

王磊,王啸华,李杨,等,2023.2020年江苏高邮EF2级龙卷多尺度特征分析和预警思考[J].气象,49(3):291-303. Wang L, Wang X H, Li Y, et al, 2023. Multi-scale characteristic analysis and warning thoughts of EF2 tornado in Gaoyou County, Jiangsu Province in 2020[J]. Meteor Mon, 49(3):291-303(in Chinese).

2020年江苏高邮EF2级龙卷多尺度特征 分析和预警思考*

王磊^{1,2} 王啸华^{1,2} 李杨^{1,2} 张静^{1,2} 王易^{1,2} 吕润清^{1,2}

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210019

2 江苏省气象台,南京 210008

提 要: 综合应用自动站、雷达、卫星、探空等多源观测资料和 ERA-5 高分辨率再分析资料,详细分析了 2020 年 6 月 12 日江苏高邮 EF2 级龙卷的天气背景、环境条件、中尺度系统和对流风暴的演变特征,并总结了监测预警经验和预报思考。结果发现:此次高邮龙卷出现在江苏入梅后首场暴雨中,天气形势与 2016 年 6 月 23 日阜宁 EF4 级龙卷过程有部分相似,具有梅雨锋龙卷典型特征,产生龙卷的对流系统位于 500 hPa 东移西风槽前,850 hPa 低涡西南象限和低空急流左前端,伴有较强对流不稳定能量和较低抬升凝结高度,不同点在于对流有效位能和垂直风切变弱于阜宁龙卷过程;龙卷出现在地面移动的 β 中尺度低压顶部,处于地面辐合区和暖湿舌内,风暴中心附近辐合急剧增强可能对应于龙卷出现;产生龙卷的风暴具有较长生命史,在龙卷产生前 60 min 已识别到连续龙卷涡旋特征(TVS),移经高邮湖面风暴加强出现中气旋(M)并与 TVS 并存 8 个体扫,龙卷接地前 TVS 底高明显下降且切变增强,随时间演变中气旋直径呈“倒梯形”垂直结构、速度切变迅速增强下探,这些雷达特征可作为龙卷临近预警的重要参考。

关键词: 梅雨期龙卷,地面散度辐合区,中气旋,龙卷涡旋特征

中图分类号: P445, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.071801

Multi-Scale Characteristic Analysis and Warning Thoughts of EF2 Tornado in Gaoyou County, Jiangsu Province in 2020

WANG Lei^{1,2} WANG Xiaohua^{1,2} LI Yang^{1,2} ZHANG Jing^{1,2} WANG Yi^{1,2} LYU Runqing^{1,2}

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210019

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: Based on surface automatic observation data, Doppler radar data, Himawari-8 satellite data and ERA-5 high resolution reanalysis data, this paper analyzes the synoptic background, environmental conditions and evolution characteristics of mesoscale systems and convective storms of the EF2 tornado event that occurred in Gaoyou County, Jiangsu Province on 12 June 2020. The monitoring and early warning experience and forecasting thoughts are summarized as well. The results are as follows. The Gaoyou tornado occurred during the first rainstorm process at the beginning of Meiyu in Jiangsu Province. The synoptic condition was partly similar to that of the Funing EF4 tornado on 23 June 2016. The Gaoyou tornado and the Funing tornado both showed up typical characteristics of Meiyu front tornado. The convective system producing tornado appeared in front of 500 hPa westerly trough, in the southwest quadrant of 850 hPa vortex

* 国家自然科学基金项目(U2142203)、江苏省气象局 2022 年度科研项目(KZ202201、KQ202201、BJG202103)共同资助

2021 年 12 月 27 日收稿; 2022 年 6 月 19 日收修定稿

第一作者:王磊,主要从事短时临近气象灾害研究. E-mail:wendy_1121@126.com

通讯作者:王啸华,主要从事灾害性天气预报分析研究. E-mail:29947502@qq.com

and left side of low-level jet, with strong convective instability energy and low lifting condensation level. But CAPE and vertical wind shear of the Gaoyou tornado were weaker than in the Funing tornado process. The tornado occurred at the top of a moving meso- β scale depression, which was located in the convergence area of surface divergence and the surface temperature warm tongue. The convergence near the center of storm strengthened sharply, which might indicate the tornado. The storm generating the tornado had a long lifetime. Continuous tornado vortex signature (TVS) was recognized 60 minutes ahead. The storm passing through Gaoyou Lake was enhanced. Mesocyclones (M) appeared and coexisted with TVS within 8 radar volume scans. Before the tornado reached the ground, the bottom height of TVS decreased but shear increased significantly. The diameter of the mesocyclone decreased vertically in an inverted trapezoidal structure. The rotation speed shear strengthened, getting to the minimum height. All these features give good indications for the early warning of tornadoes. Based on synoptic-scale system model, meso- and small-scale environmental physical indexes and convective scale storm characteristic evolutions, Jiangsu meteorological departments had a progressive early warning, achieving a successful practice.

