

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

摘要: 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 次下击暴流达到致灾大风标准 (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; 下击暴流的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

Statistical Characteristics of Downburst 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: In order to study the characteristics of downburst under weak vertical wind shear, based on SA Doppler weather radar, sounding and surface (10 m) maximum wind data and cloud image data of stationary meteorological satellites, 381 downburst events under weak vertical wind shear from June to September in 2019–2020 in Jiangsu were selected and divided into three categories according to the scale: microbursts, macrobursts, and downburst clusters. The statistical results show as follows: 64.9% of thunderstorm days in Jiangsu from June to September were accompanied by downburst, with an average of 8 downburst events per downburst day. The

* 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 (CMA2022ZD07)、中国气象局气象干部培训学院重点课题 (2022CMATCZD12) 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期临近天气预报研究。E-mail: 1074791779@qq.com

通信作者: 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

proportions of three types of downbursts are 21.7% for microbursts, 47.6% for macrobursts, and 30.7% for downburst clusters, which are concentrated at 15:00 to 16:00 (Beijing time). Based on 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 m s^{-1} . Only 7 times of downbursts reached the standard of disaster wind (extreme radial velocity at low elevation reached 25 m s^{-1} or radial velocity difference of divergence couplets attained 40 m s^{-1}). The average surface maximum wind caused by downbursts observed by ground meteorological stations is 15.5 m s^{-1} , indicating that downbursts' disaster-causing potential is not significant. The low elevation radial velocity modes of downbursts are dominated by divergence velocity couplets (73.3%), but the majority are asymmetric while only 6.1% of downbursts are symmetrical divergence velocity couplets. 26.7% of downbursts exhibit strong winds at low elevation.

Key words: downburst, weak vertical wind shear, downburst clusters, 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 4 km)、宏下击暴流 (强辐散风尺度 $4\sim 10 \text{ km}$) 和下击暴流簇 (通常镶嵌在中尺度对流系统中, 尺度可达几百公里) 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) 项目观测到的 68 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 22 m 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中以中强垂直风切变环境下的超级单体风暴、飚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 级），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 1 km 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。

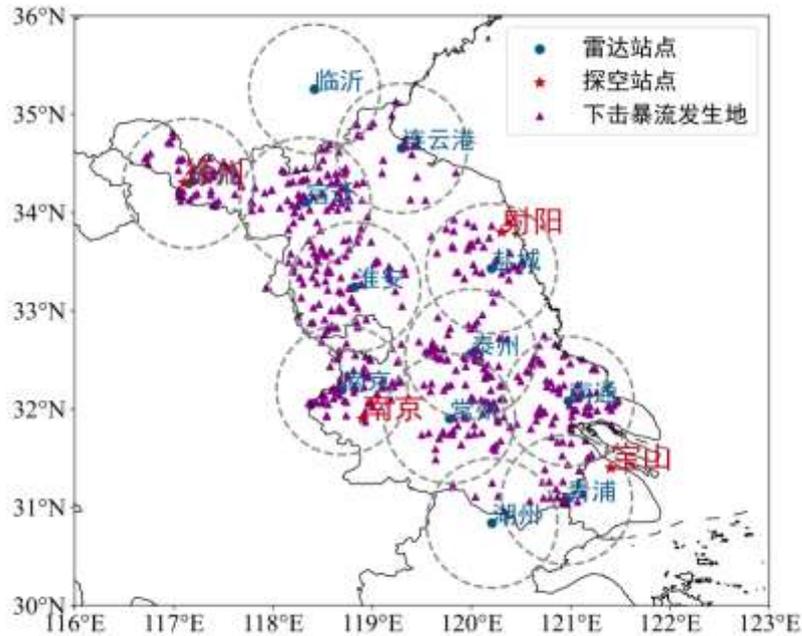
1 资料与方法

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。

探空站选取徐州、射阳、南京、宝山四个站点（图 1，红色五角星）。



注：审图号：GS(2020)4619 号。

图 1 研究区域内探空站（4 个）、雷达站（12 个）及下击暴流发生位置（样本数量：525）的空间分布

Fig 1 The spatial distribution of sounding stations(red pentagram), radar stations(blue dots), and downburst locations(purple triangles) in the study area

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 时和 20 时，地面站和卫星云图时间分辨率为 1 h。全文时间除特别说明外均为北京时间。

