

费海燕,王秀明,俞小鼎,等,2025. 强龙卷超级单体与非龙卷超级单体的双偏振雷达回波特征对比[J]. 气象, 51(11):1559-1570. Fei H Y, Wang X M, Yu X D, et al, 2025. Comparing polarimetric radar signatures of significant tornadic and non-tornadic supercells[J]. Meteor Mon, 51(11):1559-1570(in Chinese).

强龙卷超级单体与非龙卷超级单体的 双偏振雷达回波特征对比^{*}

费海燕¹ 王秀明¹ 俞小鼎¹ 管 理²

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 超级单体风暴产生的强龙卷致灾严重, 预警难度大, 有必要增加对超级单体精细回波结构的认识。基于具有双偏振功能的 S 波段多普勒天气雷达观测资料, 选取 9 个强龙卷超级单体和 9 个非龙卷超级单体, 对比分析强龙卷和强风发生前的回波特征, 结果表明二者存在显著差异: 强龙卷超级单体的差分反射率因子(Z_{DR})弧向钩状回波处延伸, 中低层雹区面积小于非龙卷超级单体; 强龙卷超级单体低层差分传播相移率(K_{DP})足质心和 Z_{DR} 弧质心之间的分离距离平均值比非龙卷超级单体更大; 强龙卷超级单体低层中气旋显著偏强, 且龙卷发生前 24 min 和 6 min 中层中气旋维持在较低的高度(平均值分别为 4.2 km 和 3.1 km)。上述差异还需要更多个例来进一步确认, 以便为深入研究超级单体回波结构特征与龙卷形成机理之间的关系提供更多依据。

关键词: 强龙卷超级单体, Z_{DR} 弧, K_{DP} 足, 中气旋

中图分类号: P412, P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.052601

Comparing Polarimetric Radar Signatures of Significant Tornadic and Non-Tornadic Supercells

FEI Haiyan¹ WANG Xiuming¹ YU Xiaoding¹ GUAN Li²

1 CMA Training Centre, Beijing 100081

2 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: Significant tornadoes associated with supercells can cause severe disasters, but issuing tornado warnings is challenging. Therefore, it is essential to study the detailed echo structure of supercells. Based on the observations of S-band Doppler polarimetric radar, 9 significant tornadic supercells are compared with 9 non-tornadic supercells. The results demonstrate the significant differences between them. The detailed results are as follows. In significant tornadic supercells, the differential reflectivity Z_{DR} arc extends toward the hook echo, and the area of hail in the mid-to-low levels is smaller than in non-tornadic supercells. The average separation distance between the specific differential phase K_{DP} foot centroid and Z_{DR} arc centroid in low level is much larger in tornadic supercells than in non-tornadic supercells. In significant tornadic supercells, the low-level mesocyclone intensifies markedly. Additionally, 24 min and 6 min before the tornado occurs, the mid-level mesocyclone core remains at relatively low heights, averaged at the

^{*} 国家重点研发计划(2022YFC3004103)、国家自然科学基金项目(42375018、41875058)、中国气象局龙卷风重点开放实验室开放课题(TKL202302)和中国气象局青年创新团队(CMA2023QN06)共同资助

2025 年 2 月 8 日收稿; 2025 年 8 月 19 日收修定稿

第一作者: 费海燕, 主要从事灾害性强对流天气临近预报研究. E-mail: feihy2009@163.com

通讯作者: 王秀明, 主要从事灾害性强对流天气形成机理及短时临近预报研究. E-mail: wangxm@cma.gov.cn

height of 4.2 km and 3.1 km, respectively. The aforementioned differences require further confirmation of more cases so as to provide additional evidence for in-depth research on the relationship between the echo structure characteristics of supercells and the mechanisms of tornado formation.

Key words: significant tornadic supercell, Z_{DR} arc, K_{DP} foot, mesocyclone

引言

龙卷是与陆地或水面接触的剧烈旋转的空气柱。在全球,美国的龙卷发生频率最高,2008—2018 年夏季,美国发生的强龙卷(增强型藤田级 EF2+) 占有龙卷事件的 11.7%,但造成了同期所有龙卷死亡人数的 96%(Gibbs and Bowers, 2019)。虽然所有龙卷都可能存在潜在的危险,但绝大部分灾害损失由强龙卷事件造成。Bluestein(2013)研究表明龙卷主要在超级单体和线状对流风暴中生成。在所有龙卷事件样本中,准线性对流风暴产生 EF1 级龙卷居多,几乎所有的 EF3 级以上龙卷都是由超级单体产生的 (Smith et al, 2012)。Rotunno and Bluestein(2024)总结近十年龙卷研究进展也是围绕龙卷超级单体展开,其中在理论进展方面,主要是改进包含龙卷母环流的超级单体风暴的基于数值模拟的概念模型,运用这些精细的模拟分析结果为区分龙卷超级单体和非龙卷超级单体提供了新的见解;在观测进展方面,随着多普勒雷达技术的改进,现已能够进行快速扫描和双偏振观测,这为龙卷形成、龙卷结构以及龙卷在其母超级单体中的位置提供了更准确的认识。

不是所有的超级单体都会产生强龙卷,即使那些产生强龙卷的超级单体,也可能并非生命周期中一直具有强龙卷特征,因此国内外研究学者一直在致力于研究强龙卷超级单体和弱龙卷或者非龙卷超级单体的近风暴环境和雷达特征区别。与非龙卷超级单体相比,龙卷超级单体通常发生在低层相对风暴螺旋度(SRH)更高,抬升凝结高度更低的环境中(Coffer et al, 2020; Zhou et al, 2022)。Hua and Anderson-Frey(2023)统计近风暴环境表明,混合层对流有效位能(MLCAPE)和 0~1 km SRH 可以显著区分龙卷与非龙卷环境。但是在相似的环境中龙卷超级单体和非龙卷超级单体共存,风暴相互作用和风暴对于近风暴环境的改变发生在较小的时空尺度上(约 2~20 km, 小于 10 min),多普勒天气雷达的时空分辨率高,可以观察到这些更小尺度特征。

Kingfield and LaDue(2015)发现龙卷旋转速度在 18~25.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,自动中气旋探测算法在区分弱、强龙卷方面具有最高的技能评分;Gibbs and Bowers(2019)通过分析 85 个产生强龙卷的超级单体风暴指出,更强的旋转速度和更深的涡旋可以有效地预测超级单体强龙卷的形成,旋转速度超过 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 可以作为识别强龙卷的预警指标之一;Homeyer et al(2020)研究发现,与非龙卷超级单体相比,龙卷超级单体的低层中气旋与中层中气旋以及风暴强上升气流区更垂直对齐。20 世纪 90 年代,随着双偏振观测技术的发展,运用双偏振参量为识别强龙卷提供了新思路。Ryzhkov et al(2005)研究发现,超级单体钩状回波处相关系数(CC)和差分反射率因子(Z_{DR})的显著下降,认为是龙卷抬升近地面的“碎屑”造成的,而这些特征在弱龙卷中不明显。在超级单体风暴前侧翼反射率因子梯度大值区域,距地 2 km 高度以下存在较高的 Z_{DR} 值(≥ 3 dB),被称为 Z_{DR} 弧(Kumjian and Ryzhkov, 2008)。Thompson et al(2012)发现 Z_{DR} 弧的大小与 0.4~3.0 km 的 SRH 存在强烈的正线性关系,可帮助区分龙卷超级单体和非龙卷超级单体。Dawson et al(2015)将 Z_{DR} 弧大小作为超级单体中 SRH 的替代指标。Homeyer et al(2020)研究发现,低层至中层 Z_{DR} 偶极子、低层 Z_{DR} 和差分传播相移率(K_{DP})增强区分离矢量、CC 低值以及风暴移向之间的结构配置有助于区分龙卷超级单体和非龙卷超级单体。国内的以往研究也给出了中国超级单体龙卷的环境参数特征、风暴结构和形成物理过程(王秀明等, 2015; 王秀明和俞小鼎, 2019; 俞小鼎等, 2021; 郑永光等, 2021; Zhang et al, 2023)。黄先香等(2024)研究广东近 60 年的龙卷,指出了强龙卷发生时通常伴随着低层中气旋(旋转速度 $> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和超过 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的龙卷涡旋特征速度差。

