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).

弱垂直风切变下江苏下击暴流统计特征*

熊希颖^{1,2} 王秀明² 俞小鼎²

1 中国气象科学研究院,北京 100081
 2 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提要:为研究弱垂直风切变环境下的下击暴流特征,基于 SA 型多普勒天气雷达、探空和地面(10 m)极大风资料以及静止 气象卫星云图,筛选出江苏 2019—2020 年 6—9 月弱垂直风切变下 381 次下击暴流事件,并按尺度分为微下击暴流、宏下击暴 流和下击暴流簇。统计结果表明:江苏地区 6—9 月 64.9%的雷暴日伴随下击暴流,平均每个下击暴流日发生 8 次下击暴流 事件;三类下击暴流占比分别为:微下击暴流 21.7%、宏下击暴流 47.6%、下击暴流簇 30.7%,集中出现在 15—16 时(北京 时);基于雷达径向速度,下击暴流平均持续时间为 25.4 min,平均强度(辐散速度对风速差值或低仰角极大风)为 22 m·s⁻¹, 仅 7 个下击暴流样本达到致灾大风标准(低仰角径向速度达 25 m·s⁻¹或辐散速度对差值达 40 m·s⁻¹),下击暴流引发的地 面气象站观测极大风均值为 15.5 m·s⁻¹,表明其致灾性不太强;下击暴流低仰角径向速度模态以辐散速度对型为主 (73.3%),但多为非对称型,仅有 6.1%的下击暴流为对称的辐散速度对结构,26.7%的下击暴流表现为低仰角强风。 关键词:下击暴流,弱垂直风切变,下击暴流簇,强度与尺度,非对称性

中图分类号: P442,P457 文献标志码: A DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.113001

Statistical Characteristics of Downbursts Under Weak Vertical Wind Shear in Jiangsu Province

XIONG Xiying^{1,2} WANG Xiuming² YU Xiaoding² 1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: To study the characteristics of downburst under weak vertical wind shear, based on the SA Doppler weather radar, sounding and surface (10 m) maximum wind data and the cloud images from stationary meteorological satellites, we selected 381 downburst events that occurred under weak vertical wind shear from June to September in 2019-2020 in Jiangsu Province and divided them into three categories according to the scales of microburst, macroburst and downburst cluster. The statistical results show that 64.9% of thunderstorm days in Jiangsu from June to September are accompanied by downbursts, with an average of 8 downburst events per downburst day. The proportions of three types of downbursts are 21.7% for microbursts, 47.6% for macrobursts and 30.7% for downburst clusters, and they all tend to occur in the time period of 15:00-16:00 BT. According to radar radial velocity, the average duration of downbursts is 25.4 min, and the average intensity (radial velocity difference of divergence couplets or extreme radial velocity at low elevation) is $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Only 7 downburst samples reach the standard of

2023年12月6日收稿; 2024年7月5日收修定稿

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

^{*} 国家自然科学基金项目(U2142203、42375018)、中国气象局短时临近预报教学科研团队项目、中国气象局重点创新团队(CMA-2022ZD07)和中国气象局气象干部培训学院重点课题(2022CMATCZD12)共同资助

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

气 象

disaster gale (extreme radial velocity at low elevation reaches 25 m \cdot s⁻¹ or radial velocity difference of divergence couplets attains 40 m \cdot s⁻¹). The average surface maximum wind caused by downburst observed by surface meteorological stations is 15.5 m \cdot s⁻¹, indicating that disaster-causing potential of downburst is not significant. The low-elevation radial velocity modes of downburst are dominated by divergence velocity couplet (73.3%), but the majorities are asymmetric while only 6.1% for symmetrical divergence velocity couplet. There are 26.7% of downburst characterized by strong wind at low elevation.

Key words: downburst, weak vertical wind shear, downburst cluster, intensity and scale, asymmetry

引 言

下击暴流最初由 Fujita(1978)定义为在地面或 近地面产生破坏性大风的强下沉气流及其出流。下 击暴流具有空间尺度小、生命史短、突发性强、破坏 性强的特点,目前观测到的下击暴流导致的近地面 最大瞬时风速为 67 m • s⁻¹,破坏程度与 EF3 级龙 卷相当(Fujita,1985;俞小鼎等,2006)。我国下击暴 流频发且致灾性强,造成了一系列的生命财产损失 (石磊,2009;郑永光等,2016;李彩玲等,2021)。

基于所导致的近地面灾害性大风的尺度,Fujita (1981)将下击暴流分为五类,其中微下击暴流(强辐 散风尺度小于4km)、宏下击暴流(强辐散风尺度在 4~10 km)和下击暴流簇(通常镶嵌在中尺度对流 系统中,尺度可达几百千米)发生频次高、影响区域 广,受到国内外学者们的广泛关注(Fujita and Wakimoto, 1981; Johns and Doswell, 1992; Wakimoto, 2001; Smith et al, 2004; Markowski and Richardson, 2010; 王秀明等, 2023)。基于下击暴流母体风暴的 地面降水情况,下击暴流还可以被分为干下击暴流 和湿下击暴流(Fujita, 1985; Wakimoto, 1985; 2001)。 美国先后进行了四次下击暴流外场试验, Wilson et al (1984)总结了 Joint Airport Weather Studies (JAWS)项目观测的几十次微下击暴流的统计特 征:平均水平强辐散尺度为 3.1 km,平均辐散风速 度为22m·s⁻¹。在多普勒天气雷达低层仰角上, 下击暴流的径向速度形态有径向速度大值区和辐散 速度对两种,且多为不对称结构(王秀明等,2023)。 微下击暴流持续时间多为 5~10 min,有些生命史 达 60 min。Roberts and Wilson(1989)总结了微下 击暴流的几项先兆特征:①连续下降的反射率因子 核心,②后侧入流缺口,③中层径向辐合,④低层旋 转特征。上述特征相对下击暴流触地的提前时间通 常为2~6 min。随后国内外学者在此基础上进一 步研究并开发出了许多下击暴流识别算法(Kessinger et al,1988;Eilts et al,1996;Smith et al,2004;俞小 鼎等,2006;张钢等,2011;陶岚和戴建华,2011)。