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控制，500 hPa 上风暴区域在 584 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 $\leq 10 \text{ m s}^{-1}$ ，本研究使用每天 08 时和 20 时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 $\geq 55 \text{ dBz}$ 为阈值进行筛选；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} 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)。

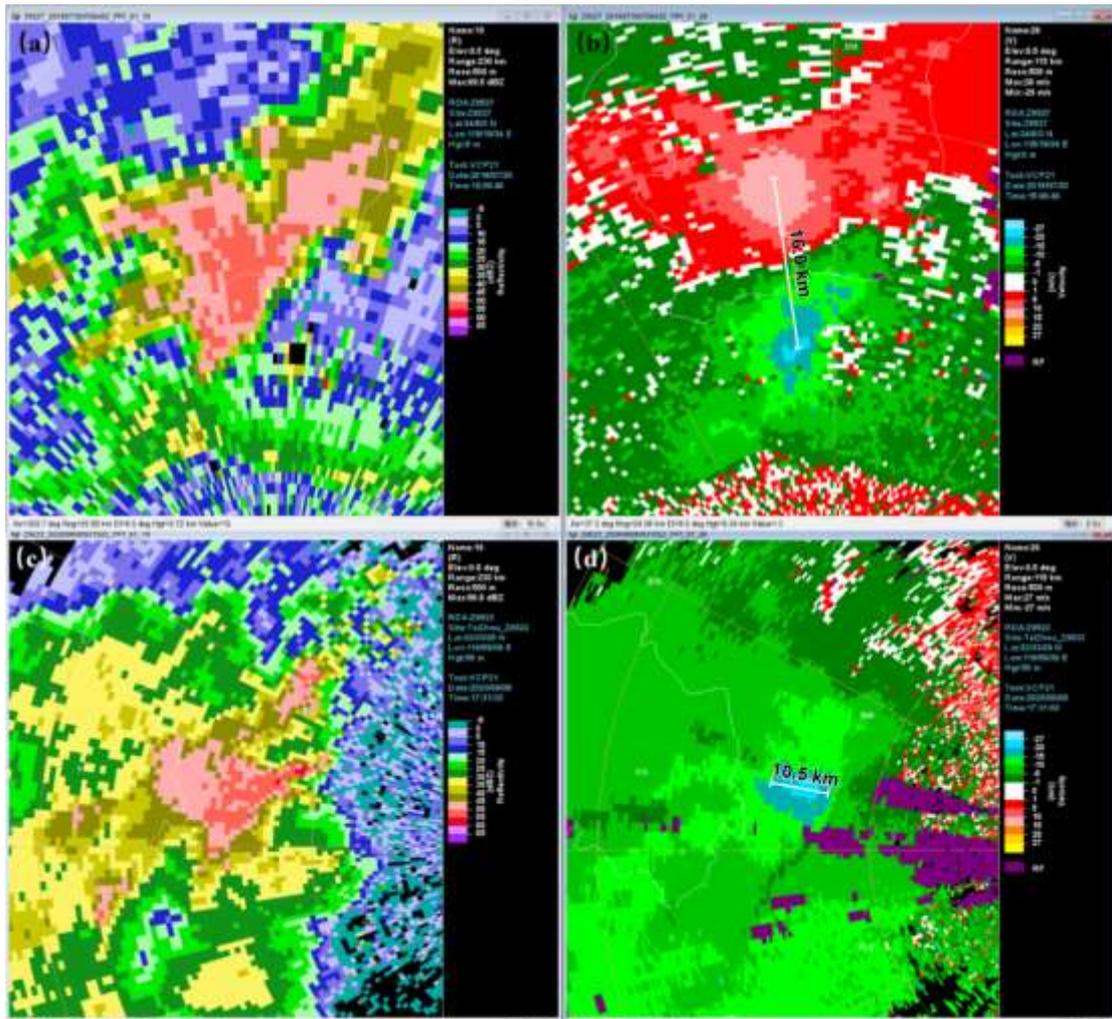
表 1 不同低层径向速度模态下击暴流尺度和强度

Table 1 Scale and intensity of downbursts under different low-elevation radial velocity modes

低层径向速度形态	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° 仰角径向速度值 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 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 s^{-1} 和 22 m s^{-1} ，则下击暴流强度为 36 m s^{-1} ，正负速度对中心距离即下击暴流尺度为 16 km，为下击暴流簇 (图 2b)。图 2c, 2d 为大值区型下击暴流，下击暴流强度为 23 m s^{-1} ，径向速度 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 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）。



