鼎等（2020）给出的雷暴大风预警判据中的阵风锋移速（ 15 m s^{-1} ）和王一童等（2022）对超级单体阵风锋移速的统计结果（ 15 m s^{-1} ），表明弱垂直风切变下阵风锋移速慢。微下击暴流阵风锋移动速度相对其他两类略快，平均速度为 7.8 m s^{-1} ，原因在于其风暴体量小，受环境风的影响相对较大。

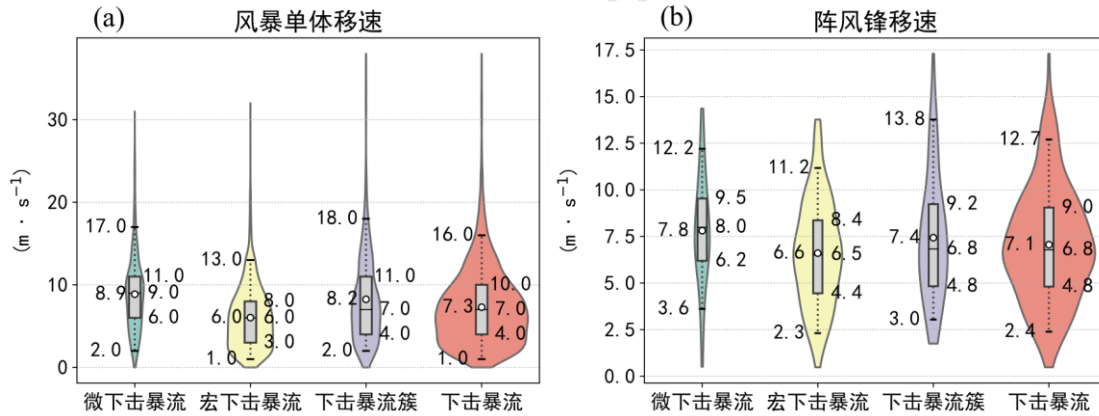


图 6 2019—2020 年 6—9 月江苏不同类型下击暴流风暴的 (a) 单体移速和 (b) 阵风锋移速统计

Fig.6 Statistics of different types of downburst storms in terms of the moving speeds of (a) storm cell and (b) gust front in Jiangsu Province from June to September in 2019–2020

3 结论与讨论

本研究针对熊希颖等（2025）筛选出的 525 个江苏副高控制和弱垂直风切变环境下的下击暴流样本，基于 12 部 SA 雷达的观测数据对其风暴结构特征进行了统计。主要结论如下：

（1）下击暴流风暴回波强度较强，反射率因子核心较高，30%为反射率因子核心伸展

至 6 km 以上的脉冲风暴; DRC 和 VIL 下降占比较高, 分别为 74%和 70%, 但下降速度慢, DRC 平均值为 $4.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, VIL 平均每个体扫时间减小 $6.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。弱垂直风切变背景下 MARC 等常用来预警下击暴流的雷达特征占比不高, MARC 接近 33.3%, 中涡旋、WER 和 RI 均在 10%以下, 脉冲风暴以及伴随 MARC 等的下击暴流强度较强。

(2) 下击暴流风暴伴随阵风锋的比例较高, 达 47%, 但风暴移速和阵风锋移速均很小 ($<10 \text{ m s}^{-1}$), 远不及强风暴阵风锋移速。阵风锋窄带回波特征在雷达图像上易被识别。

(3) 由于弱垂直风切变下, 风暴组织程度相对差, 与下击暴流相关的风暴结构特征维持时间短, 下击暴流预警时间提前量不长, DRC 和 VIL 减小持续时间为 6~12 min, 预警时间提前量为 0~12 min; MARC、WER、RI 和中涡旋特征持续时间多为 12~36 min, 首个下击暴流和最强下击暴流预警时间提前量分别为 0~24 min 和 6~36 min。