深层垂直风切变一般指 0~6 km 的水平风垂 直切变,是影响风暴形态和组织结构的主要环境条件 之一。Markowski and Richardson(2010)以 10 m · s^{-1} 和 20 m • s^{-1} 作为 0~6 km 弱、中等、强垂直风 切变的划分阈值。在强垂直风切变环境下,对流风 暴通常组织性较高,风暴移速相对快。马淑萍等 (2019)的研究结果表明,极端雷暴大风事件在统计 意义上更接近强的 0~6 km 垂直风切变。目前我 国对下击暴流相关特征的统计研究以中强垂直风切 变环境下的超级单体风暴、飑线系统造成的地面大 风为主(Yu et al, 2012;陈晓欣等, 2022;王一童等, 2022)。在弱垂直风切变环境下也常产生致灾性强 的下击暴流,如2021年8月3日发生在柳州的一次 下击暴流,地面观测站记录的极大风速为 30.4 m · $s^{-1}(11 \mathcal{G})$,其0~6 km 垂直风切变仅6 m · s^{-1} (李 亚琴等,2023)。目前我国弱垂直风切变背景下的下 击暴流的研究仍以个例分析为主,缺乏对此类事件 的统计学研究。

江苏下击暴流频发(吴芳芳等,2009;禹梁玉等, 2021;吴海英等,2023)。进一步考虑到江苏地形平 坦,SA型雷达布网较密,SA雷达网1km高度覆盖 率接近90%,可更好地监测下击暴流,因此本研究 选取江苏暖季(6—9月)弱垂直风切变背景下的下 击暴流为研究对象,对其时空分布特征和下击暴流 尺度、强度等相关特征进行细致统计,以期深化对此 类下击暴流事件的认识。

1 资料与方法

1.1 资料

选取江苏及其周边的 S 波段天气雷达,包括山 东临沂,江苏徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城、泰州、 常州、南通、南京,浙江湖州和上海青浦共计12个雷 达站点(图1,蓝色圆点)。由于雷达扫描时的探测 范围为锥面,距雷达中心水平距离越远,其高度也越 高,越难监测到下击暴流导致的近地面辐散大风的情 况。目前江苏每两部相近雷达间的距离为 120 km 左 右,本研究选取发生在距雷达站中心 60 km 范围内 的下击暴流事件进行相关特征的统计研究。

探空站选取江苏徐州、射阳、南京和上海宝山 4个站点(图1,红色五角星)。

研究所用数据如下: 2019-2020 年 6-9 月全 国雷达拼图组合反射率因子、探空 0~6 km 垂直风 切变和 500 hPa 位势高度、卫星云图、地面 10 m 极 大风、江苏及其周边 12 个 SA 型多普勒天气雷达站 的观测资料。其中雷达资料时间分辨率为6 min, 探空资料每天两次(08:00 和 20:00:北京时,下同), 地面站和卫星云图时间分辨率为1h。全文时间除 特别说明外均为北京时。

1.2 研究方案

1.2.1 初筛雷暴日

根据以下条件初步筛选研究范围内的雷暴日,

并记录受雷暴影响的站点和时段:

①西太平洋副热带高压(以下简称副高)控制, 500 hPa 上风暴区域在 584 dagpm 线以内。一般来 说,副高控制下天气尺度动力强迫较弱,能一定程度 保证筛选的样本发生在弱的垂直风切变环境中。

②根据 Markowski and Richardson(2010)的垂 直风切变分类方法,0~6 km 弱垂直风切变定义为 其值≪10 m • s⁻¹,本研究使用每天 08:00 和 20:00 的探空垂直风切变数据,覆盖时段为前后 6 h。探 空站选取采取就近原则,即选取距对流风暴初始位 置最近的观测探空。

③根据 Roberts and Wilson(1989)对导致微下 击暴流的风暴强度的分类,考虑到江苏暖季多为回 波较强的湿下击暴流,因此对流风暴采用组合反射 率因子强度≥55 dBz 为阈值进行筛洗:为剔除雷达 杂波影响,要求对流风暴所在位置红外云图上有云。 1.2.2 确定下击暴流日、下击暴流事件、下击暴流 类型

在上述雷暴日初筛结果基础上,若有同时满足 以下两个条件的非龙卷对流大风出现,当天记为下 击暴流日:①地面 10 m极大风有不低于 17 m • s⁻¹



and downburst locations (purple triangle) in the study area

的观测记录值;②雷达 0.5°仰角径向速度图中,对 应风暴位置(STI 产品位置)附近有不低于 17 m • s^{-1} 的径向速度大值区或速度差绝对值不低于 17 m • s^{-1} 的辐散速度对(图 2)。