注：图中白线表示下击暴流尺度

图 2 下击暴流雷达两种低仰角径向速度典型模态的 (a, c) 反射率因子和 (b, d) 径向速度 ((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

Fig 2 Typical modes of radar low-elevation radial velocity for downburst events

(a,c) reflectivity, (b,d) radial velocity

(a, b) a typical downburst with divergence couplets: at 0.5° elevation angle from Suqian radar on July 30, 2019, at 15:06 BT,

(c, d) a typical downburst with high radial velocity regions: 0.5° elevation angle from Taizhou radar on August 8, 2020, at 17:31BT

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 17 m s^{-1} 时刻开始，至最终小于 17 m s^{-1} 时刻为止，界定为一次下击暴流事件。由于下击

暴雨水平尺度随时间演变，一次下击暴雨事件中可能存在下击暴雨跨尺度发展的情况，判断方式如下：若下击暴雨尺度增至下一类型同时强度增强，认为下击暴雨发展，以该体扫时刻为界，分别统计两种不同尺度类型的下击暴雨特征；若下击暴雨尺度增至下一类型但强度减弱，表明下击暴雨处于衰亡阶段，仅记录下击暴雨强度最强时刻类型和相关特征。若下击暴雨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雨出现在老的下击暴雨附近，记录为新生下击暴雨。根据上述判定规则，可得到下击暴雨跨尺度发展的比例，以及微下击暴雨、宏下击暴雨、下击暴雨簇这三类下击暴雨各自的样本量。需要说明，由于下击暴雨事件跨类型发展，三类下击暴雨样本总和比下击暴雨事件数多，下文的特征统计对象均为三类下击暴雨样本总和而非下击暴雨事件。

1.2.3 下击暴雨特征统计方案

由图 3，先确定下击暴雨事件的统计时段，然后划分不同类型下击暴雨的所属时段，记录其中每一个体扫时刻该类型下击暴雨的特征值。

Wilson et al (1984) 的外场试验研究表明，微下击暴雨辐散速度对出现之后，即使最终发展为宏下击暴雨，其持续时间通常在 30~60 min (5~10 个体扫) 以内。据此确定下击暴雨事件的统计时段：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 内的下击暴雨特征。若雷达低仰角 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雨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省的风暴，截取 STI 产品识别的风暴位置或低层径向速度中心在江苏省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。

下击暴雨持续时段定义为：当前下击暴雨类型统计时段内，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，因此在下击暴雨持续时段内有可能出现径向速度 $< 17 \text{ m s}^{-1}$ 的时刻。

记录三种类型每个下击暴雨最强时刻的模态、位置、时刻、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 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$, 下击暴流对称性由正、负速度绝对值 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$ 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 4a、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 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$ 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 4c、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 $17.5 \text{ km} / 3.5 \text{ km} = 5$, 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 $< 8 \text{ m s}^{-1}$ 的辐散速度对型, 如图 4e、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 m s^{-1} , 表现为强度不对称特征, 尺度也不对称; ③径向速度大值区型规定为极端不对称型下击暴流。