近年来,随着国内双偏振雷达的推广应用,基于双偏振雷达产品分析超级单体致灾对流风暴精细结构的研究增多。潘佳文等(2021)统计分析了不同高度层的三体散射、 Z_{DR} 柱等典型特征在大、小冰雹事件中的差异化特征;管理等(2022)通过自动识别双

偏振雷达 K_{DP} 足及 Z_{DR} 弧的变化来指示极端大风的发生;皇甫江等(2022)利用深度学习开展双偏振定量降水估测;李芳和刁秀广(2023)对比雷暴大风(同时伴有强降水或冰雹)为主型和单纯强降水为主型的低层双偏振雷达回波特征发现,前者的反射率因子(Z_H)和 Z_{DR} 大于后者。不少学者基于双偏振观测资料对冰雹、龙卷和强降水风暴精细结构进行了个例分析(李芳等,2024;王福侠等,2024;张哲等,2022;夏凡等,2024;杨祖祥等,2024;黄旋旋等,2024)。强龙卷和非龙卷强风超级单体的单偏振回波结构有类似之处,区分难度大,目前尚缺少基于我国双偏振雷达的强龙卷和非龙卷强风超级单体雷达

回波特征对比研究。本文基于 S 波段双偏振雷达探测资料,试图通过对比提取强龙卷和非龙卷超级单体风暴结构差异,提炼龙卷超级单体结构特征,为强龙卷超级单体预警提供支撑。

1 资料与方法

1.1 资 料

选取近五年发生的长生命史超级单体个例 18 个(表 1),所选龙卷个例均为 EF2 级及以上的强龙卷,其中包括 EF3 级龙卷 4 个,EF2 级龙卷 5 个;同

表 1 超级单体个例
Table 1 The supercell cases

编号	个例日期 (极值或等级)	主要天气现象	影响系统	近风暴环境特征				STP
				MLCAPE/ ($J \cdot kg^{-1}$)	$SH_{0 \sim 6}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$SRH_{0 \sim 1}/$ ($m^2 \cdot s^{-2}$)	$SRH_{0 \sim 3}/$ ($m^2 \cdot s^{-2}$)	
1	20240705(EF3)	EF3 级龙卷、短时强降水	高空槽和 低涡切变	2414.9	25.6	192.3	337.5	4.0
2	20240705(EF2)	EF2 级龙卷、短时强降水		2548.1	25.4	162.4	295.8	3.5
3	20240705(18 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、短时强降水		2234.9	22.5	114.9	222.5	1.7
4	20240427(EF2)	EF2 级龙卷、短时强降水	冷槽和 低涡切变	2245.8	23.6	164.1	232.0	3.0
5	20240427(24 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		1740.2	23.2	149.6	227.4	0.7
6	20240427(32 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、短时强降水		2837.6	20.7	115.4	192.7	2.4
7	20240427(20 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		1823.9	26.1	33.1	174.0	1.0
8	20230919(EF3)	EF3 级龙卷、短时强降水	副高外围高空槽 和低涡切变	1171.7	22.9	175.2	368.2	2.3
9	20230919(EF2)	EF2 级龙卷、短时强降水		1659.4	26.0	89.1	304.0	2.5
10	20230610(EF2)	EF2 级龙卷、冰雹	冷涡前倾槽和 低空弱切变	2481.1	21.5	30.7	52.2	0.6
11	20230610(28 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		2533.3	18.3	41.0	132.8	0.5
12	20230610(20 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹		3238.4	21.2	44.9	123.3	0.9
13	20210514(EF3)	EF3 级龙卷、短时强降水	副高和 低涡切变	3086.9	23.3	148.6	250.0	2.7
14	20210514(32 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		2653.5	22.1	130.7	248.2	2.3
15	20210514(20 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		2376.6	22.9	152.9	218.3	2.5
16	20210514(18 $m \cdot s^{-1}$)	雷暴大风、冰雹、短时强降水		2649.7	24.2	118.3	167.3	2.5
17	20210711(EF3)	EF3 级龙卷、短时强降水	高空冷涡和低涡切变	1790.6	23.7	212.2	436.2	2.8
18	20200722(EF2)	EF2 级龙卷、短时强降水	副高和低涡切变	2869.2	21.2	185.3	276.3	4.1

时挑选同一天相似天气环流背景下未产生龙卷的超级单体 9 个,其中包括 4 个超过 10 级以上大风个例,5 个 8 级以上大风个例。超级单体选取标准如下:(1)仅限于发生在距雷达站点 130 km 以内,根据 Smith et al(2015)研究表明,超过 130 km 范围则龙卷识别受到显著限制;(2)能被有双偏振功能的多普勒雷达探测到;(3)非台风龙卷;(4)超级单体符合右移特征;(5)超级单体中气旋持续时间 ≥ 1 h,属于长生命史超级单体。

双偏振观测量包含 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC,可用于分析超级单体风暴内部重要的微物理结构并且可以间接

反映动力结构。 Z_{DR} 提供了风暴水凝物平均粒子相态、形状、方向相关信息; K_{DP} 提供了关于给定雷达体积内液态含水量的信息,随着雨滴尺寸和浓度的增加而增加,与降雨率近似线性相关;CC 衡量样本体积内粒子类型、形状、相态和方向的一致性和多样性。

根据统计,超级单体龙卷的探测命中率为 85%,平均预警时间约为 17 min(Brotzge et al, 2013),而基于雷达径向速度最多可提前 20 ~ 30 min 预测强龙卷(Gibbs and Bowers, 2019)。强龙卷发生前超过雷达 4 个体扫(24 min)的数据时,

其可预测性显著下降(Gibbs, 2016)。因此选取强龙卷(非龙卷)前 24 min 和 6 min 的双偏振特征进行分析,比较强龙卷超级单体和非龙卷超级单体的雷达回波特征差异。

选取 ERA5 资料计算的龙卷和雷暴大风发生时刻前 1 h 近风暴环境特征参数(表 1),可以看出龙卷和雷暴大风超级单体 MLCAPE 平均值分别为 $2252 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2454.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变($\text{SH}_{0 \sim 6}$)平均值分别为 $23.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $22.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $0 \sim 1 \text{ km}$ 相对风暴螺旋度($\text{SRH}_{0 \sim 1}$)平均值分别为 $151.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $100.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; $0 \sim 3 \text{ km}$ 相对风暴螺旋度($\text{SRH}_{0 \sim 3}$)平均值分别为 $283.6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $189.6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 强龙卷参数(STP)平均值分别为 2.8 和 1.6。前两者没有显著差异,后三者整体上龙卷超级单体的值更高一些。美国业务上以 $\text{STP} > 1$ 作为 EF2 级及以上强龙卷可能发生的预警阈值,本研究中 89% 龙卷样本和 67% 的非龙卷样本均超过此阈值。Zhang et al(2023)研究指出中国强龙卷的 $\text{SRH}_{0 \sim 1}$ 平均值约为 $103 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,本研究中 78% 的龙卷样本和 67% 的非龙卷样本均超过该值,因此利用近风暴环境参数区分龙卷和非龙卷存在不确定性,需要结合其他信息(如双偏振雷达回波特征)进一步区分。