表1给出了两种径向速度模态(大值区和辐散 速度对)下击暴流尺度和强度的统计方案,在统计过 程中发现有相当一部分下击暴流尺度超过了 10 km,由多个难以辨识的单体共同造成低仰角强 风,且伴随对流单体快速生消,此类事件很可能伴随 多次下击暴流"迭代"或者不同尺度下击暴流的"嵌 套"现象,难以归为微下击暴流或者宏下击暴流,更 符合 Fujita and Wakimoto(1981)对下击暴流簇的 定义,因此本研究采用了"下击暴流簇"这一概念。 根据水平尺度将下击暴流分为三类:微下击暴流 (0~4 km)、宏下击暴流(4~10 km)、下击暴流簇 (10 km 以上)。



注:白线表示下击暴流尺度。

图 2 下击暴流在雷达径向速度图上的两种典型模态 (a,b)辐散速度对型下击暴流:2019 年 7 月 30 日 15:06 宿迁雷达 0.5°仰角, (c,d)径向速度大值区型下击暴流:2020 年 8 月 8 日 17:31 泰州雷达 0.5°仰角, (a,c)反射率因子,(b,d)径向速度

Fig. 2 (a, c) Reflectivity and (b, d) radial velocity of two typical modes of downburst in radar radial velocity (a, b) typical downburst with divergence couplet at 0.5° elevation of Suqian Radar at 15:06 BT 30 July 2019, (c, d) typical downburst with high-value radial velocity region at 0.5° elevation of Taizhou Radar at 17:31 BT 8 August 2020

表 1 不同低层径向速度模态下击暴流尺度和强度 Table 1 Scale and intensity of downbursts under different low-elevation radial velocity modes

		č
低层径向速度模态	径向速度大值区	辐散速度对
低层径向速度/下击暴流强度	雷达 0.5°仰角最大径向速度绝对值	0.5°仰角最大正负径向速度绝对值之和
下击暴流尺度	0.5°仰角径向速度≥17 m•s ⁻¹ 区域的最大直径	0.5°仰角最大正负速度间的直线距离

图 2 给出了两种径向速度模态下击暴流的典型 示例。图 2a,2b 为辐散速度对型下击暴流,其正负 速度对中心数值分别为 14 m \cdot s⁻¹和 22 m \cdot s⁻¹,则 下击暴流强度为 36 m \cdot s⁻¹,正负速度对中心距离 即下击暴流尺度为 16.0 km,为下击暴流簇(图 2b)。 图 2c,2d 为径向速度大值区型下击暴流,下击暴流 强度为23 m \cdot s⁻¹,径向速度≥17 m \cdot s⁻¹区域最大 直径表示该下击暴流尺度为 10.5 km,亦为下击暴 流簇(图 2d)。

一个下击暴流日中可能在不同地方出现多次下 击暴流事件。从雷达低仰角径向速度达到17m・ s⁻¹时刻开始,至最终小于17m・s⁻¹时刻为止,界 定为一次下击暴流事件。由于下击暴流水平尺度随 时间演变,一次下击暴流事件中可能存在下击暴流 跨尺度发展的情况,判断方式如下:若下击暴流尺度 增至下一类型同时强度增强,认为下击暴流发展,以 该体扫时刻为界,分别统计两种不同尺度类型的下 击暴流特征;若下击暴流尺度增至下一类型但强度 减弱,表明下击暴流处于衰亡阶段,仅记录下击暴流 强度最强时刻类型和相关特征;若下击暴流尺度减 小至该尺度阈值下限但强度显著增强,表明有新的 更强的下击暴流出现在老的下击暴流附近,记录为 新生下击暴流。根据上述判定规则,可得到下击暴 流跨尺度发展的比例,以及微下击暴流、宏下击暴 流、下击暴流簇这三类下击暴流各自的样本量。需 要说明,由于下击暴流事件跨类型发展,三类下击暴 流样本总和比下击暴流事件数多,下文的特征统计 对象均为三类下击暴流样本总和而非下击暴流事 件。

1.2.3 下击暴流特征统计方案

由图 3,先确定下击暴流事件的统计时段,然后 划分不同类型下击暴流的所属时段,记录其中每一 个体扫时刻该类型下击暴流的特征值。

Wilson et al(1984)的外场试验研究表明,微下 击暴流辐散速度对出现之后,即使最终发展为宏下 击暴流,其持续时间通常在 30~60 min(5~10 个体 扫)以内。据此确定下击暴流事件的统计时段:以雷 达 0.5°仰角上 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,分析这 1.5 h内的下击暴流特征。若雷达低仰



图 3 技术路线和统计特征量 Fig. 3 Technical approach and statistical characteristics

角 17 m • s⁻¹以上径向速度在 10 个体扫后依然存 在,统计结束时间延长至下击暴流强风的两个判据 均不再满足或风暴离开雷达超过 60 km 或回波强 度减弱至 35 dBz 以下的时刻。

本研究过程中特殊事件的统计时段规定:

(1) 对于移入或移出江苏的风暴,截取 STI 产 品识别的风暴位置或低层径向速度中心在江苏范围 内的体扫时段作为统计时段。

(2)对于受到雷达站挡角影响或基数据缺失的 情况,截取有数据的时次记录作为统计时段。

下击暴流持续时段定义为:当前下击暴流类型 统计时段内,低仰角径向速度达到 17 m·s⁻¹时刻 开始至最终小于 17 m·s⁻¹时刻为止的时段。由于 低层径向速度不是随时间增加或减小的简单线性递 进,而是在一定范围内波动,因此在下击暴流持续时 段内有可能出现径向速度<17 m·s⁻¹的时刻。

记录三种类型每个下击暴流最强时刻的模态、 位置、地面极大风,根据以下方案进行统计:

(1)基于下击暴流最强时刻低层径向速度中心 位置进行下击暴流时空分布统计。

(2)选取下击暴流风暴 10 km 范围内地面 10 m极大风作为其引发的地面极大风。

(3)下击暴流最强时刻的低层径向速度形态记 为该下击暴流的模态。

(4) 下击暴流的非对称性分为以下三类:①辐 散速度对的正、负速度绝对值最大值均≥8 m·s⁻¹, 下击暴流对称性由正、负速度绝对值≥8 m • s⁻¹区 域的最大直径的比值决定,为长轴与短轴之比,当比 值为1时该下击暴流是对称结构。如图4b所示,在 0.5°仰角上,正速度(红色区域,下同)为10.5 m · s^{-1} ,负速度(绿色区域,下同)为14 m · s^{-1} ,正、负 速度绝对值≥8 m·s⁻¹区域最大直径均为 2.5 km, 二者比值为1,为对称的下击暴流。当比值>1时下 击暴流不对称,且比值越大,非对称性越强。如 图 4d 所示,正速度最大直径为 3.5 km,负速度最大 直径为 17.5 km,非对称性比值为长轴比短轴即 17.5 km/3.5 km=5,下击暴流正负速度对显著不 对称;②正、负速度其中一方最大绝对值<8 m • s⁻¹ 的辐散速度对型,如图 4f 所示,远离雷达最大径向 速度为 25 m • s⁻¹,朝向雷达的最大径向速度值为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表现为强度不对称特征,尺度也不对称; ③将径向速度大值区型规定为极端不对称型下击暴 流。

2 下击暴流及其时空分布

2.1 雷暴日、下击暴流日、下击暴流事件和下击暴 流类型

根据 1.2.1 节和 1.2.2 节所列筛选标准,确定 了 2019—2020 年 6—9 月共 74 个雷暴日和 48 个下 击暴流日,即约 64.9%的雷暴日伴随下击暴流出现 (图 5a)。7 月和 8 月江苏处于副高控制和高温高湿 环境下,是雷暴日和下击暴流日的高频期,82.4% (61 d)的雷暴日和 93.8%(45 d)的下击暴流日都发 生在这两个月。6 月江苏位于副高边缘,仍然受到西 风带系统影响,满足 0~6 km 垂直风切变 10 m・ s⁻¹条件的时次少,雷暴日亦少。6 月和 9 月属于季 节交替时期,温度和水汽条件不及 7—8 月,产生的 下击暴流也更少。2019—2020 年 6 月和 9 月弱垂 直风切变背景下的雷暴日有 13 d(17.6%),低层径 向速度达到下击暴流阈值的天数仅 3 d。

在上述 48 个下击暴流日中发生了 381 次下击 暴流事件,平均每个下击暴流日发生 8 次下击暴流事 件,单个下击暴流日内发生的下击暴流事件最多有 33 次。根据下击暴流出流水平尺度进一步分类样本 得到微下击暴流 114 个,宏下击暴流 250 个,下击暴 流簇 161 个,共 525 个下击暴流样本(图 5b),其中宏 下击暴流占比最高,占下击暴流样本总数的 47.6%, 下击暴流簇和微下击暴流分别占 30.7%和 21.7%。

如表 2 所示,有 56.1%的微下击暴流发展为更 大尺度的下击暴流;有 32.8%的宏下击暴流发展成 为下击暴流簇。在 161 个下击暴流簇中,有 59.6% 的下击暴流簇是由更小尺度的下击暴流发展而来 的,40.4%的下击暴流簇是在低仰角 17 m • s⁻¹以 上径向速度首次记录时刻就形成或从研究区域外部 移入。

下击暴流的发展有四种形式:①微下击暴流发 展为宏下击暴流后衰亡:占微下击暴流样本的 29.8%;②微下击暴流直接发展为下击暴流簇后衰 亡:占微下击暴流样本的 12.3%;③宏下击暴流发 展为下击暴流簇:17 m·s⁻¹低仰角径向速度首次出 现时刻即形成宏下击暴流,影响范围在 4~10 km, 随后下击暴流尺度增大同时强度增强,发展为尺度 超过 10 km 的下击暴流簇,持续一定时间后消散, 此类情况共有 66 次,占宏下击暴流样本的 26.4%;

下击暴流簇的样本共16个。

④微下击暴流先发展为宏下击暴流后进一步发展为



注:白线表示径向速度绝对值≥8 m • s⁻¹区域最大直径。

图 4 下击暴流非对称性典型示例 (a,c,e)反射率因子,(b,d,f)径向速度

(a,b)对称型下击暴流:2019年7月30日16:15淮安雷达0.5°仰角,(c,d)非对称型下击暴流:2019年
8月2日16:13淮安雷达0.5°仰角,(e,f)强度不对称型下击暴流:2019年7月28日18:32宿迁雷达0.5°仰角
Fig. 4 Asymmetry of downburst in (a, c, e) reflectivity and (b, d, f) radial velocity in typical examples (a, b) symmetric downburst at 0.5° elevation of Huaian Radar at 16:15 BT 30 July 2019, (c, d) asymmetric downburst at 0.5° elevation of Suqian Radar at 18:32 BT 28 July 2019