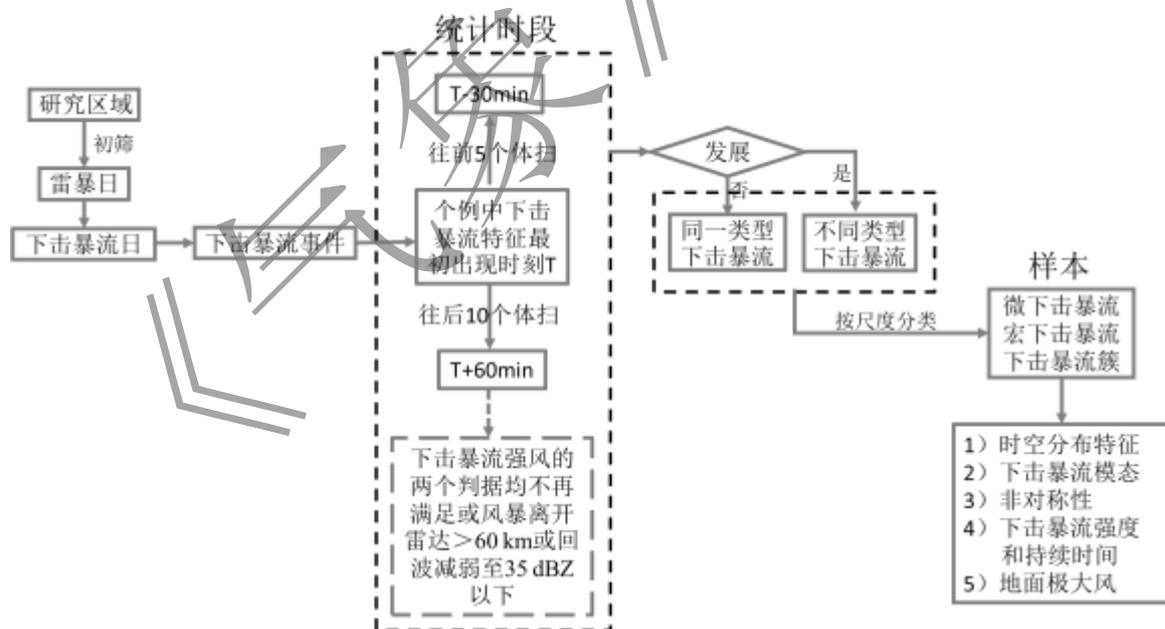
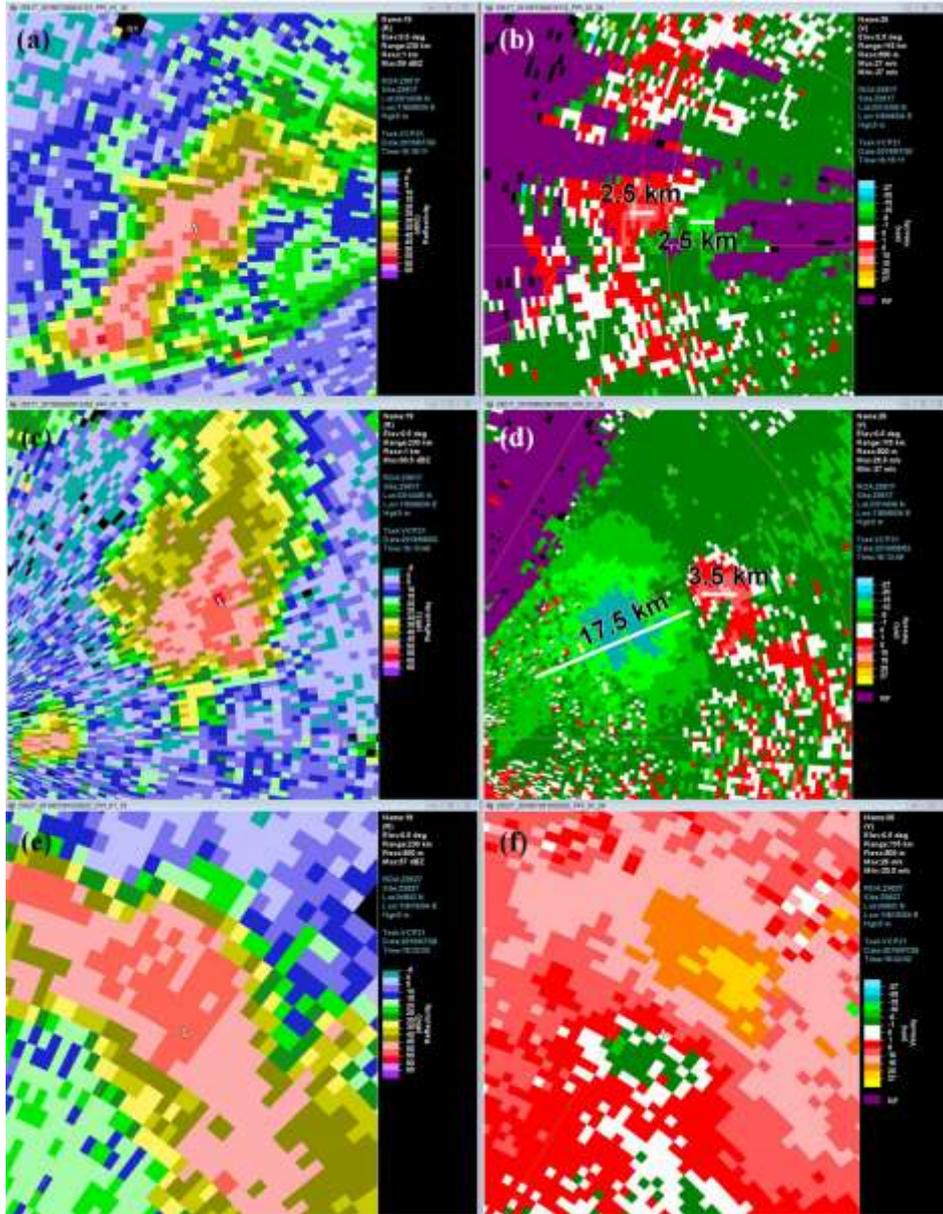