本研究旨在分析基于业务雷达探测下击暴流雷达特征的可能性。风暴伴随 RI 的占比较低, 除弱动力强迫下该结构本身较少出现外, 还可能受到径向速度自身局限性影响。当风暴移动方向与雷达径向夹角较大 (接近 90°) 且缺乏明显反射率缺口时, 无法识别 RI, 一定程度上低估了其占比。

在副高控制和弱垂直风切变两个条件约束下, 即动力强迫弱的环境下, 下击暴流风暴为一般单体风暴、脉冲风暴、多单体风暴, 因而风暴结构特征不显著, 强度阈值、比例及预警时间提前量均远不如超级单体、飚线等强对流风暴, 但与以非线状对流系统为主的风暴特征统计结果相当。受限于 S 波段业务雷达时空分辨率, 精准预警比例低, 即仅能对部分下击暴流进行预警, 且预警时间提前量少。这类发生频率最高的对流大风, 突发性强、生命史短, 若发生在人口密集区域, 其致灾性不可忽视。随着低空经济的发展, 其影响日益凸显。本研究采用普查方法对大样本进行筛查统计, 增加了对下击暴流的认识, 揭示了基于业务雷达预警下击暴流的有限能力和时间提前量, 结果具有普适性。

参考文献

- 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 Meteor Sin, 80(1): 67-81 (in Chinese).
- 东高红, 吴涛, 2007. 垂直积分液态水含量在地面大风预报中的应用[J]. 气象科技, 35(6): 877-881. Dong G H, Wu T, 2007. Application of vertically integrated liquid (VIL) water in disastrous wind nowcasting[J]. Meteor Sci Technol, 35(6): 877-881 (in Chinese).
- 方翀, 俞小鼎, 朱文剑, 等, 2015. 2013 年 3 月 20 日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析[J]. 气象, 41(11): 1305-1314. Fang C, Yu X D, Zhu W J, et al, 2015. Characteristics of the thunderstorm gale process in Hunan and Guangdong on 20 March 2013[J]. Meteor Mon, 41(11): 1305-1314 (in Chinese).

高帆, 俞小鼎, 王秀明, 2023. 山东较大范围致灾雷暴大风的多普勒天气雷达特征[J]. 气象, 49(7): 790-804. Gao F, Yu X D, Wang X M, 2023. Doppler radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm gales in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 49(7): 790-804 (in Chinese).

郭云云, 罗辉, 青泉, 等, 2024. 2022 年春季四川盆地一次飑线的环境条件与回波特征[J]. 气象, 50(12): 1480-1494. Guo Y Y, Luo H, Qing Q, et al, 2024. Environmental conditions and radar echo characteristics of a squall line in Sichuan Basin in Spring 2022[J]. Meteor Mon, 50(12): 1480-1494 (in Chinese).

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).

李亚琴, 张凌云, 苏小玲, 等, 2023. 柳州盛夏一次下击暴流特征分析[J]. 气象科技, 51(4): 573-581. Li Y Q, Zhang L Y, Su X L, et al, 2023. Analysis of characteristics of a downburst in midsummer in Liuzhou[J]. Meteor Sci Technol, 51(4): 573-581 (in Chinese).

龙柯吉, 康岚, 罗辉, 等, 2020. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象, 46(2): 212-222. Long K J, Kang L, Luo H, et al, 2020. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 46(2): 212-222 (in Chinese).

梅婵娟, 张灿, 许可, 等, 2020. 山东半岛秋季一次脉冲风暴下击暴流观测分析[J]. 海洋气象学报, 40(2): 131-139. Mei C J, Zhang C, Xu K, et al, 2020. Observational analysis of downburst by a pulse storm in autumn in Shandong Peninsula[J]. J Mar Meteor, 40(2): 131-139 (in Chinese).