表 2 江苏 2019-2020 年 6-9 月下击暴流 发展的样本量和比例统计

Table 2 Occurrence and proportion statistics of downburst development in Jiangsu Province

下击暴流发展	样本量,比例
微下击暴流→宏下击暴流	34个,29.8%
微下击暴流→下击暴流簇	14个,12.3%
宏下击暴流→下击暴流簇	66个,26.4%
微下击暴流→宏下击暴流→下击暴流簇	16 个
发展的微下击暴流	64个,56.1%
发展的宏下击暴流	82个,32.8%
由小尺度下击暴流发展的下击暴流簇	96个,59.6%

from June to September in 2019-2020

2.2 下击暴流空间分布

下击暴流的空间分布如图1中紫色三角形所 示。江苏及邻近省份S波段多普勒雷达组网较为密 集,本研究所设定的方案可以覆盖到江苏省绝大部 分区域。由于对流风暴移动方向多为由西向东或西 南一东北,下击暴流较为集中发生在江苏西部偏北 地区,中南部的泰州、常州、南通的下击暴流也较多。 江苏东北部和西南部的下击暴流分布相对较少。在

对流初筛过程中,盐城和连云港地区满足风暴的组 合反射率因子≥55 dBz 条件的频数与其他区域相 当,但位于这一地区的射阳探空站满足 0~6 km 垂 直风切变≤10 m • s⁻¹的时次少,因而江苏东北部筛 选出的弱垂直风切变下的下击暴流样本较少。江苏 西南部下击暴流亦较少,这与当地对流风暴少有关 (王颖等,2009)。

2.3 下击暴流时间分布

图 6 表示下击暴流的时间分布统计结果。下击 暴流的发生发展集中在午后到傍晚(12:00-19:00),尤其在 15:00-16:00,样本数量最多,达到 80个。从下击暴流类型分布来看,微下击暴流和下 击暴流簇在 15:00-16:00 发生频次最高,宏下击暴 流在14:00-15:00 发生频次最高。1982 年美国科 罗拉多州的 JAWS 外场试验也表明,干湿微下击暴 流均在中午前后迅速增加,在当地时间 15:00 左右 达到峰值(Wakimoto,1985)。弱垂直风切变背景下 的下击暴流主要受热力作用主导,午后下垫面辐射 增温显著。



Fig. 6 Time distribution of downbursts in Jiangsu Province from June to September in 2019-2020 (525 samples)

3 下击暴流特征

3.1 下击暴流模态

图 7 显示了各类型下击暴流的模态频数及比例。总体而言,以辐散速度对型下击暴流为主,共 385 次,占下击暴流样本的 73.3%,其中宏下击暴流 41.3%,下击暴流簇 25.5%。大值区型下击暴流共 有 140 次,占样本总量的 26.7%,其中微下击暴流 15.2%。

宏下击暴流和下击暴流簇的辐散速度对型占比 均在 80%以上,分别占对应类型样本量的 86.8%和 83.2%。微下击暴流以大值区型为主,有 80 次,占 微下击暴流样本量 70.2%。需要指出,并非辐散速 度对型微下击暴流少,而是微下击暴流刚及地时辐 散速度对的径向速度小,本研究使用的径向速度产 品空间分辨率为 500 m,当低仰角识别出≥17 m・ s⁻¹的辐散速度对时,下击暴流尺度大多已经超过 4 km 因而被归类为宏下击暴流。

3.2 下击暴流非对称性结构

对下击暴流样本的非对称性进行了统计。结果 表明:①正、负速度中心最大绝对值都≥8 m・s⁻¹的 辐散速度对型下击暴流共有 197 个(37.5%),图 8 显示了其长短轴比值分布情况,对称(即非对称性比 值为 1)的下击暴流共有 32 个,占比 6.1%,其他不 对称样本中非对称性比值为 2 的下击暴流最多,共 发生 53 个,占比 10.1%;②下击暴流模态为辐散速







度对型但单向最大速度绝对值<8 m·s⁻¹的样本数 有 188 个(35.9%),表现为强度不对称特征;③下击 暴流模态为大值区型,实质上是极端不对称的下击 暴流共有 140 个,占样本总量 26.7%。

Fujita(1981)给出了静止型和移动型微下击暴 流的概念模型。在风暴完全静止的理想情况下,下 沉气流到达地面后向四周辐散,形成强度和尺度都 较为对称的下击暴流。但实际上,完全对称的辐散 速度对型下击暴流很少出现,风暴通常在环境风的 作用下移动从而导致下击暴流呈现为非对称结构。 此外,动量下传和低层环境风的叠加,也使得下击暴 流呈现出非对称性。Orf and Anderson(1999)数值 试验表明,随着 0~2 km 垂直风切变增大,与环境 风同向的出流显著强于与其相反方向的出流,下击 暴流表现出不对称的特征。Wilson et al(1984)观 测试验表明,平均而言下击暴流长轴是短轴的 2 倍 以上,与本研究所述结果相符。