文中所用时间均为北京时。

1.2 方法

1.2.1 Z_{DR} 弧和 K_{DP} 足的自动识别

根据管理等(2022)的双偏振雷达 Z_{DR} 弧和 K_{DP} 足的自动识别算法,将双偏振雷达的 Z_{H} 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} 插值到直角坐标的网格上,水平和垂直分辨率均为 250 m。首先进行单体识别;然后选取单体前侧侧翼区域反射率因子梯度沿线 2 km 高度以下, $Z_{\text{DR}} \geq 3 \text{ dB}$ 、面积大于 1 km^2 ,经过随机森林模型识别以及与强单体质心的距离 $\leq 30 \text{ km}$ 约束,识别出 Z_{DR} 弧。若仅采用 3 dB 的 Z_{DR} 阈值,实际上会存在有些 Z_{DR} 值整体较低的超级单体无法识别出 Z_{DR} 弧,降低阈值至 2 dB 可较好地辨识这类超级单体的 Z_{DR} 弧,因此本研究采用 3 dB 和 2 dB 来共同辨识 Z_{DR} 弧特征。参考 van den Broeke (2020) Z_{DR} 弧的计算高度,选取 1 km 等高平面(AGL)上 Z_{DR} 弧面积、 Z_{DR} 弧平均值和最大 10 个像素值的平均值进行计算。强单体中心或后侧伴有超过 $1.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的 K_{DP} 大值区,若满足其面积大于 2 km^2 且强 K_{DP} 大值

区与强单体的质心距离 $\leq 15 \text{ km}$ 的约束条件,则识别为 K_{DP} 足。

1.2.2 K_{DP} 足- Z_{DR} 弧分离特征计算

在 1.2.1 节中 Z_{DR} 弧和 K_{DP} 足自动识别的基础上,计算两者质心的距离、分离矢量和风暴移动方向的夹角。如果强单体周围识别出多个 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧,根据两者的面积,以反距离权重法计算得到多个 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧的“相对”质心位置,计算 K_{DP} 足质心到 Z_{DR} 弧质心的距离和标注分离矢量,进而计算分离矢量到风暴移动方向的夹角(图 1,逆时针方向),风暴移动方向来自于前两个时次的风暴质心位置计算结果。

1.2.3 Z_{DR} 柱和冰雹区域的自动识别

在 1.2.1 节的基础上识别 Z_{DR} 柱和冰雹区域, Z_{DR} 柱的识别标准为湿球温度 0°C 层以上 $Z_{\text{DR}} \geq 1 \text{ dB}$;冰雹区域的识别标准为 $Z_{\text{H}} \geq 50 \text{ dBz}$, $Z_{\text{DR}} \leq 1 \text{ dB}$, $\text{CC} < 1$,运用此标准识别 3~5 km 高度上的冰雹分布区域。

1.2.4 中气旋旋转速度识别

选取强龙卷(非龙卷强风)发生前 24 min 内的所有双偏振多普勒雷达资料,使用质量控制后的基本径向速度和中气旋产品,结合人工订正判识确定低层($0 \sim 2 \text{ km}$)和 中层($2 \sim 7 \text{ km}$)中气旋的旋转速度 V_{rot} ,如式(1)所示(Gibbs and Bowers, 2019),其中 V_{max} 为最大正径向速度, V_{min} 为最大负径向速度。参考 Andra(1997)定义的弱中气旋和中等中气旋阈值,选取旋转速度 $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始计算,同时计算低层和 中层中气旋最强旋转速度的直径和所在高度。

$$V_{\text{rot}} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / 2 \quad (1)$$

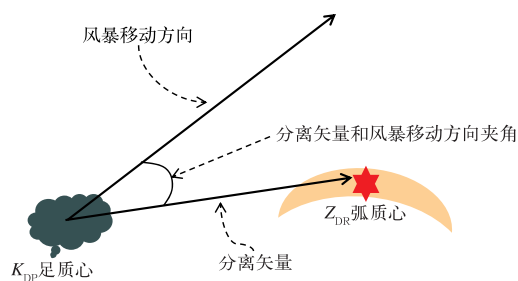


图 1 低层 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧的质心分离矢量与风暴移动方向夹角示意图(Loeffler and Kumjian, 2018)

Fig. 1 Schematic diagram of the angle between the centroids separation vector of the K_{DP} foot and Z_{DR} arc in low level and storm movement direction (cited from Loeffler and Kumjian, 2018)

2 结果分析

2.1 特征一:强龙卷超级单体低层 Z_{DR} 弧向钩状回波延伸

以 $Z_{DR} \geq 3$ dB 为阈值,9 个龙卷超级单体个例中有 8 个存在 Z_{DR} 弧,9 个非龙卷超级单体个例中有 7 个存在 Z_{DR} 弧。对于没有出现 Z_{DR} 弧的个例,降低 Z_{DR} 阈值为 ≥ 2 dB,龙卷个例均识别出 Z_{DR} 弧,非龙卷个例有 1 个没有识别出。表 2 显示有 7 个龙卷超

级单体出现 Z_{DR} 弧向钩状回波延伸的特征,2 个延伸不显著;而非龙卷超级单体个例则结果相反,仅 2 个超级单体的 Z_{DR} 弧向钩状回波延伸,其余 7 个均未出现此特征。 Z_{DR} 弧度量的变化可能揭示超级单体龙卷生命周期发展,龙卷生成之前 Z_{DR} 弧向钩状回波延伸显著,可能表明风暴的入流区具有增强的涡度(Dawson II et al, 2015; Kumjian and Ryzhkov, 2009),亦可定性表征低层中气旋显著增强。下文分析表明,非龙卷超级单体雹区范围大,而冰雹降落通常会表现出明显的 Z_{DR} 弧中断。

2021 年 5 月 14 日 18:50—19:05,江苏苏州盛

表 2 1 km 等高平面上的 Z_{DR} 弧特征
Table 2 The characteristics of Z_{DR} arc at 1 km AGL

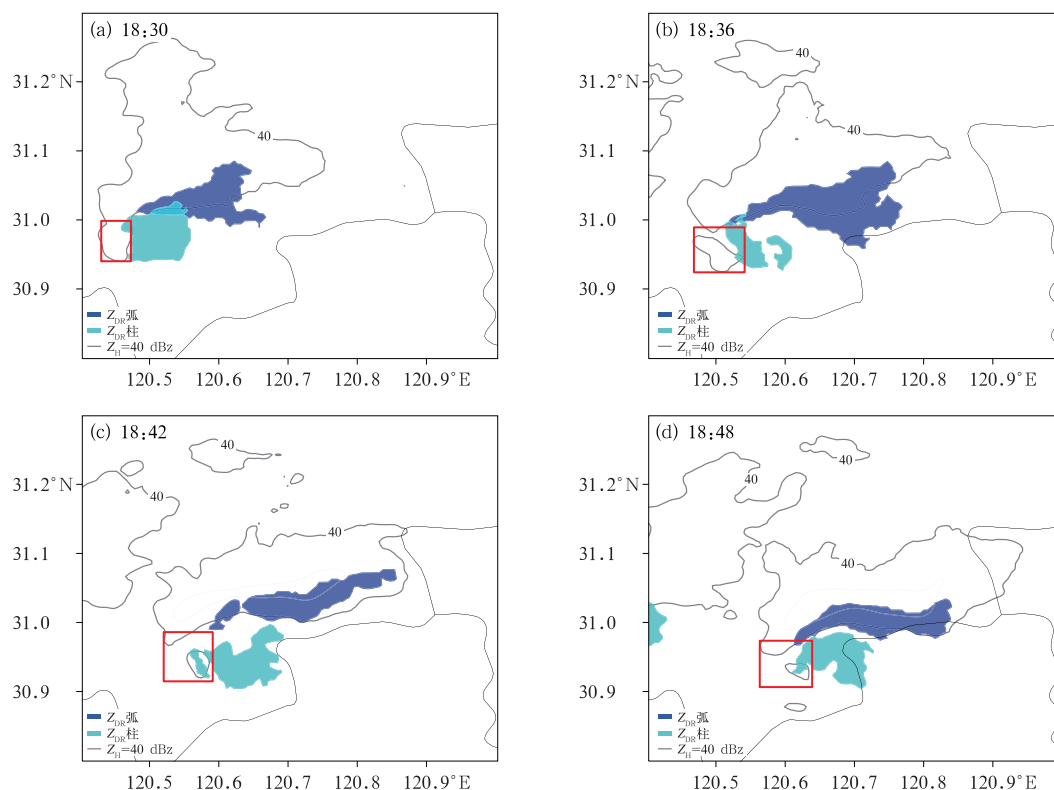
个例日期 (极值或等级)	Z_{DR} 阈值/dB	发生前 24 min Z_{DR} 弧平均面积/ km^2	是否出现 Z_{DR} 弧向 钩状回波延伸
20210514(EF3)	3	129.40	✓
20240427(EF2)	3	272.58	✓
20230610(EF2)	3	81.98	✓
20230919(EF2)	3	51.72	✓
20240705(EF3)	3	46.08	✓
20200722(EF2)	3	17.48	✓
20230919(EF3)	3	5.19	×
20240705(EF2)	3	4.61	×
20210711(EF3)	2	28.82	✓
20210514($32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	93.23	✓
20240427($24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	103.32	×
20230610($28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	28.44	×
20210514($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	61.45	×
20210514($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	58.89	✓
20240427($32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	20.26	×
20230610($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3	46.76	×
20240705($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2	10.93	×
20240427($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2	0	×