Key words: tornado in Meiyu period, convergence area of surface divergence, mesocyclone, tornado vortex signature (TVS)

引 言

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,往往由强烈发展的对流风暴所引发,多呈现接地漏斗云,具有尺度小、强度大、生消迅急、致灾严重等特点,能在短时间内造成重大的人员伤亡和财产损失(俞小鼎等,2006a;2006b;曾明剑等,2016;郑永光等,2016)。由于常规观测资料几乎难以捕捉此类小尺度对流系统生成发展的信息,故龙卷的监测和预警一直是业务技术难点;此外,探测技术的局限和龙卷仿真模拟的困难,也使得龙卷的研究成为中小尺度天气学的一大难题(黄先香等,2019)。

就全球范围而言美国是龙卷的高发国家,在龙卷的探测和研究方面取得了大量成果,现有的研究总结了有利于龙卷产生的环境条件(Brown et al, 1978; Brooks et al, 2003; Markowski and Richardson, 2010),提炼了 EF2 或以上级强龙卷发生的关键因子包括低的抬升凝结高度(LCL)、较大的低层垂直风切变(Craven et al, 2002; Evans and Dossell, 2002; Thompson et al, 2003),以及风暴相对螺旋度(SRH)、多要素综合的显著龙卷参数(STP)等(McCaul, 1991; Brooks et al, 2003; Thompson et al, 2014),并用多普勒天气雷达先后观测发现了中气旋(Fujita, 1963; Donaldson, 1970)、龙卷涡旋特征(TVS)(Brown et al, 1978)等速度场的涡旋特征。

此外,不少学者通过大量统计对龙卷的对流模态也有了更清晰认识(包括单体对流模态、准线状对流(QLCSs)和簇类对流模态等)(Trapp et al, 2005; Gallus et al, 2008; Duda and Gallus, 2010; Grams et al, 2012)。

我国龙卷的生成个数和强度远低于美国,因为幅员辽阔,龙卷的环流背景和环境参数具有明显地域差异,据统计强龙卷主要分布在东部平原及华南、东北等地势平坦地区(范雯杰和俞小鼎,2015)。华南地区 F2 级以上强龙卷主要发生在台风外围云带中,非热带气旋多造成 F0 级弱龙卷(郑艳等,2017; 袁潮等,2021; 黄先香等,2021)。多数东北龙卷出现在冷涡背景下,冷涡南侧次天气尺度短波槽为其直接影响系统,表现出高低空垂直风切强等特点(王秀明等,2015)。夏季江淮流域龙卷同样发生在具有低的抬升凝结高度、低层强垂直风切变的中等偏强的大气不稳定层结中(俞小鼎等,2006b; 郑媛媛等,2009; 姚叶青等,2012),梅雨期间较好的低层暖湿急流、低涡和中层弱冷空气为强龙卷的产生创造了有利的环境条件。曾明剑等(2016)对江淮梅雨期间的 10 次龙卷做合成分析,认为地面中尺度强气旋的右侧附近、对流层低层中尺度低涡右下方 200 ~ 300 km 处和低空急流左后侧之间区域是龙卷高度关注区。随着新一代多普勒天气雷达组网和双偏振改造等建设的日渐完善,高质量高分辨率资料的方便获取,使龙卷的预报和研究出现了崭新的局面(李

峰等,2020;吴芳芳等,2012;周后福等,2014;王易等,2018)对比了江淮地区超级单体龙卷个例的风暴环境条件和中气旋产品参数等,提炼出龙卷超级单体区别于其他对流风暴的特点是:低质心、强切变、较小直径和较低底高的中气旋。徐芬等(2021)指出江苏地区超过50%的龙卷产生于镶嵌在多单体风暴系统中的超级单体中气旋内,30%龙卷产生于准线性对流系统。

对于强龙卷的探索目前仍以个例研究为主,郑媛媛等(2009)研究了3次超级单体龙卷的天气背景和雷达特征指出,强龙卷发生前和发生时在多普勒雷达上都可探测到强中气旋和龙卷涡旋特征,且中气旋底高明显偏低,多在1 km以下;造成龙卷天气的超级单体风暴最大反射率因子(50~60 dBz)与风暴质心高度接近(3 km左右)。此外,姚叶青等(2007)、俞小鼎等(2008)、刘娟等(2009)、张小玲等(2016)、郑永光等(2020)对2005年7月30日安徽灵璧EF2级龙卷、2007年7月3日安徽天长EF2级龙卷、2016年6月23日江苏盐城EF4级龙卷、2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷等过程也做出了详细的分析,为我们了解龙卷对流风暴的形成条件、结构特征及成因机理进行了有益的探讨,但上述研究对龙卷个例预报服务的经验总结和思考讨论较少。