上述非对称性统计结果表明:即使在弱垂直风 切变环境下,下击暴流多为出流不对称,主要表现为 强度或尺度不对称的辐散速度对型下击暴流或者极 端不对称的大值区型下击暴流;出流对称的下击暴 流仅占 6.1%。



注:黑色柱形表示对称型下击暴流的数量,灰色柱形表示 不对称型下击暴流长短轴比值变化时的数量,比值越大 表明下击暴流越不对称;柱形上方数字为样本量。

- 图 8 江苏 2019-2020 年 6-9 月正、负速度中心最大
 绝对值都≥8 m・s⁻¹的辐散速度对型下击
 暴流非对称性统计(样本量:197 个)
- Fig. 8 Statistical results of asymmetry of downbursts caused by the divergence velocity couplets with maximum absolute values of positive and negative velocity centers both ≥8 m s⁻¹ in Jiangsu
 Province from June to September in 2019-2020 (197 samples)

3.3 下击暴流强度和下击暴流持续时间

对所有样本的下击暴流强度统计结果和小提琴 图的基本组成及各点位注释如图 9 所示。下击暴流 强度较为集中分布在 18.5~24.5 m·s⁻¹,平均强度 为 22.2 m·s⁻¹,50%分位值为 21.0 m·s⁻¹。王一 童等(2022)对超级单体致灾大风的统计结果表明, 75%的样本低仰角径向速度超过 24 m·s⁻¹,而本 研究中仅有 25%的下击暴流强度超过 24.5 m· s⁻¹,强度远不及超级单体大风。Smith et al(2004) 基于雷达观测界定致灾性大风的标准为:距地 1 km 高度以下出现不低于 25 m·s⁻¹的径向速度大值 区,或速度差绝对值不低于 40 m·s⁻¹的辐散速度 对。本研究筛选的样本中满足该标准的大值区型下 击暴流有 6 个,辐散速度对型下击暴流仅 1 个,表明 在弱垂 直风切变环境下极少有达到 Smith et al (2004)阈值的致灾下击暴流。

微下击暴流、宏下击暴流、下击暴流簇的强度平 均值分别为 19.0、22.0、25.0 m·s⁻¹(图 9)。小提 琴图外围宽度反映了该处特征值的概率密度。下击 暴流强度概率密度集中出现在 19 m·s⁻¹,三类下 击暴流强度概率密度最大特征值分别为 18.0、20.0、 22.5 m·s⁻¹。总体特征表现为微下击暴流<宏下 击暴流<下击暴流簇。Wilsonet al(1984)在 JAWS 外场试验中,使用 3 部 C 波段雷达对 30 km 范围内 发生的 68 次微下击暴流的统计结果表明,微下击暴 流平均强度为 22 m·s⁻¹,与本研究结果大致相当。 存在微小差异的原因可能是由于雷达产品分辨率不 同,本研究使用 S 波段雷达径向速度 26 号产品,分 辨率为 500 m,JAWS 外场试验使用的 C 波段雷达 径向速度分辨率为 150 m,也可能是地域差异造成 的。

由于宏下击暴流占比最多(47.6%),下击暴流 簇其次(30.7%),因此下击暴流的各类特征统计结 果介于宏下击暴流和下击暴流簇之间,且向宏下击 暴流偏移。

图 9 显示下击暴流强度的 75%分位值为 24.5 m· s⁻¹,因此选取 25 m·s⁻¹作为强下击暴流阈值,统 计各类型下击暴流中强下击暴流的比例。结果表 明,有 2.6%的微下击暴流、19.6%的宏下击暴流和 43.5%的下击暴流簇达到强下击暴流标准(图略), 微下击暴流总体较弱而下击暴流簇普遍更强。表 2 中,样本中有 59.6%的下击暴流簇都是由更小尺度 类型的下击暴流发展而来,因此即使最初出现强度 和影响范围都很小的微下击暴流,也应重视并警惕 其发展为较强的下击暴流簇。

对下击暴流对应的地面极大风进行统计,共得 到有地面极大风记录的微下击暴流样本 61 个,宏下 击暴流 171 个,下击暴流簇 145 个(图 10)。下击暴 流对应地面极大风的平均值为 15.5 m \cdot s⁻¹,75% 分位值为 18 m \cdot s⁻¹,即有超过 1/4 的下击暴流导 致了 8 级以上地面大风,95%分位值为 24 m \cdot s⁻¹, 仅有2.7%(10 个)的下击暴流对应的地面极大风超 过 25 m \cdot s⁻¹,最强地面极大风为 30 m \cdot s⁻¹,占样





Fig. 10 Statistical results of surface maximum winds corresponding to different types of downbursts in Jiangsu Province from June to September in 2019-2020 (377 samples)