图 3 技术路线和统计特征量

Fig 3 Technical approach and statistical characteristics



注：图中白线表示径向速度绝对值 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$ 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) 对称性下击暴流：2019年7月30日16:15 淮安雷达0.5°仰角

(c, d) 非对称性下击暴流：2019年8月2日16:13 淮安雷达0.5°仰角 (c) 反射率因子图和 (d) 径向速度图；

(e, f) 强度不对称性下击暴流：2019年7月28日18:32 宿迁雷达0.5°仰角

Fig 4 Typical examples of asymmetry of downburst events

(a, b) A symmetric downburst : On July 30, 2019, Huaian radar 0.5° elevation 16:15 (a) reflectivity and (b) radial velocity;

(c, d) An asymmetric downburst: On August 2, 2019, Huaian radar 0.5° elevation 16:13 (c) reflectivity and (d) radial velocity;

(e, f) An intensity asymmetric downburst : On July 28, 2019, Suqian radar 0.5° elevation 18:32 (e) reflectivity and (f) radial velocity

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 $\leq 10 \text{ m s}^{-1}$ 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（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%（82 次）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：34 次，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：14 次，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%；④有 16 次微下击暴流先发展为宏下击暴流后进一步发展为下击暴流簇。

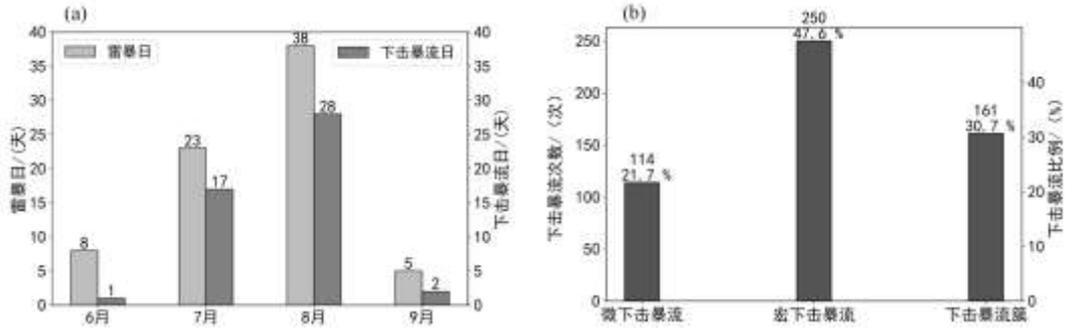


图5 江苏 2019–2020 年 6–9 月 (a) 雷暴日和下击暴流日, (b) 各类型下击暴流次数及比例

Fig 5 (a)Thunderstorm days and downburst days; (b) The occurrence and proportion of each type of downbursts in Jiangsu from June to September in 2019—2020

表2 江苏 2019 - 2020 年 6 - 9 月下击暴流发展的次数和比例统计

Table 2 Occurrence and proportion statistics of downburst development from June to September in 2019—2020 in

Jiangsu	
下击暴流发展	次数 (比例)
微下击暴流→宏下击暴流	34
微下击暴流→下击暴流簇	14
宏下击暴流→下击暴流簇	66
微下击暴流→宏下击暴流→下击暴流簇	16
发展的微下击暴流	64 (56.1%)
发展的宏下击暴流	82 (32.8%)
由小尺度下击暴流发展而来的下击暴流簇	96 (59.6%)

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。江苏及邻省市 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—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 $0\sim 6$ 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 时—19 时），尤其在 15–16 时，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 15–16 时发生频次最高，宏下击暴流在 14–15 时发生频次最高。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 时左右达到峰值（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。



图 6 江苏 2019–2020 年 6–9 月下击暴流时间分布（样本数量：525）

Fig 6 Time distribution of downbursts from June to September in 2019—2020 in Jiangsu(sample number: 525)