江苏地势平坦,邻江靠海,域内水系密集,龙卷出现频率位居全国首位(范雯杰和俞小鼎,2015)。本文综合应用地面加密自动站、多普勒天气雷达、葵花8号卫星、空间分辨率0.25°的ERA-5再分析资料等多源高时空分辨率资料,对2020年6月12日高邮EF2级龙卷风暴的天气形势、环境条件、中尺度系统和对流风暴特征演变进行细致分析,以期进一步提升对此类梅雨强降水过程中伴随的龙卷风暴的认知,并从业务实践角度总结了本次过程较成功预报预警的复盘思考和江苏省开展龙卷监测预警业务试验以来的服务经验。

1 天气实况和灾情调查

2020年6月12日,江苏省迎来入梅以来首场暴雨,其中沿长江及以北地区累计降水量达到大暴雨,局部大暴雨(12日08时至13日08时),降水期间同时伴有强雷电、短时强降水、雷雨大风和龙卷等多种、高强度的灾害性天气。地面自动气象观测资料显示,13:56距高邮湖东岸2.5~3 km的高邮镇出现了8级以上短时大风($17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。此次龙卷造成高邮城南区勤王、管伙、浩芝等村庄共计4人受伤,243户房屋受损,因灾造成群众财产、公共设施、农业设施等各类损失超过1500万元(图1)。

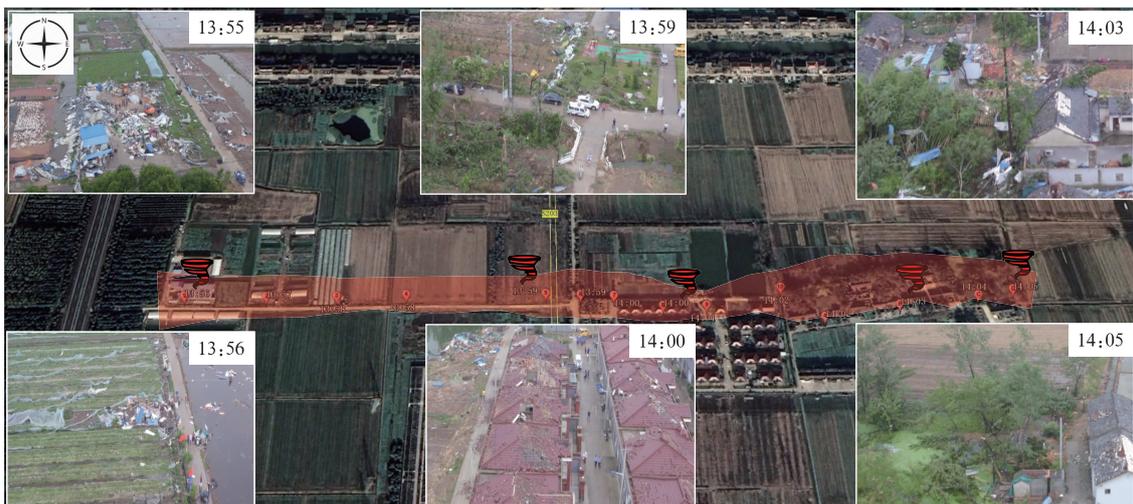


图1 2020年6月12日13:55—14:05无人机航拍的高邮城南区龙卷破坏轨迹
(红色阴影为破坏范围)

Fig. 1 Damage track of the tornado recorded by unmanned drones in the south of Gaoyou County, Jiangsu Province from 13:55 BT to 14:05 BT 12 June 2020
(Red shadow is the damage area)

2 天气背景和环境条件

梅雨环流、台风环流和东北/蒙古冷涡环流是我国龙卷常见的环流形势(王秀明等,2015;张小玲等,2016),尤其在6—7月上旬,苏皖平原正值梅雨盛期,伴生于强降水的龙卷时有发生,多由镶嵌在梅雨带中的对流单体发展或梅雨带南侧的孤立对流单体强烈发展所致(曾明剑等,2016)。本次高邮龙卷过程的背景形势与2016年6月23日阜宁EF4级龙卷(图2a)有部分相似,都属于典型的梅雨锋龙卷:受灾地高空位于西太平洋副热带高压以北584 dagpm等值线附近、华北冷涡底部及东移西风槽前。12—13日,副热带高压北抬(110°E脊线位于25°~27°N),其西北侧有深厚的西南气流北上,向沿江地区持续输送水汽和热量;同时,500 hPa有高空冷涡从蒙古高原南下进入我国华北,涡后不断有干冷空气补充,其底部中纬度西风带短波槽东移并影响江苏,受干冷空气和暖湿气流共同影响,苏皖中北部大气条件不稳定状态持续增强。

6月12日08时,850 hPa山东、河南交界有低涡生成,其南侧冷切向西南一直延伸到四川北部(图2b),且700 hPa槽线、850 hPa切变线位置非常接近,说明中低层锋区较陡峭,冷暖气团交汇剧烈;低涡东侧的暖式切变呈东西向横贯淮北地区,低空急流从川贵一带不断向江苏输送充沛的水汽,急流风速近 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,也提供了较大的低层垂直风切变及其北侧的气旋性切变条件。午后龙卷的发生地位于850 hPa华北低涡西南象限,暖式切变以南,活跃