泽地区发生 EF3 级龙卷,龙卷影响时最大风力达到 17 级。图 2 显示其低层 1 km 等高平面上 Z_{DR} 弧(深蓝色区域)和 Z_{DR} 柱(浅蓝色区域)在龙卷发生前的演变。从 18:30(图 2a)到 18:48(图 2d),低层 Z_{DR} 弧面积有所增大,同时 Z_{DR} 弧向钩状回波头部处(图 2 红框)延伸。

Healey et al(2023)通过对比同一天气背景下相邻的龙卷和非龙卷超级单体的双偏振雷达 Z_{DR} 弧特征($Z_{DR} \geq 3.25$ dB)发现,龙卷和非龙卷发生前 30 min 的 Z_{DR} 弧平均面积分别为 17.5 km^2 和 20.3 km^2 ,明显小于 van den Broeke(2021)研究的 Z_{DR} 弧特征结果($Z_{DR} \geq 3.5$ dB),后者分别为 78.6 km^2 和 40.0 km^2 ,原因是后者挑选的超级单

体风暴更大更明显。挑选表 2 中 Z_{DR} 弧面积更大($\geq 20 \text{ km}^2$)的超级单体进行对比发现,龙卷和非龙卷发生前 24 min 的 Z_{DR} 弧平均面积分别为 116.4 km^2 和 58.9 km^2 。龙卷超级单体个例的 Z_{DR} 弧强度平均值和最大 10 个像素值的平均值分别是 3.2 dB 和 3.9 dB,稍大于非龙卷个例相应的平均值(3.0 dB 和 3.7 dB),并无显著差异,与 van den Broeke(2020)统计结果类似。

以上分析表明基于 Z_{DR} 弧面积区分龙卷和非龙卷超级单体存在明显的尺度依赖,对于显著更大的超级单体龙卷风暴, Z_{DR} 弧面积有一定的作用,但对于 Z_{DR} 弧面积本身较小的超级单体来说,该方法作用有限。



注:红框代表钩状回波位置。

图 2 2021 年 5 月 14 日苏州强龙卷超级单体 1 km 等高平面上 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱演变

Fig. 2 Evolution of Z_{DR} arc and Z_{DR} column of the significant tornadic supercell at 1 km AGL in Suzhou on 14 May 2021

2.2 特征二:中低层非龙卷超级单体比龙卷超级单体具有更持久的冰雹区域

运用 K_{DP} - Z_{DR} 自动算法识别 3.5 km 等高平面上冰雹区域发现(图 3),非龙卷超级单体冰雹区域面积平均值大于龙卷超级单体,同时随着强对流天气临近,非龙卷的冰雹区域平均面积明显增强(图 3 中蓝线),平均值从 62.8 km^2 (发生前 24 min)增至 133.2 km^2 (发生前 6 min);而龙卷的冰雹区域平均面积则略有减小(图 3 中橙线),平均值从 47.4 km^2 (发生前 24 min)减小到 35.4 km^2 (发生前 6 min)。这与 van den Broeke(2020)研究非龙卷超级单体的冰雹区域结果类似。即非龙卷超级单体比龙卷超级单体具有更持久的冰雹区域(Kumjian and Ryzhkov, 2008)。龙卷超级单体的上升气流可能会因低层中气旋产生的更强的向下垂直扰动气压梯度力而减弱,冰雹胚胎无法在上升气流中停留足够长时间,因此导致龙卷超级单体中的冰雹区域更小、持续时间更短。一般来说,冰雹区域越大,由融化和蒸发导致

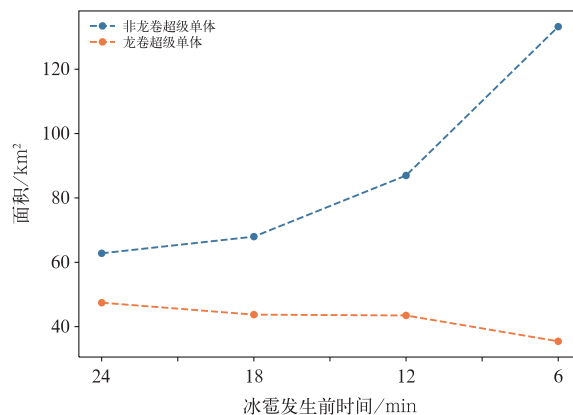


图 3 非龙卷超级单体和龙卷超级单体冰雹区域平均面积时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of average area of the hail zone in non-tornadic supercells and tornadic supercells

的负浮力越大,拖曳作用亦更为显著,或将导致过强的冷池和阵风锋,从而不利于龙卷形成。

此外,本研究同时发现,非龙卷超级单体中冰雹

区域更倾向于向后侧下沉气流处伸展,而龙卷单体中冰雹区域出现在前侧下沉气流区域。2021 年 5 月 14 日影响苏州盛泽地区的超级单体,初始触发生成于安徽郎溪西南侧,16:54 左右已加强为超级单体移入太湖地区,17:50—18:00 还未产生龙卷前,先引发了 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷暴大风。17:24—17:42 此超级单体 3.5 km 等高平面上冰雹区域(图 4 黄色区域)不断增大,从 75.11 km^2 增大到 187.21 km^2 ,此时风暴移动方向方位角为 270° ,冰雹区域更倾向于向风暴移动的后侧下沉区域伸展,逐渐靠近并进入 Z_{DR} 柱(图 4 蓝色区域)表征的上升气流区。范围大且向后侧下沉气流区延伸的冰雹区域理论上将产生范围更大的冷区和更强的后侧阵风锋,这将限制通常位于风暴右后侧的超级单体上升气流。

18:18,上述超级单体与南侧移入对流单体合并加强,18:24 重新形成钩状回波,18:50 产生 EF3 级龙卷。分析期间 3.5 km 等高平面上冰雹区域(图 5 黄色区域)分布发现,此超级单体冰雹落区范围相较图 4 显著减小,同时逐渐集中于风暴运动前侧的下沉区域,与 Z_{DR} 柱(图 5 蓝色区域)表征的超级单体