王福侠, 俞小鼎, 裴宇杰, 等, 2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报, 27(3): 342-351. Wang F X, Yu X D, Pei Y J, et al, 2016. Radar echo characteristics of thunderstorm gales and forecast key points in Hebei Province[J]. J Appl Meteor Sci, 27(3): 342-351 (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 Meteor Sin, 71(5): 839-852 (in Chinese).

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]. Meteor Mon, 49(2): 129-145 (in Chinese).

王易, 郑媛媛, 孙康远, 等, 2018. 南京雷达中气旋产品特征值统计分析[J]. 气象学报, 76(2): 266-278. Wang Y, Zheng Y Y, Sun K Y, et al, 2018. A statistical analysis of characteristics of mesocyclone products from Nanjing radar[J]. Acta Meteor Sin, 76(2): 266-278 (in Chinese).

王一童, 2022. 产生致灾大风的超级单体雷达观测特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Wang Y T, 2022. Investigation on radar characteristics of damaging straight line winds producing supercell storms[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).

王一童, 王秀明, 俞小鼎, 2022. 产生致灾大风的超级单体回波特征[J]. 应用气象学报, 33(2): 180-191. Wang Y T, Wang X M, Yu X D, 2022. Radar characteristics of straight-line damaging wind producing supercell storms[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2): 180-191 (in Chinese).

吴海英, 孙继松, 慕瑞琪, 等, 2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报, 81(2): 205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 205-217 (in Chinese).

熊希颖, 王秀明, 俞小鼎, 2025. 弱垂直风切变下江苏下击暴流统计特征[J]. 气象, 51(1): 43-56. Xiong X Y, Wang X M, Yu X D, 2025. Statistical characteristics of downbursts under weak vertical wind shear in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 51(1): 43-56 (in Chinese).

杨璐, 陈明轩, 孟金平, 等, 2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 44(6): 802-813. Yang L, Chen M X, Meng J P, et al, 2018. Radar statistical characteristics and warning lead analysis of thunderstorm gales in different life periods in Beijing[J]. Meteor Mon, 44(6): 802-813 (in Chinese).

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(5-6): 801-811. Yu L Y, Wang X H, Gu R Z, et al, 2021. Cause analysis of disastrous gale in downburst event in Jiangsu[J]. J Trop Meteor, 37(5-6): 801-811 (in

Chinese).

俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 309-310, 321. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcast of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press: 309-310, 321 (in Chinese).

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]. J Appl Meteor Sci, 17(4): 385-393 (in Chinese).

俞小鼎, 2011. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展, 1(3): 31-41. Yu X D, 2011. Detection and warnings of severe convection with Doppler weather radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 1(3): 31-41 (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 W, 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, 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of a John F. Kennedy Airport runway, New York City[R]. Chicago: University of Chicago.

Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104pp.

Fujita T T, 1981. Microbursts as an aviation wind shear hazard[C]//19th Aerospace Sciences Meeting. St. Louis: AIAA: 386.

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.

Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting[J]. Wea Forecasting, 7(4): 588-612. Lundgren T S, Yao J, Mansour N N, 1992. Microburst modelling and scaling[J]. J Fluid Mech, 239: 461-488.

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, 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: American Meteorological Society: 306-311.

Smith T M, Elmore K L, Dulin S A, 2004. A damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 19(2): 240-250.

Wakimoto R M, 2001. Convectively driven high wind events[M]//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society: 255-298.

Wang J, Xiao Y J, Leng L. 2023a. A statistical analysis of the distribution of convective windstorms and their radar characteristics in Hubei Province, China. Part 1[J]. Weather, 78(1): 23-29.

Wang J, Xiao Y J, Leng L. 2023b. A statistical analysis of the distribution of convective windstorms and their radar characteristics in Hubei Province, China. Part 2[J]. Weather, 78(3): 87-90.

Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al, 1984. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection[J]. J Appl Meteor Climatol, 23(6): 898-915.

Wilson J W, Wakimoto R M, 2001. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution[J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(1): 49-62.

Yu X D, Wang X, Fei H, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristics[C]//26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society.