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 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 的辐散速度对时，下击暴流尺度大多已经超过 4 km 而被归类为宏下击暴流。

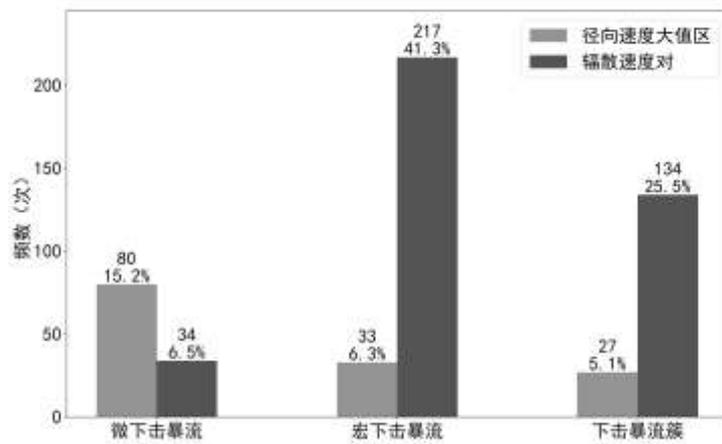


图 7 江苏 2019–2020 年 6–9 月三类下击暴流两种模态的次数及比例分布 (样本数量: 525)

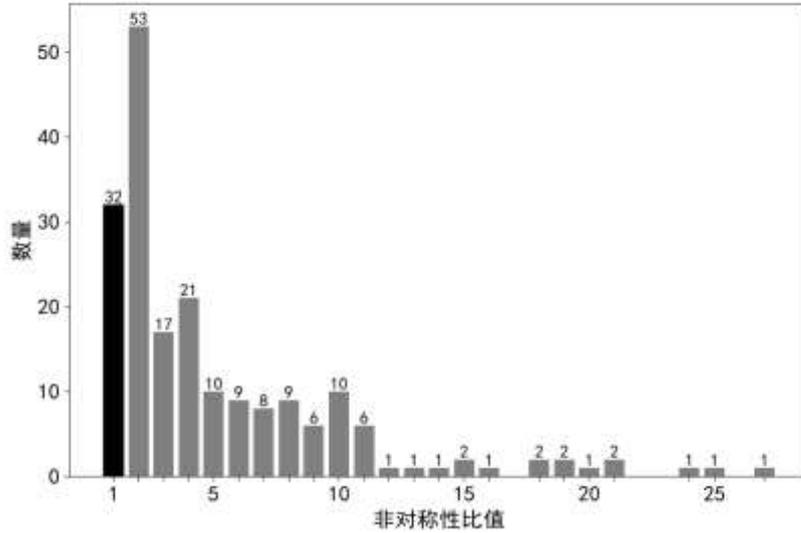
Fig 7 Statistical results of occurrence and proportion distribution of each mode of three types of downbursts from June to September in 2019–2020 in Jiangsu (sample number: 525)

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 $\geq 8 \text{ m s}^{-1}$ 的辐散速度对型下击暴流共有 197 次 (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 次, 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 次, 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 $< 8 \text{ m s}^{-1}$ 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 次, 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) 数值实验表明, 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) 观测实验表明, 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的，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。

图 8 正、负速度中心最大绝对值都 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐散速度对型下击暴流非对称性统计（样本数量：197）

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 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ from June to September in 2019—2020 in Jiangsu (sample number: 197)

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如图 9a 所示，图 9b 为小提琴图的基本组成及各点位注释。下击暴流强度较为集中分布在 $18.5 \sim 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均强度为 $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，50% 分位值为 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。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 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而本研究中仅有 25% 的下击暴流强度超过 $24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，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 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的径向速度大值区，或速度差绝对值不低于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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 次，辐散速度对型下击暴流仅 1 次，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

暴雨。

微下击暴雨、宏下击暴雨、下击暴雨簇的强度平均值分别为 19 m s^{-1} 、 22 m s^{-1} 、 25 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。下击暴雨强度概率密度集中出现在 19 m s^{-1} ，三类下击暴雨强度概率密度最大特征值分别为 18 m s^{-1} 、 20 m s^{-1} 、 22.5 m s^{-1} 。总体特征表现为微下击暴雨 < 宏下击暴雨 < 下击暴雨簇。Wilson et 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 次微下击暴雨的统计结果表明，微下击暴雨平均强度为 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。