的低空暖湿急流左前侧,并对应于200 hPa高空急流的显著分流,有利于对流高层辐散抽吸作用,气层不稳定且潮湿的大尺度背景形势利于强对流的触发和进一步发展。

从龙卷发生地附近格点的临近时次倾斜 $T-\ln p$ 图(图3)来看,两次过程均具有显著暖平流(风向随高度顺时针旋转)、高温高湿(近地层饱和,地面气温 $\geq 28^\circ\text{C}$)和高能(对流有效位能,CAPE $> 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)的环境大气,但也存在一定差异。计算得高邮龙卷前CAPE值为 $1137 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1),位于自西南向东北递减的CAPE梯度大值区内,而阜宁龙卷14时前后CAPE值达 $2869 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此高强度的CAPE得益于更暖湿的低层热力条件。与冰雹、雷雨大风等对流天气相比,龙卷出现对不稳定能量蓄积的条件要求较低,而EF2或以上级龙卷产生的重要条件是低的抬升凝结高度和强的低层垂直风切变(曾明剑等,2016;杨波等,2019)。两次龙卷发生地抬升凝结高度均较低,高邮龙卷更低至999.1 hPa(海拔高度约为36.3 m),远低于美国的经验值750~1000 m(Grams et al,2012),符合吴芳芳等(2013)对苏北地区72个超级单体风暴环境条件的统计分析(89%的龙卷事件对应抬升凝结高度在960 hPa上下)。高邮附近自由对流高度同样较低,造成对流抑制能量也较小($10 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),稳定层浅薄易触发深厚湿对流。高邮附近0~1 km和0~6 km风矢量差较大,分别为 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $16.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,基本达Craven et al(2002)、Thompson et al(2014)对美国强龙卷对流参数的统计值,但低层动力条件对比俞小鼎等(2008)、吴芳芳等(2013)对苏北龙卷个例的

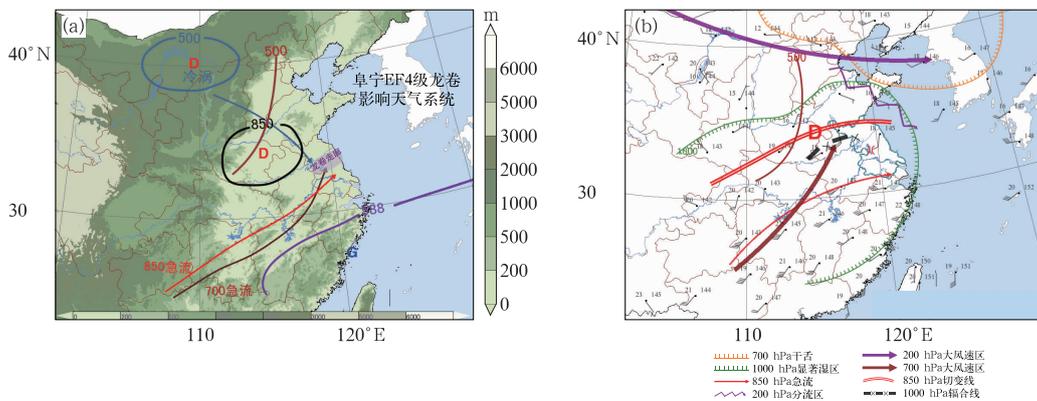


图2 (a)2016年6月23日阜宁龙卷影响天气系统,(b)2020年6月12日高邮龙卷中尺度分析

Fig.2 (a) Synoptic systems of Funing tornado on 23 June 2016 and (b) mesoscale analysis of Gaoyou tornado on 12 June 2020