上升气流区完全分离,完全不同于之前产生雷暴大风时 Z_{DR} 柱与冰雹区配置(图 4)。

2.3 特征三:龙卷超级单体低层 K_{DP} 足质心和 Z_{DR} 弧质心的分离距离更大

低层 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧质心的分离距离是判别低层风垂直切变、风暴相对螺旋度和风暴入流的指标之一,有助于区分龙卷和非龙卷超级单体(Healey and van den Broeke, 2023)。对 1 km 等高平面上 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧的质心之间分离距离进行分析发现(图 6),龙卷发生前 24 min、6 min 其超级单体的分离距离平均值分别是 8.3 km 和 9.3 km;而非龙卷超级单体分别是 7.8 km 和 6.3 km。龙卷超级单体的分离距离平均值明显比非龙卷超级单体更大,且临近强对流天气发生时呈现增大趋势。值得注意的是,虽然大多数龙卷样本个例的分离距离较大,但其样本离散度较大,说明部分龙卷超级单体的分离距离相对较小,这部分个例来源于之前 Z_{DR} 弧面积较小的个例,对于这部分个例的龙卷特征需要进一步研究。

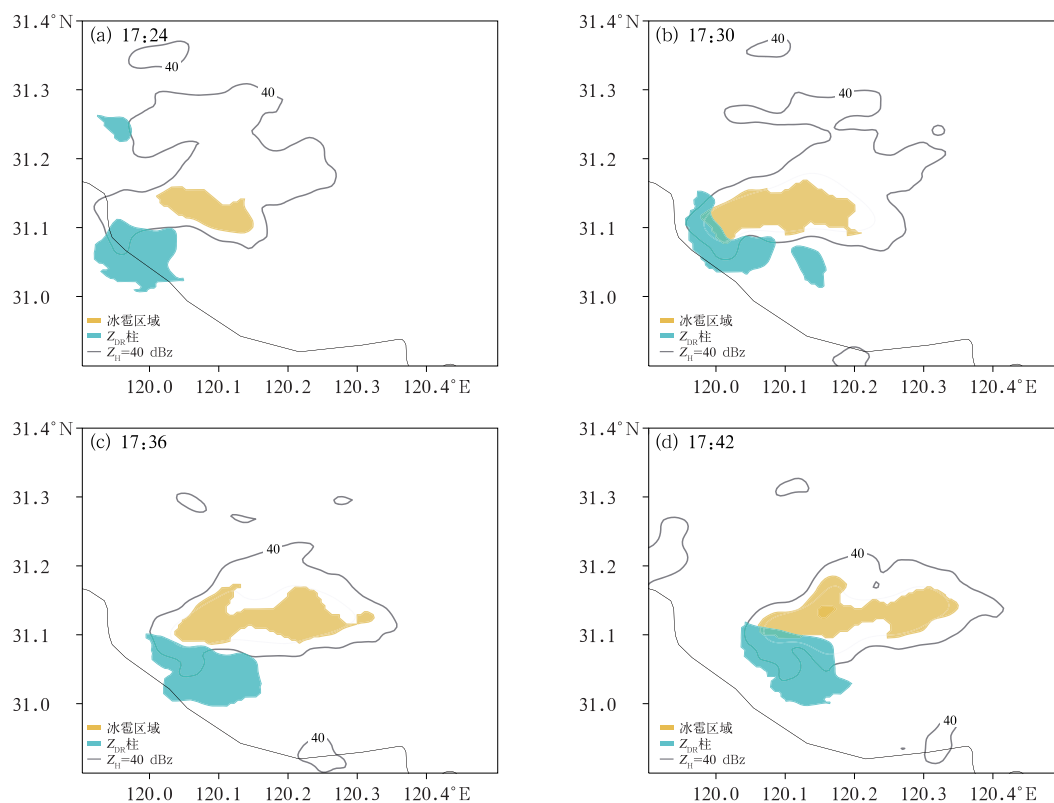


图 4 2021 年 5 月 14 日非龙卷超级单体 3.5 km 等高平面上 Z_{DR} 柱和冰雹区域演变

Fig. 4 Evolution of Z_{DR} column and hail area of the non-tornadic supercell at 3.5 km AGL on 14 May 2021

低层龙卷与非龙卷超级单体 K_{DP} 足和 Z_{DR} 弧的质心分离矢量与风暴运动的夹角相比,在前 6 min 其夹角平均值更大,分别是 25.6° 和 13.6° ,没有达

到正交的角度,在前 24 min 低层龙卷超级单体夹角平均值(42.5°)小于非龙卷超级单体夹角(67.9°) (图略)。Healey and van den Broeke(2023)研究表

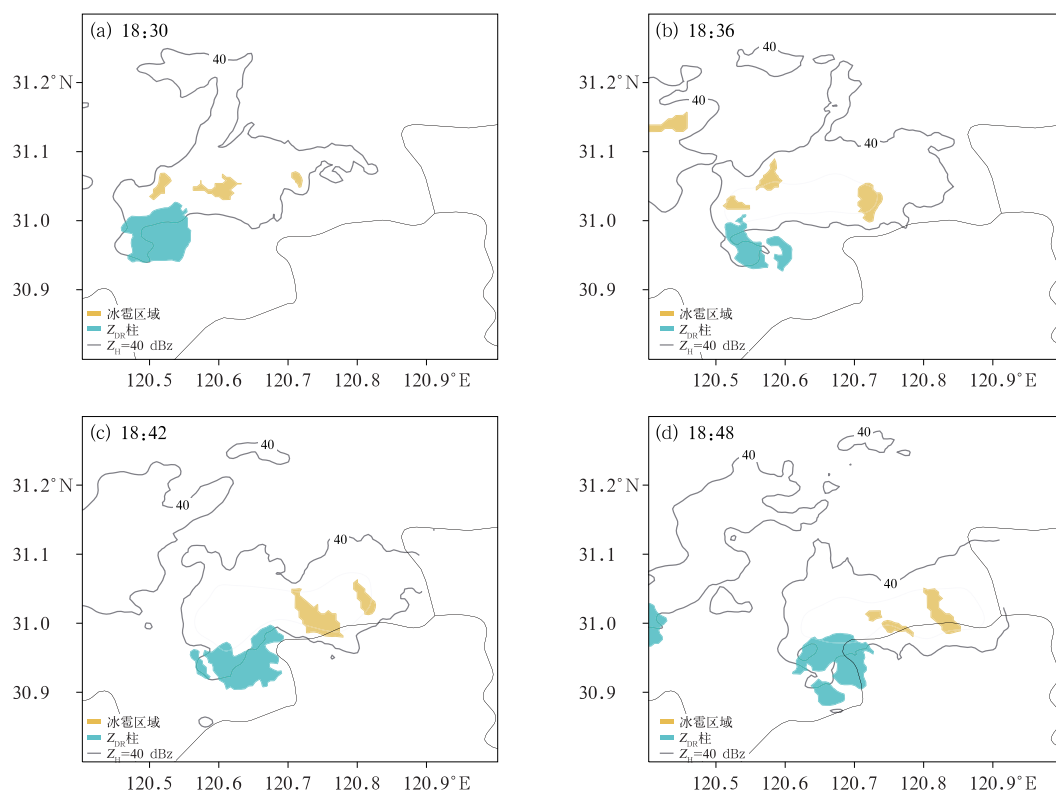


图 5 2021 年 5 月 14 日龙卷超级单体 3.5 km 等高平面上 Z_{DR} 柱和冰雹区域演变

Fig. 5 Evolution of Z_{DR} column and hail area of the tornadic supercell at 3.5 km AGL on 14 May 2021