由于宏下击暴雨占比最多（47.6%），下击暴雨簇其次（30.7%），因此下击暴雨的各类特征统计结果介于宏下击暴雨和下击暴雨簇之间，且向宏下击暴雨偏移。

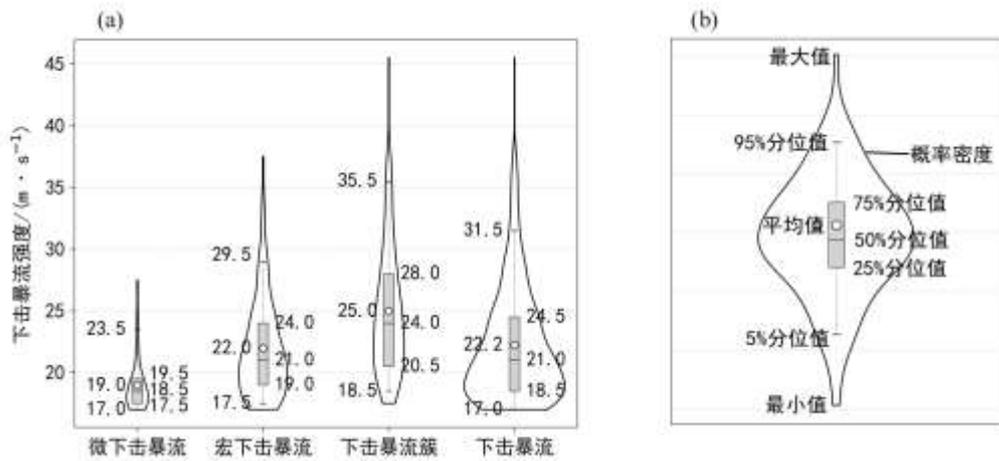


图 9 (a) 江苏 2019–2020 年 6–9 月不同类型下击暴雨强度统计结果（样本数量：525）；(b) 小提琴图注

释图

Fig 9 (a) Statistical results of intensity for different types of downbursts from June to September in 2019—2020 in Jiangsu (sample number: 525), (b) annotated diagram of violin plot

图 9 显示下击暴雨强度的 75%分位值为 24.5 m s^{-1} ，因此选取 25 m s^{-1} 作为强下击暴雨阈值，统计各类型下击暴雨中强下击暴雨的比例。结果表明，有 2.6% 的微下击暴雨、19.6% 的宏下击暴雨和 43.5% 的下击暴雨簇达到强下击暴雨标准（图略），微下击暴雨总体较弱而下击暴雨簇普遍更强。由表 2，样本中有 59.6%（96 次）的下击暴雨簇都是由更小尺度类型的下击暴雨发展而来，因此即使最初出现强度和影响范围都很小的微下击暴雨，

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 61 次，宏下击暴流 171 次，下击暴流簇 145 次（图 10）。下击暴流对应地面极大风的平均值为 15.5 m s^{-1} ，75%分位值为 18 m 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 s^{-1} ，仅有 2.7%（10/377）的下击暴流对应的地面极大风超过 25 m s^{-1} ，最强地面极大风为 30 m s^{-1} ，占样本的 0.8%（3/377）。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 $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$ ）和极端雷暴大风（地面瞬时风速 $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$ ）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 1 h 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。

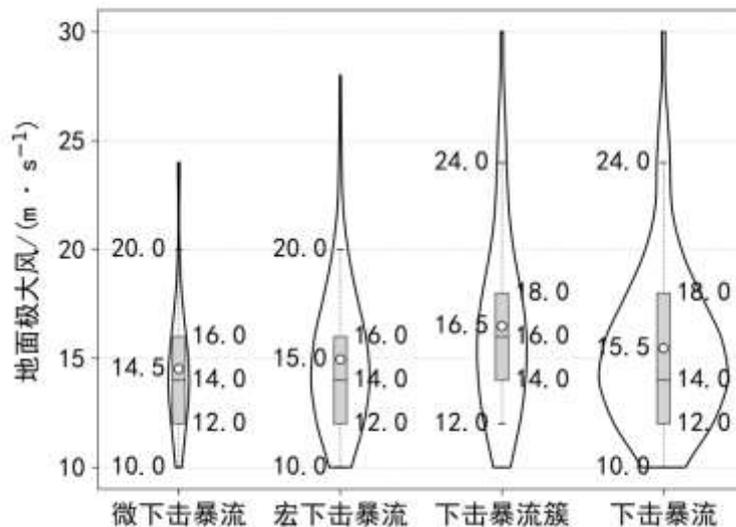


图 10 江苏 2019–2020 年 6–9 月不同类型下击暴流对应的地面极大风统计结果（样本数量：377）

Fig 10 Statistical results of surface maximum winds corresponding to different types of downbursts from June to September in 2019—2020 in Jiangsu (sample number: 377)