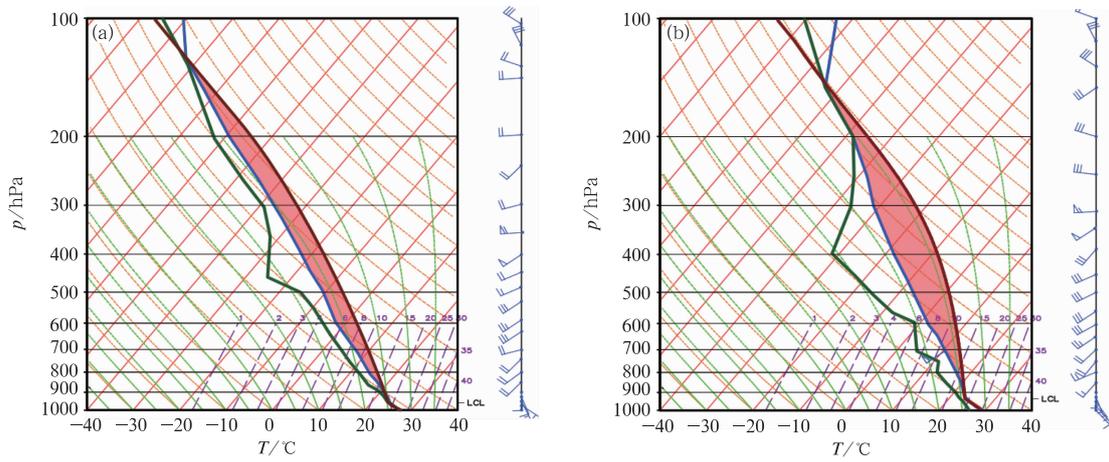


图 3 两次龙卷事件的倾斜 $T\text{-ln}p$ 图

(a)2020 年 6 月 12 日 13 时(32.75°N、119.5°E), (b)2016 年 6 月 23 日 14 时(33.75°N、119.75°E)

Fig. 3 Skew $T\text{-ln}p$ for two tornado events

(a) 13:00 BT 12 June 2020 (32.75°N, 119.5°E), (b) 14:00 BT 23 June 2016 (33.75°N, 119.75°E)

分析结果(63%的苏北龙卷 0~1 km 风矢量差 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)稍弱,垂直风切变的强度明显不及阜宁龙卷过程(0~1 km 和 0~6 km 风矢量差分别为 $12.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $23.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

综上对比,本次高邮龙卷过程与 2016 年 6 月 23 日阜宁 EF4 级龙卷过程同具有梅雨锋龙卷典型特征,天气形势上有部分相似,但因发生在入梅伊始(2020 年 6 月 9 日江苏入梅),“对峙”的冷暖系统在强度上都不及后者。此次过程在环境条件上具备了深厚湿对流发展所需的水汽、抬升和不稳定条件,兼具较大的 CAPE、较低的抬升凝结高度和较强的 0~6 km 垂直风切变。区别在 2016 年阜宁龙卷过程的热动力条件更为有利,尤其是强 CAPE 和较强 0~1 km、0~6 km 垂直风切变利于高强度中气旋龙

卷的出现。

3 中尺度对流系统演变特征

地面加密自动站资料显示,龙卷风暴的发展与地面辐合线和中尺度低压的移动关系紧密。12 日 13:00—14:00(图 4a)扬州—泰州—南通一线存在一地面辐合线,一直径约 100 km 的 β 中尺度低压自安徽滁州移入江苏,并大致沿地面辐合线方向移动。由该时段海平面气压场 1000 hPa 低压中心的变化(图 4c)可见,地面低压中心由苏皖交界处向东南方向移动到镇江附近,14:00 中心气压数值进一步下降,扬中国家气象站海平面气压低至 999.1 hPa,与周边站点气压差可达 2~3 hPa,龙卷出现位置对应上述 β 中尺度低压 1000 hPa 环流的顶部。在沿淮主体强回波以南,整个沿江至沿淮一带散度场均呈负值分布,13:50 辐合中心位于龙卷受灾地上游的扬州以西地区,负散度中心值达 $-20 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。从图 4b 泰州雷达 1.5°基本反射率可以看出,上述负散度中心对应于主雨带大片积层混合降水回波的强中心,并且可以清晰地看到产生龙卷的孤立单体位于高邮附近,同样处于负散度辐合区内。同时,从 13:52 地面气温的空间分布来看,高邮附近 2 m 气温呈南高北低,仅 0.5 个纬距内温差可达 5°C ,即存在一中尺度锋区。与 2016 年阜宁龙卷相似,受灾地也处在有利于龙卷生成的地面暖湿舌内(周海光, 2018)。引发龙卷的对流风暴最初形成于地面辐合

表 1 两次龙卷事件的对流参数

Table 1 Convective parameters of two tornado events

环境参数	2020 年 6 月	2016 年 6 月 23 日
	12 日高邮龙卷 (32.75°N、 119.5°E)	阜宁龙卷 (33.75°N、 119.75°E)
CAPE/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1137	2869
对流抑制能量/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10	12
抬升凝结高度,海拔 高度/hPa,m	999.1,36.3	989.7,130.9
0~1 km 垂直风矢量 差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	10.8	12.2
0~6 km 垂直风矢量 差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	16.9	23.1
925 hPa 比湿/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	17.8	19.5