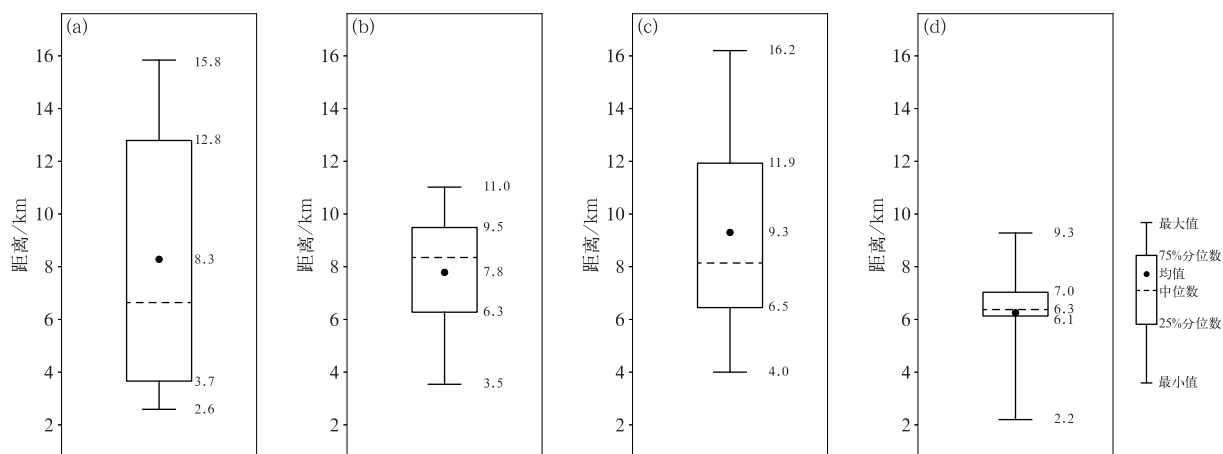


图 6 1 km 等高平面上 K_{DP} 足质心和 Z_{DR} 弧质心的分离距离箱线图

(a,c)龙卷发生前(a)24 min、(c)6 min, (b,d)非龙卷发生前(b)24 min、(d)6 min

Fig. 6 Box plots of the separation distance between the centroids of K_{DP} foot and Z_{DR} arc at 1 km AGL

(a) 24 min and (c) 6 min before the occurrence of tornadoes, (b) 24 min and (d) 6 min before the occurrence of non-tornadoes

明, K_{DP} 和 Z_{DR} 质心分离矢量与风暴移向的分离角无法区分龙卷超级单体和非龙卷超级单体。或许是由于样本量较小,同时该结果与风暴移动方向的稳定性有关。从现有个例看,基于分离角区分龙卷超级单体和非龙卷超级单体尚存在不确定性。

2.4 特征四:强龙卷超级单体低层中气旋增强且中层中气旋核低

分别对比 9 个龙卷和 9 个非龙卷超级单体的中层和低层中气旋特征发现,龙卷超级单体在强龙卷发生前的 24 min 和 6 min 都出现了低层中气旋,而非龙卷个例在大风发生前 6 min 仅有 4 个个例出现了低层中气旋,而前 24 min 无低层中气旋。强龙卷发生前 24 min 和 6 min 低层中气旋最大旋转速度、

直径和最大旋转速度高度(中气旋核)的对比显示(图 7,图 8),低层中气旋的旋转速度平均值从 $20.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (龙卷发生前 24 min)增加到 $26.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (龙卷发生前 6 min)。中气旋的平均直径减小,最大旋转速度高度平均值降低至 1.5 km 。所选样本中龙卷发生前 24 min 低层中气旋的旋转速度平均值接近广东 EF2 级以上强龙卷发生时低层中气旋旋转速度平均值($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) (黄先香等,2024)。龙卷超级单体具有增强的低层中气旋,意味着正处于近地层环境风随高度顺时针旋转增强相关的顺流水平涡度环境下,有利于引发低层垂直扰动气压梯度力,能够产生足够强而持续性拉伸,进而有利于龙卷涡旋形成(Coffer and Parker,2017;Fischer et al, 2024)。

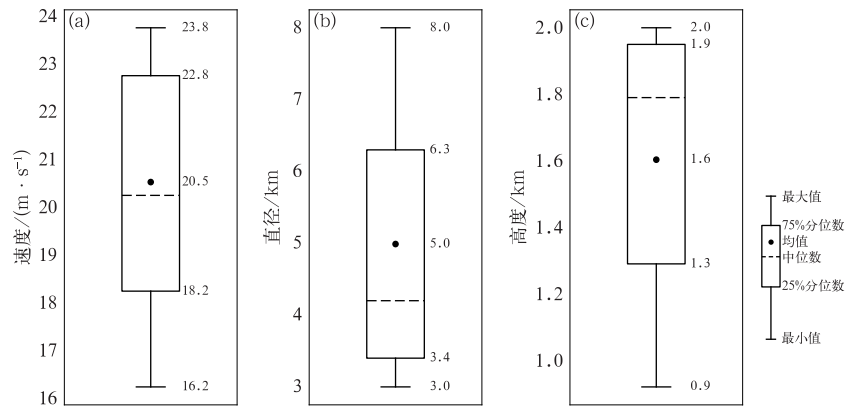


图 7 龙卷发生前 24 min 低层中气旋箱线图

(a)最大旋转速度,(b)直径,(c)最大旋转速度高度

Fig. 7 Box plots of the low-level mesocyclone 24 min before the occurrence of tornadoes
(a) maximum rotational velocity, (b) diameter, (c) height of maximum rotational velocity

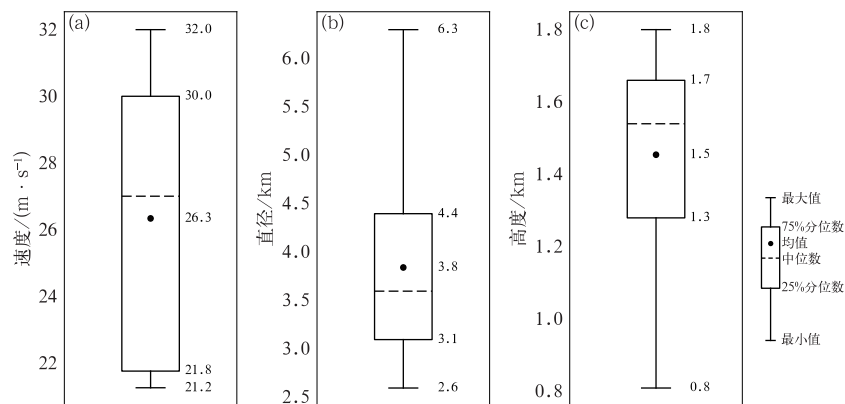


图 8 龙卷发生前 6 min 低层中气旋箱线图

(a)最大旋转速度,(b)直径,(c)最大旋转速度高度

Fig. 8 Box plots of the low-level mesocyclone 6 min before the occurrence of tornadoes
(a) maximum rotational velocity, (b) diameter, (c) height of maximum rotational velocity

对比龙卷和非龙卷个例的中层中气旋特征发现(图 9),龙卷超级单体的中层中气旋的最大旋转高度平均值在前 24 min 维持在 4.2 km,而在非龙卷超级单体中前 24 min 最大旋转高度平均值维持在 6.1 km;在临近时刻,最大旋转速度高度在两类风暴中均降低,分别为 3.1 km 和 4.8 km,整体上两个时间段龙卷超级单体个例最大旋转速度高度平均值均低于非龙卷超级单体个例。图 10 显示两类风暴中层中气旋的旋转速度对比,龙卷超级单体个例的

最大旋转速度平均值整体上均大于非龙卷超级单体个例,但是差别不是很显著。

业务上通常将强中气旋(旋转速度约 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)或低层中等强度中气旋(旋转速度约 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)作为龙卷预警指标。相当一部分达到上述指标的中气旋并不产生龙卷,因而使得龙卷虚警率高。上述分析表明,可将低层强中气旋(旋转速度约 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)进一步增强作为预警指标;此外,中层中气旋高度较低且下降、尺度减小,当出现低层中气旋