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 min，75%分位数为 36 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 < 下击暴流簇。

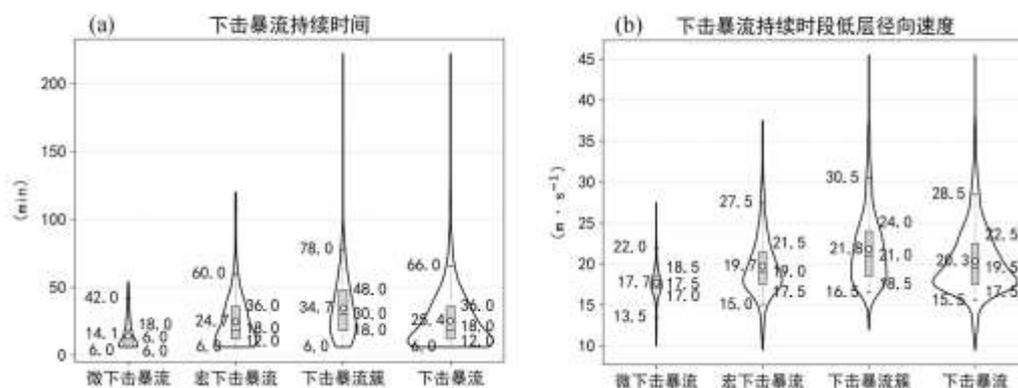


图 11 江苏 2019–2020 年 6–9 月不同类型下击暴流的 (a) 持续时间 (样本数量: 525) 和 (b) 持续时段径向速度 (样本数量: 2225) 特征统计 Fig 11 Statistical results of different types of downbursts for: (a) duration of downbursts (sample number: 525) and (b) low-elevation radial velocity during periods of downbursts (sample number: 2225) from June to September in 2019—2020 in Jiangsu

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 Derecho 的尺度（400 km 以上）和风暴影响面积（26.5~51.3 万 km^2 ）。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 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 级），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。

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 supercells and Derechos downbursts from June to September in 2019—2020 in Jiangsu

特征统计值	下击暴流	超级单体	Derecho
0~6 km 垂直风切变	$\leq 10 \text{ m s}^{-1}$	-	平均值为 19.8 m s^{-1}
尺度	平均尺度 8.6 km		影响范围大于 400 km
模态	大值区 26.7%	大值区 52 次 (92.9%)	大值区
非对称性	辐散速度对 73.3%	辐散速度对 4 次 (7.1%)	大值区
地面极大风	极端不对称 26.7%	极端不对称 92.9%	极端不对称
致灾大风比例	2.7% (10 次) 下击暴流对应的地面极大风达 25 m s^{-1}	$\geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 比例高	$\geq 25 \text{ m s}^{-1}$
持续时间	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

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，下击暴流日内发生的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%（64 次）的微下击暴流和 32.8%（82 次）的宏下击暴流发展为更大尺度类型的下击暴流，有 59.6%（96 次）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 12–19，其中 15–16 时发生频数最多。
- (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，而仅有 32 次下击暴流（6.1%）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仅 7 次；下击暴流对应的地面 10 m 极大风平均风速为 15.5 m s^{-1} ，仅有 2.7% 的地面极大风超过 25 m s^{-1} 。下击暴流平均持续时间为 25.4 min，持续时段内低层径向速度平均值为 20.3 m 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，水平分辨率 500 m，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 6 min，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 时和 20 时的 0~6 km 垂直风切变 $\leq 10 \text{ m s}^{-1}$ 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，将在后续下击暴流发生前的环境特征部分进一步研究。

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).
- 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).
- 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. 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. 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, 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 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).
- 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.
- 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 mesocyclones, 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.
- Theodore Fujita T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago: University of Chicago: 19-20.
- Theodore 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.
- Theodore Fujita T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534.
- Theodore Fujita T, 1985. The downburst: microburst and macroburst[R]. Chicago: University of Chicago.
- 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 III 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.