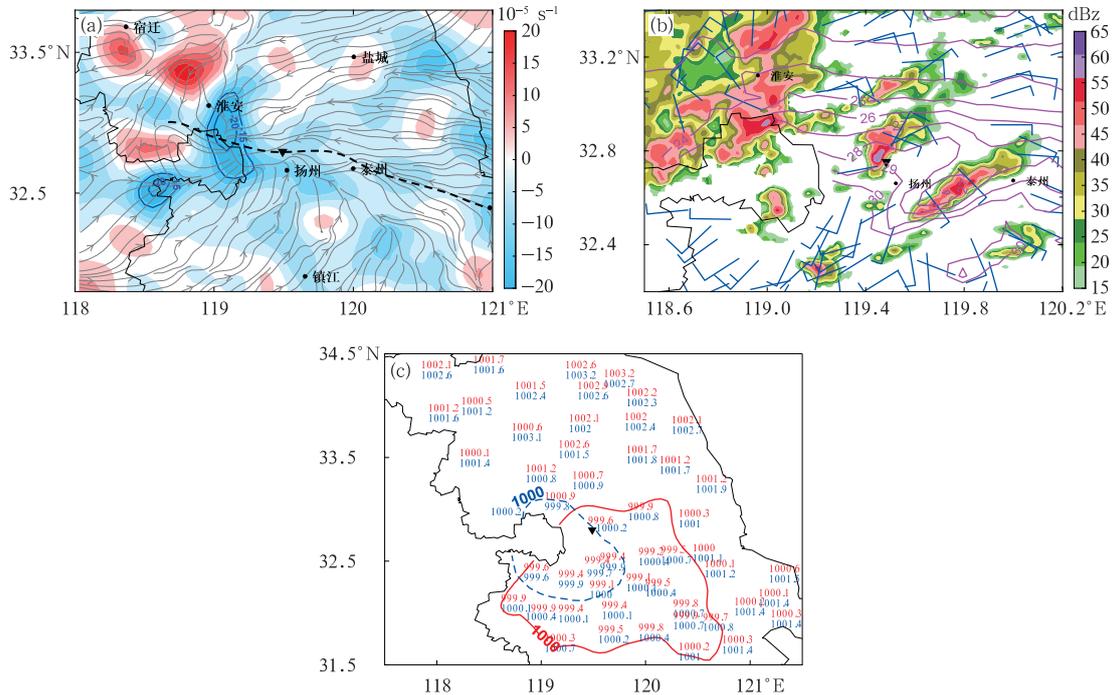


图 4 2020 年 6 月 12 日 (a)13:50 地面散度(填色,蓝色线表示负散度中心)和地面流场, (b)13:52 泰州雷达 1.5° 基本反射率(填色)、2 m 气温(等值线,单位: $^\circ C$) 和 2 min 风, (c)13:00—14:00 自动站海平面气压值及 1000 hPa 等压线变化 (数值和等值线,蓝色:13:00,红色:14:00; ▼为龙卷受灾地)

Fig. 4 (a) Surface divergence (colored, blue line: the center of negative divergence) and surface stream field at 13:50 BT, (b) Taizhou radar reflectivity at 1.5° elevation (colored), 2 m air temperature (contour, unit: $^\circ C$) and 2 min wind at 13:52 BT, (c) changes of sea level pressure values and 1000 hPa contours from automatic observation data during 13:00—14:00 BT 12 June 2020 (value and contour: blue for 13:00 BT and red for 14:00 BT, ▼: the position of tornado-hit spot)

线附近,后途经上述地面辐合中心而增强,在中尺度锋区的发展下产生小尺度局地环流,且局地扰动的温度梯度(锋区)进一步导致垂直切变的增强,风暴不断加强、组织化,最终导致龙卷的出现(孙继松和杨波,2008;曾明剑等,2016)。

根据雷达风暴跟踪信息(STI)产品提取了龙卷对流风暴中心的经纬度信息,并据此标记了该龙卷风暴的移动路径(图 5a)。图 5b 绘制了该单体在移动和发展过程中风暴中心点所对应的地面散度和风暴中心云顶亮温随时间的变化,地面散度值基于江苏高时空分辨的自动站风场资料(分辨率约为 5 km)并采用最邻近插值方法计算,云顶亮温值来自葵花 8 号静止气象卫星红外通道数据。图 5b 风暴中心附近散度值的变化与该风暴的演变有较好的对应:12:48 南京雷达第一次识别到龙卷涡旋特征,此时风暴中心辐合(负值),随后该风暴穿越高邮湖

面其中心的辐合程度不断增强,中心负散度值不断加大;13:30 前后,该单体回波中心突然增强并出现悬垂结构,风暴中心附近也开始出现不断增强的下沉气流,表现为地面辐合中心的强度逐渐减弱;13:40 左右中气旋出现,风暴中心地面散度甚至转为以辐散为主的正值;13:50—13:56,风暴中心地面散度数值出现急剧下降(图 5b 折线),表征风暴中心的辐合猛烈加强,这一时段正对应于风暴内部出现涡管接地现象(即龙卷天气出现)。这种地面散度剧降的信号如果能经更多个例的验证,亦可成为我们临近预警龙卷的参考和过程回溯的判据。而后,地面散度阶段性的增大和减小与风暴中涡管的收缩和拉伸有关,与我们在实际灾调过程中发现龙卷“跳跃式”行进并造成灾损相一致。