本的 0.8%。表明弱的垂直风切变环境下,产生 25 m • s⁻¹(10 级)或 30 m • s⁻¹(11 级)以上对流性 强风的概率非常低。费海燕等(2016)和马淑萍等 (2019)分别对强雷暴大风(地面瞬时风速≥25 m• s⁻¹)和极端雷暴大风(地面瞬时风速≥30 m • s⁻¹) 0~6 km 垂直风切变特征统计研究表明,强雷暴大风 发生在中等强度的垂直风切变下(均值为14.3 m・ s⁻¹),而极端雷暴大风多发生在更强的垂直风切变 下(均值为18.1 m • s⁻¹)。弱的垂直风切变下,产 生下击暴流的概率高,但大多不极端,致灾概率低, 主要对航空和其他敏感性行业产生影响。需要说明 的是,受到地面观测站分布影响,相当一部分下击暴 流特别是微下击暴流对应的地面极大风没有被测站 记录;对于在1h内跨尺度发展的下击暴流,地面 10 m 极大风数据不能与下击暴流一一对应,测站记 录的数据是较强下击暴流对应的地面极大风。

下击暴流持续时间越长,致灾的可能性越大。 对各类下击暴流持续时间和下击暴流持续时段内雷 达低层径向速度的统计结果表明,下击暴流平均持 续时间为 25.4 min,25%分位数为 12.0 min,75% 分位数为 36.0 min(图 11a)。下击暴流持续时段内 低层径向速度较为集中出现在 17.5~22.5 m・ s^{-1} ,平均值为 20.3 m・ s^{-1} ,50%分位值为 19.5 m・ s^{-1} (图 11b)。三类下击暴流的强度和持续时间特 征,均表现为微下击暴流<宏下击暴流<下击暴

一般来说,垂直风切变越大风暴组织性越强,持

续时间越长,其产生强风的概率越高。表3给出了 弱垂直风切变下的下击暴流与强垂直风切变下的对 流大风事件相关统计特征(陈晓欣,2022;王一童, 2023)的对比。本研究统计结果表明,下击暴流尺度 集中分布在 4~10 km,总体平均值为 8.6 km,最大 水平尺度亦在 50 km 以下(图略),远小于德雷科风 暴(Derecho)的尺度(400 km 以上)和风暴影响面积 (26.5万~51.3万km²)。弱垂直风切变下,风暴组 织性差,生命史短,下击暴流持续时间短,平均持续 时间仅为 25.4 min,远不及组织性强的超级单体 (49.4 min)和 Derecho(6~18 h)。大风强度方面, 弱垂直风切变环境中达到 Smith et al(2004)对致灾 大风界定标准的下击暴流仅有7次,地面观测站对 应的极大风强度也相对弱,仅2.7%下击暴流对应 的地面极大风达 25 m • $s^{-1}(10 \ g)$,而强垂直风切 变下的超级单体产生致灾强风的比例很高。

下击暴流模态亦受到垂直风切变强度的影响。 弱垂直风切变下,下击暴流模态仍以辐散速度对为 主(73.3%),尽管环境风仍然会使得沿其方向的风 暴出流增强,反向出流减弱,多为非对称型下击暴 流。而在相对强的环境风作用下,下击暴流反向出 流大幅减弱甚至消失,超级单体和 Derecho 事件雷 达径向速度图上主要表现为大值区模态,呈现出极 端不对称性。

综上,弱垂直风切变下的下击暴流与组织性强的超级单体、Derecho产生的下击暴流相比,大风强度弱、尺度小、持续时间短、致灾率低。



图 11 江苏 2019—2020 年 6—9 月不同类型下击暴流的(a)持续时间 (样本量:525 个)和(b)持续时段低层径向速度(样本量:2225 个)特征统计 Fig. 11 Feature statistics of (a) duration of downbursts (525 samples) and (b) low-elevation radial velocity during downburst periods (2225 samples) of different types of downbursts in Jiangsu Province from June to September in 2019—2020

表 3 江苏 2019—2020 年 6—9 月弱垂直风切变下击暴流与组织性强的

超级单体和 Derecho 下击暴流的特征统计值对比

Table 3 Comparison of characteristic statistics of downbursts under weak vertical wind

shear with well-organized supercell downbursts and Derechos in

Jiangsu Province from June to September in 2019–2020				
下击暴流	超级单体*	Derecho **		
$\leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	_	平均值为 19.8 m·s ⁻¹		
平均尺度:8.6 km	—	影响范围大于 400 km		
大值区:26.7% 辐散速度对:73.3%	大值区:52次(92.9%) 辐散速度对:4次(7.1%)	大值区		
极端不对称:26.7%	极端不对称:92.9%	极端不对称		
2.7%下击暴流对应的地 面极大风达 25 m・s ⁻¹	≥25 m・s ⁻¹ 比例高	\geqslant 25 m • s ⁻¹		
1.3%	约 75%	—		
平均值:25.4 min	平均值:约 49.4 min	持续时间长,中值集中分布在 6~18 h		
	Jiangsu Province fr 下击暴流 <10 m • s ⁻¹ 平均尺度 :8.6 km 大值区 :26.7% 辐散速度对 :73.3% 极端不对称 :26.7% 2.7%下击暴流对应的地 面极大风达 25 m • s ⁻¹ 1.3% 平均值 :25.4 min	Jiangsu Province from June to September in 2019- 下击暴流 超级单体* <		

注:*引自王一童(2023),**引自陈晓欣(2022)。

4 结论与讨论

本研究基于雷达数据、探空数据、地面自动观测 站数据、卫星云图资料,筛选出江苏 2019—2020 年 6—9月弱垂直风切变环境下共 381 次下击暴流事 件,并根据其出流水平尺度分类得到 525 个下击暴 流样本:微下击暴流 114 个(21.7%)、宏下击暴流 250 个(47.6%)、下击暴流簇 161 个(30.7%)。对 下击暴流的时空分布、模态、非对称性、强度和持续 时间等特征进行了细致的统计,主要结论如下:

(1)弱垂直风切变背景下共有74个雷暴日和 48个下击暴流日,接近2/3的雷暴日伴随下击暴流 出现。平均每个下击暴流日有8次下击暴流事件发 生,下击暴流日内发生下击暴流事件最多有33次。

(2) 下击暴流跨尺度类型发展的情况较为多见,56.1%的微下击暴流和 32.8%的宏下击暴流发 展为更大尺度类型的下击暴流,有 59.6%的下击暴 流簇由小尺度下击暴流发展而来。

(3)下击暴流多发生在12:00—19:00,其中15:00—16:00发生频数最多。

(4)弱垂直风切变下击暴流模态以辐散速度对型为主,占总体样本的73.3%,主要为宏下击暴流和下击暴流簇,而微下击暴流模态以大值区型(极端不对称型)为主。26.7%的下击暴流表现出明显的不对称性,仅有6.1%下击暴流是完全对称的。

(5) 基于雷达径向速度,有 23.2%下击暴流强度达到 25 m·s⁻¹,但达到致灾下击暴流标准的样

本仅7个;下击暴流对应的地面10m极大风平均风 速为15.5m·s⁻¹,仅有2.7%的地面极大风超过 25m·s⁻¹。下击暴流平均持续时间为25.4min, 持续时段内低层径向速度平均值为20.3m·s⁻¹, 持续时间:微下击暴流<宏下击暴流<下击暴流簇。 与组织性强的超级单体和 Derecho 下击暴流相比, 弱垂直风切变下的下击暴流强度弱、尺度小、大风持 续时间短、致灾率低。

使用S波段雷达26号径向速度产品,径向分辨 率500m,对尺度较小、强度较弱的微下击暴流的捕 捉能力不足,此外,雷达体扫时间间隔为6min,微 下击暴流持续时间短,其最强时刻很可能没有被记 录,表明微下击暴流的频数和强度被一定程度上低 估。

以每日 08:00 和 20:00 的 0~6 km 垂直风切变 ≪10 m・s⁻¹作为"弱垂直风切变"的筛选条件,可能 会存在以下两类特殊情形:①中间某层存在低空急 流导致中低层垂直风切变较大;②在午后或夜间可 能出现较强垂直风切变。这两种情况存在的比例及 其对下击暴流的可能影响,后续将在下击暴流发生 前的环境特征方面进一步研究。

参考文献

陈晓欣,2022. 中国大范围雷暴大风事件研究:时空分布、环境背景和 雷达回波特征[D]. 北京:中国气象科学研究院. Chen X X, 2022. A study of large scale thunderstorm wind events in China: spatiotemporal distribution, environmental background and radar echo characteristics[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).

- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 石磊,2009. 一次宏下击暴流的雷达回波特征分析[J]. 气象研究与应用,30(3):16-19. Shi L,2009. Doppler radar echo features of a macro-downburst[J]. J Meteor Res Appl,30(3):16-19(in Chinese).
- 陶岚,戴建华,2011. 下击暴流自动识别算法研究[J]. 高原气象,30 (3):784-797. Tao L, Dai J H, 2011. Research on automatic detection algorithm of downburst[J]. Plateau Meteor, 30(3):784-797(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).
- 王一童,2023. 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,2023. 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).
- 王颖,郑永光,寿绍文,等,2009. 南京及周边地区夏季对流风暴的活动特征[J]. 科技信息,(14):32-33. Wang Y, Zheng Y G, Shou S

W, et al, 2009. Activity characteristics of convective storms in summer over Nanjing and its surrounding areas[J]. Sci Technol Inform, (14):32-33(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).
- 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).
- 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.YuLY,Wang XH,GuRZ,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,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).
- 张钢,潘运红,柳畅,2011.下击暴流区域特征提取和识别算法[J].计 算机工程与应用,47(28):185-187,240. Zhang G,Pan Y H,Liu C,2011. Microburst region feature extraction and recognition algorithm[J]. Comput Eng Appl,47(28):185-187,240(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016."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,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]. Meteor Mon,42(1):1-13(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,1978. Manual of downburst identification for project NIMROD [R]. Chicago: University of Chicago: 19-20.
- Fujita T,1985. The downburst; microburst and macroburst[R]. Chicago; University of Chicago.
- Fujita 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.
- Fujita T,1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci,38(8):1511-1534.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting

[J]. Wea Forecasting, 7(4): 588-612.

- Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W, 1988. Observations of a storm containing misocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations[J]. Mon Wea Rev, 116(10):1959-1982.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: Wiley-Blackwell: 201-202.
- Orf L G, Anderson J R, 1999. A numerical study of traveling microbursts[J]. Mon Wea Rev, 127(6):1244-1258.
- Roberts R D, Wilson J W, 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 28(4):285-303.
- 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, 1985. Forecasting dry microburst activity over the high plains[J]. Mon Wea Rev, 113(7):1131-1143.
- Wakimoto R M, 2001. Convectively driven high wind events[M] // Doswell [] C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society: 255-298.
- 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.
- Yu X D, Wang X M, Zhao J, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristics [C] // 26th Conference on Severe Local Storms. AMS.

(本文责编:戴洋)