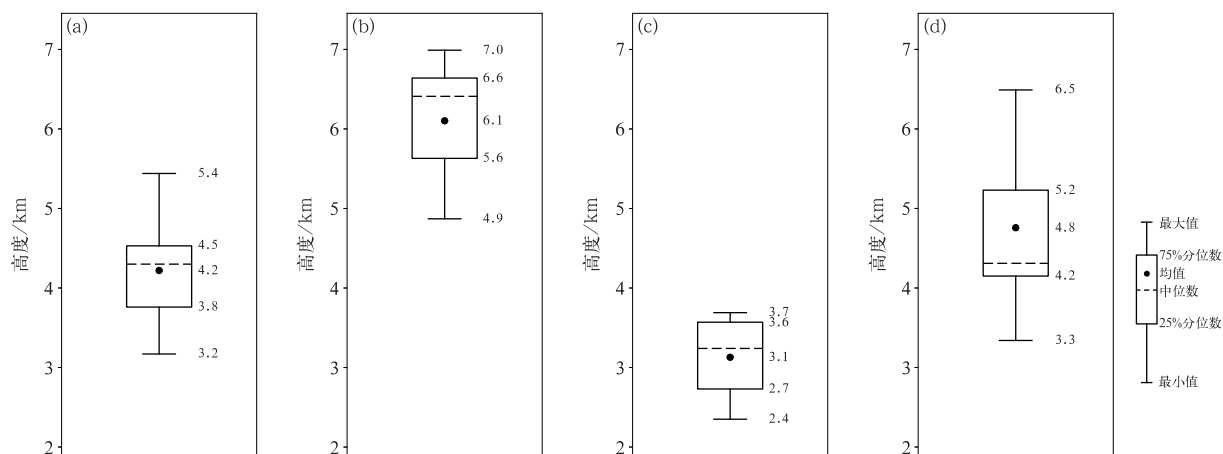


图 9 中层中气旋最大旋转速度高度箱线图

(a,c)龙卷发生前(a)24 min、(c)6 min,(b,d)非龙卷发生前(b)24 min、(d)6 min

Fig. 9 Box plots of the height of maximum rotational velocity for the mid-level mesocyclone

(a) 24 min and (c) 6 min before the occurrence of tornadoes, (b) 24 min and (d) 6 min before the occurrence of non-tornadoes

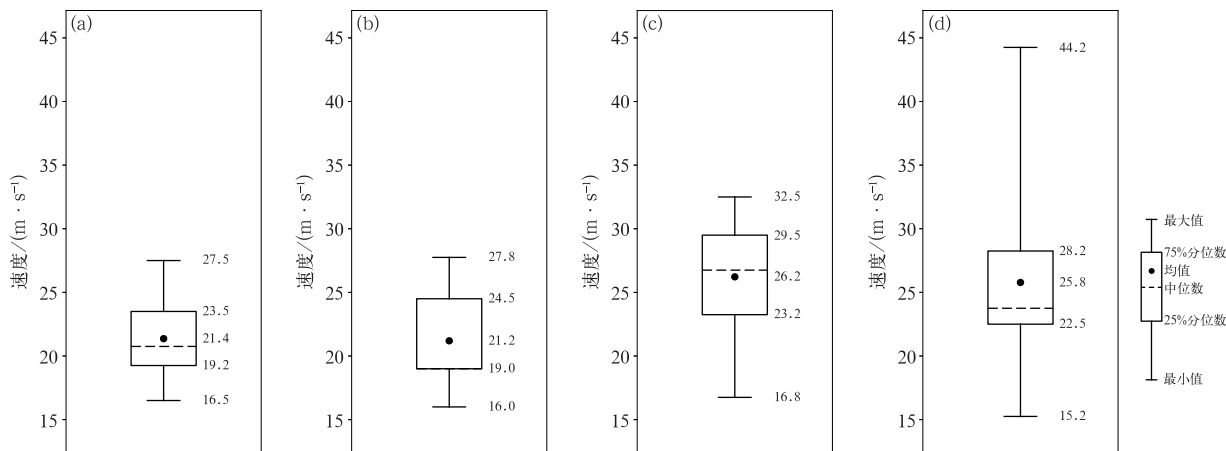


图 10 中层中气旋最大旋转速度箱线图

(a,c)龙卷发生前(a)24 min、(c)6 min,(b,d)非龙卷发生前(b)24 min、(d)6 min

Fig. 10 Box plots of the maximum rotational velocity for the mid-level mesocyclone

(a) 24 min and (c) 6 min before the occurrence of tornadoes, (b) 24 min and (d) 6 min before the occurrence of non-tornadoes

时,需保持密切关注。但是,雷达观测站与径向风的夹角、低层雷达数据质量和分辨率都会影响低层中气旋速度特征识别。

3 结论与讨论

基于 S 波段双偏振雷达,选取强龙卷超级单体和非龙卷超级单体进行对比研究,旨在解决业务中面临的从多个超级单体中判识龙卷超级单体的难题。结果表明:

强龙卷与非龙卷超级单体结构差异显著,临近时刻从风暴结构可判识可能产生龙卷的超级单体。强龙卷超级单体的 Z_{DR} 弧向钩状回波处延伸,且中低层冰雹区域面积平均值小于非龙卷超级单体。非龙卷超级单体冰雹区域增大的同时向后侧下沉气流区延伸,而龙卷超级单体冰雹区域显著缩小集中于前侧下沉气流区。强龙卷超级单体低层 K_{DP} 质心和 Z_{DR} 质心之间的分离距离平均值比非龙卷超级单体大,分离矢量与风暴运动的夹角平均值在前 6 min 比非龙卷超级单体大。强龙卷超级单体存在低层中气旋且在龙卷发生前显著加强,此外,龙卷发生前 24 min 和 6 min 中层中气旋维持在较低的高度,平均值分别为 4.2 km 和 3.1 km,显著低于非龙卷超级单体。

受强龙卷样本限制,文中分析的风暴样本数量较少,同时由于大部分雷达特征(如 Z_{DR} 弧和 K_{DP} 足)实际上仅在雷达 60 km 范围内观察效果最佳(Davis and Parker, 2012),因此目前可用的强龙卷数量极为有限。对于 Z_{DR} 弧特征的阈值选取,未来收集更多 Z_{DR} 弧值较小($Z_{DR} < 3$ dB)的样本个例,对其形成的原理和特征结构做进一步深入研究;同时文中给出的龙卷超级单体和非龙卷超级单体的雷达特征量化差异有待基于更多样本的统计和数值模拟研究确认,为深入研究超级单体回波结构特征与龙卷形成机理之间的关系提供更多依据。目前得到的结论符合一般龙卷形成机制的认识,对客观识别龙卷有参考价值。

参考文献

管理,戴建华,袁招洪,等,2022. 双偏振雷达 K_{DP} 足及 Z_{DR} 弧的自动识别及应用研究[J]. 气象学报, 80(4): 578-591. Guan L, Dai J H, Yuan Z H, et al, 2022. Research on dual-polarimetric radar K_{DP} foot and Z_{DR} arc recognition and application[J]. Acta Meteor Sin, 80(4): 578-591(in Chinese).

皇甫江,胡志群,郑佳锋,等,2022. 利用深度学习开展偏振雷达定量降水估测研究[J]. 气象学报, 80(4): 565-577. Huangfu J, Hu Z

Q, Zheng J F, et al, 2022. A study on polarization radar quantitative precipitation estimation using deep learning[J]. Acta Meteor Sin, 80(4): 565-577(in Chinese).

黄先香, 炎利军, 白兰强, 等, 2024. 广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征[J]. 气象, 50(7): 804-817. Huang X X, Yan L J, Bai L Q, et al, 2024. Spatio-temporal distribution of Guangdong tornadoes and characteristics of radar echoes of parent storms[J]. Meteor Mon, 50(7): 804-817(in Chinese).

黄旋旋, 陈刚, 赵坤, 等, 2024. 基于双偏振雷达变量垂直廓线特征的短时强降水和雷暴大风短时临近预报方法[J]. 气象, 50(12): 1519-1530. Huang X X, Chen G, Zhao K, et al, 2024. Improved nowcasting of short-time heavy precipitation and thunderstorm gale based on vertical profile characteristics of dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 50(12): 1519-1530(in Chinese).