此外,图 5b 中柱形反映了对流风暴中心在葵花 8 号卫星 $11.2 \mu m$ 长波红外通道的相当黑体亮

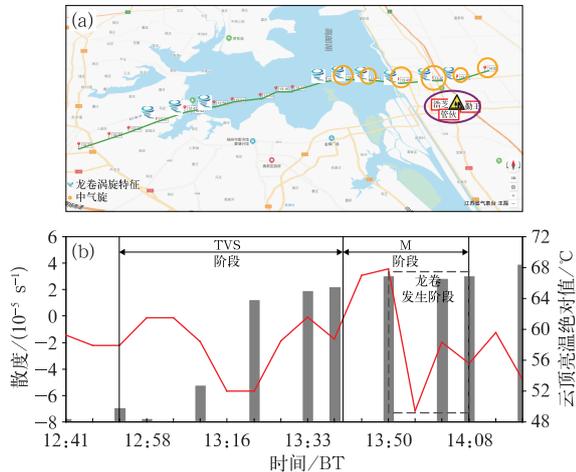


图5 2020年6月12日(a)龙卷对流风暴路径和(b)龙卷对流风暴中心物理量变化

(图5a中标记江苏强天气综合报警追踪平台识别的TVS和M,图5b折线表示地面散度,柱形图表示云顶亮温的绝对值)

Fig. 5 (a) The path of tornado convective storm, (b) physical quantities near the storm center varies with time on 12 June 2020 [In Fig. 5a, TVS and M identified by Jiangsu Severe Weather Alert and Track Comprehensive Horn Platform (SWatch) are marked; in Fig. 5b, the broken line represents surface divergence, the columns show the absolute value of brightness temperature of the cloud top]

温TBB值变化,可以发现龙卷过程的开始也伴随着风暴中心云顶亮温的增强,由 -64.9°C (13:40)增强到 -66.9°C (13:50),类似卫星资料的应用有助于我们预判对流的增强和发展,但对于对流种类的识别作用还需进一步探索。

4 对流风暴演变特征

4.1 回波演变特征

本次龙卷由梅雨带东南侧一孤立超级单体造成,该单体生成于安徽天长附近,起初并不起眼,后逐渐加强进入江苏高邮境内,12:46南京雷达首次探测到龙卷涡旋特征(TVS),早于龙卷天气近60 min。随后风暴自西向东穿越高邮湖面,受下垫面摩擦影响减小的影响风暴迅速增强,南京、淮安、泰州等多部雷达连续数个个体扫识别到TVS。13:34

主雨带强回波发展为细长的多单体线状对流风暴,龙卷母体风暴经高邮湖后更加组织化,强中心也更聚合,从泰州雷达 0.5° 仰角基本反射率图上可见明显的暖湿气流流入流缺口,高悬的强反射率因子位于入流缺口西侧, 6.0° 仰角上回波中心强度达66 dBz(图6b)。此时,从 2.4° 仰角径向速度图上(图6c)可识别出 $-24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的三维切变,虽然速度切变较大但尚不满足对称特征。

13:40起多部雷达识别到连续的中气旋特征(M),标志着风暴的旺盛发展和超级单体的形成:由 0.5° 仰角基本反射率因子图上可见清晰的前侧入流缺口和其西南侧的钩状回波头部逐渐形成(图6d),强回波中心约为58 dBz距地4.5 km并对应低仰角的有界弱回波区(图6e); 2.4° 仰角速度场上(图6f)可见一直径为4.3 km中气旋,暖湿入流速度为 $+7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,后侧下沉气流导致的出流速度为 $-24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,经计算其旋转速度为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (距离雷达60 km),属于中等强度的中气旋。

13:51—13:57,泰州雷达 0.5° 仰角基本反射率图(图6g,6h)上仍维持钩状回波型态,但最强回波中心持续下降,13:51 TVS的最强切变值达 $38\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 且底高首次下降到0.8 km。从淮安 1.5° 仰角速度图上可识别出现像素级的相邻速度对($-12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的入流和 $>27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的出流)(图6i)。值得注意的是,风暴移经高邮湖面加强并出现中气旋后,与龙卷涡旋特征嵌套出现达8个体扫,龙卷正发生于这一阶段。随着TVS特征消失,强回波及地后超级单体主体回波中心强度也逐渐减弱。

基于同时期雷达基数据,我们利用GR2analyst分析软件的立体渲染(VR)技术生成了高分辨率、半透明的垂直剖面 and 3D立体产品,图7可以更清晰地反映对流风暴的三维结构和发展演变:13:34(图7a~7c),垂直于入流缺口方向做剖面可以看到由强上升运动造成的突然增强的高悬强回波和一侧明显的悬垂结构;13:46(图7d~7f),回波中心强度减弱下探,但风暴内部旋转加强首次出现中气旋,标志着龙卷风暴已发展成为孤立的超级单体风暴,并且由强对流和环境风场的差异造成了风暴回波自下向上、向移动方向的右侧出现倾斜;13:51(图7g~7i),经平滑处理后 0.5° 仰角基本反射率钩状特征明显,回波质心下降,龙卷灾情出现在钩状头部附近。