李芳, 刁秀广, 2023. 不同类型强降水风暴低层双偏振参量对比分析[J]. 气象, 49(9): 1075-1084. Li F, Diao X G, 2023. Comparative analysis of low-level dual polarization parameters of different types of severe rainfall storm[J]. Meteor Mon, 49(9): 1075-1084(in Chinese).

李芳, 刁秀广, 魏鸣, 2024. 一次强冰雹超级单体风暴双偏振参量特征分析[J]. 气象, 50(2): 195-209. Li F, Diao X G, Wei M, 2024. Characteristic analysis of dual-polarization parameters of a severe hail supercell storm[J]. Meteor Mon, 50(2): 195-209(in Chinese).

潘佳文, 高丽, 魏鸣, 等, 2021. 基于 S 波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析[J]. 气象学报, 79(1): 168-180. Pan J W, Gao L, Wei M, et al, 2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observation[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 168-180(in Chinese).

王福侠, 薛学武, 杨吕玉慈, 等, 2024. 一次长生命史超级单体风暴双偏振参量结构及演变特征[J]. 气象, 50(10): 1216-1230. Wang F X, Xue X W, Yang L Y C, et al, 2024. Dual-polarization parameter structure and evolution characteristics of a long-life supercell storm[J]. Meteor Mon, 50(10): 1216-1230(in Chinese).

王秀明, 俞小鼎, 2019. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究[J]. 气象学报, 77(3): 387-404. Wang X M, Yu X D, 2019. A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado[J]. Acta Meteor Sin, 77(3): 387-404(in Chinese).

王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 425-441(in Chinese).

夏凡, 吴举秀, 申高航, 等, 2024. 泰山一次强雹暴微物理特征双偏振雷达和雨滴谱观测分析[J]. 气象, 50(9): 1129-1141. Xia F, Wu J X, Shen G H, et al, 2024. Observation analysis of dual-polarization radar and raindrop spectrum for microphysical characteristics of a hailstorm in Mount Taishan[J]. Meteor Mon, 50(9): 1129-1141(in Chinese).

杨祖祥, 李萌萌, 王磊, 等, 2024. 2023 年 9 月 19 日阜宁致灾强龙卷多源观测分析[J]. 气象, 50(12): 1467-1479. Yang Z X, Li M M, Wang L, et al, 2024. Analysis of multi-source observation of

- the disastrous tornado in Funing County on 19 September 2023 [J]. *Meteor Mon*, 50(12):1467-1479(in Chinese).
- 俞小鼎, 赵娟, 范雯杰, 2021. 中国龙卷的时空分布与关键环境参数特征[J]. *热带气象学报*, 37(5/6):681-692. Yu X D, Zhao J, Fan W J, 2021. Tornadoes in China: spatiotemporal distribution and environmental characteristics[J]. *J Trop Meteor*, 37(5/6):681-692(in Chinese).
- 张哲, 戚友存, 李东欢, 等, 2022. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. *大气科学*, 46(4):1002-1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al, 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(4):1002-1016(in Chinese).
- 郑永光, 刘非凡, 张恒进, 2021. 中国龙卷研究进展[J]. *气象*, 47(11):1319-1335. Zheng Y G, Liu F F, Zhang H J, 2021. Advances in tornado research in China[J]. *Meteor Mon*, 47(11):1319-1335(in Chinese).
- Andra Jr D L, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram[C]//28th International Conference on Radar Meteorology. Austin: American Meteorological Society:364-365.
- Bluestein H B, 2013. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics[M]. Berlin: Springer:167-398.
- Brotzge J A, Nelson S E, Thompson R L, et al, 2013. Tornado probability of detection and lead time as a function of convective mode and environmental parameters[J]. *Wea Forecasting*, 28(5):1261-1276.
- Coffer B E, Parker M D, 2017. Simulated supercells in nontornadic and tornadic VORTEX2 environments[J]. *Mon Wea Rev*, 145(1):149-180.
- Coffer B E, Taszarek M, Parker M D, 2020. Near-ground wind profiles of tornadic and nontornadic environments in the United States and Europe from ERA5 reanalyses[J]. *Wea Forecasting*, 35(6):2621-2638.
- Davis J M, Parker M D, 2012. Radar climatology of tornadoes occurring in high shear/low CAPE environments in the mid-Atlantic and Southeast[C]//26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society.
- Dawson D T II, Mansell E R, Kumjian M R, 2015. Does wind shear cause hydrometeor size sorting? [J]. *J Atmos Sci*, 72(1):340-348.
- Fischer J, Dahl J M L, Coffer B E, et al, 2024. Supercell tornadogenesis: recent progress in our state of understanding[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 105(7):E1084-E1097.
- Gibbs J G, 2016. A skill assessment of techniques for real-time diagnosis and short-term prediction of tornado intensity using the WSR-88D[J]. *J Operational Meteor*, 4(13):170-181.
- Gibbs J G, Bowers B R, 2019. Techniques and thresholds of significance for using WSR-88D velocity data to anticipate significant tornadoes[J]. *J Operational Meteor*, 7(9):117-137.
- Healey D J, van den Broeke M S, 2023. Comparing polarimetric signatures of proximate pretornadic and nontornadic supercells in similar environments[J]. *Wea Forecasting*, 38(10):2011-2027.
- Homeyer C R, Sandmæl T N, Potvin C K, et al, 2020. Distinguishing characteristics of tornadic and nontornadic supercell storms from composite mean analyses of radar observations[J]. *Mon Wea Rev*, 148(12):5015-5040.
- Hua Z X, Anderson-Frey A, 2023. How are tornadic supercell soundings significantly different from nearby baseline environments? [J]. *Geophys Res Lett*, 50(8):e2022GL102580.
- Kingfield D M, LaDue J G, 2015. The relationship between automated low-level velocity calculations from the WSR-88D and maximum tornado intensity determined from damage surveys[J]. *Wea Forecasting*, 30(5):1125-1139.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 47(7):1940-1961.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2009. Storm-relative helicity revealed from polarimetric radar measurements[J]. *J Atmos Sci*, 66(3):667-685.
- Loeffler S D, Kumjian M R, 2018. Quantifying the separation of enhanced Z_{DR} and K_{DP} regions in nonsupercell tornadic storms[J]. *Wea Forecasting*, 33(5):1143-1157.
- Rotunno R, Bluestein H B, 2024. Recent developments in tornado theory and observations[J]. *Rep Prog Phys*, 87(11):114801.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 44(5):557-570.
- Smith B T, Thompson R L, Dean A R, et al, 2015. Diagnosing the conditional probability of tornado damage rating using environmental and radar attributes[J]. *Wea Forecasting*, 30(4):914-932.
- Smith B T, Thompson R L, Grams J S, et al, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part I: storm classification and climatology[J]. *Wea Forecasting*, 27(5):1114-1135.
- Thompson R L, Smith B T, Grams J S, et al, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: supercell and QLCS tornado environments[J]. *Wea Forecasting*, 27(5):1136-1154.
- van den Broeke M S, 2020. A preliminary polarimetric radar comparison of pretornadic and nontornadic supercell storms[J]. *Mon Wea Rev*, 148(4):1567-1584.
- van den Broeke M, 2021. Polarimetric radar characteristics of tornado genesis failure in supercell thunderstorms[J]. *Atmosphere*, 12(5):581.
- Zhang C Y, Xue M, Zhu K F, et al, 2023. Climatology of significant tornadoes within China and comparison of tornado environments between the United States and China[J]. *Mon Wea Rev*, 151(2):465-484.
- Zhou R L, Meng Z Y, Bai L Q, 2022. Differences in tornado activities and key tornadic environments between China and the United States[J]. *Int J Climatol*, 42(1):367-384.