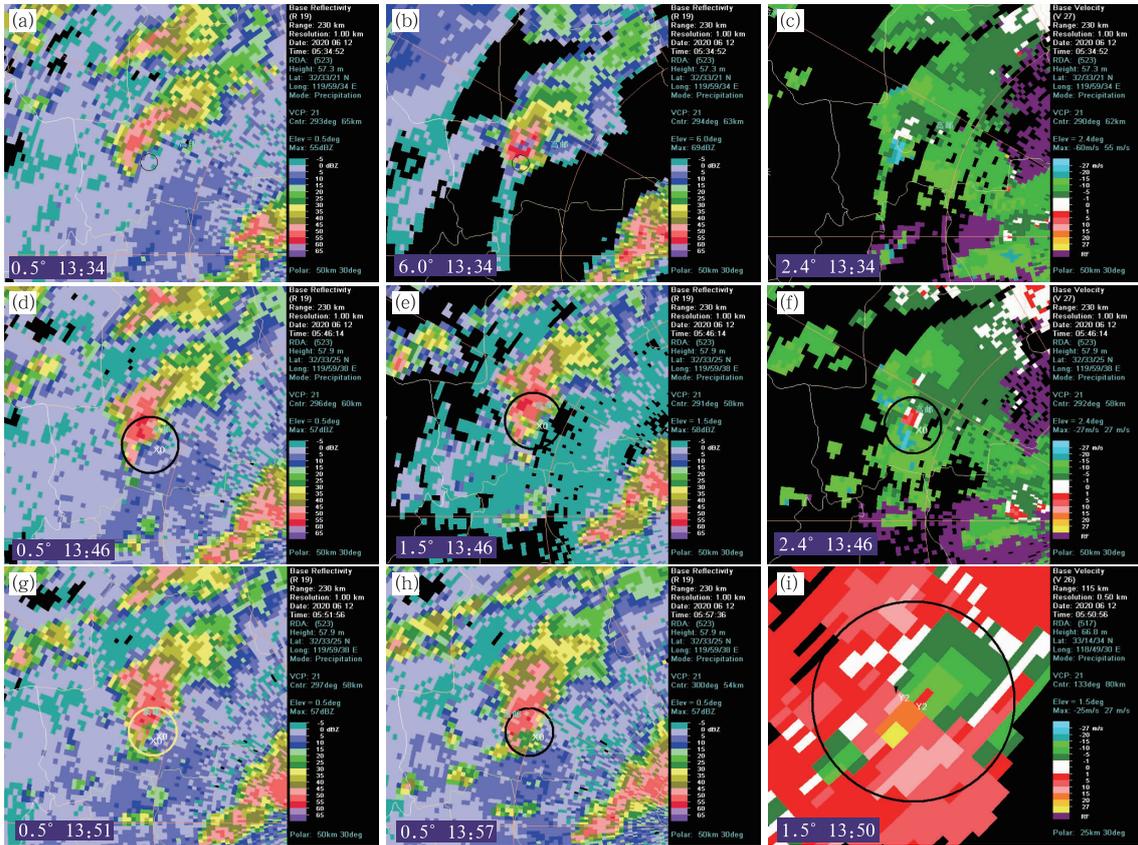


图 6 2020 年 6 月 12 日(a,b,c)13:34,(d,e,f)13:46,(g)13:51,(h)13:57 泰州雷达的 (a,b,d,e,g,h)基本反射率因子和(c,f)径向速度以及(i)13:50 淮安 1.5°仰角径向速度 (a,d,g,h)0.5°仰角,(b)6.0°仰角,(c,f)2.4°仰角,(e)1.5°仰角 (圆圈代表雷达识别出中气旋位置和直径大小)

Fig. 6 (a, b, d, e, g, h) The basic reflectivity factor, (c, f) radial velocity at Taizhou Radar at (a, b, c) 13:34 BT, (d, e, f) 13:36 BT, (g) 13:51 BT, (h) 13:57 BT, (i) radial velocity at 1.5° elevation at 13:50 BT of Huai'an Radar on 12 June 2020 (a, d, g, h) 0.5° elevation, (b) 6.0° elevation, (c, f) 2.4° elevation, (e) 1.5° elevation (The circle represents the position and diameter of mesocyclone identified by radar)

4.2 龙卷风暴内部旋转特征

4.2.1 中气旋特征

我们将 13:38—14:06 泰州雷达连续 8 个体扫基数据各层的径向速度进行解析,得到本次龙卷过程期间中气旋各层的特征量。从中气旋直径(图 8a)来看,13:51 中气旋直径大小从高层到低层逐渐递减,距地 5.5 km 高度处中气旋直径宽达 5.3 km,到 2.5 km 高度中气旋直径紧缩为 4.3 km,呈现出上大下小的倒梯形“漏斗状”垂直结构。从切变值(图 8b)来看,将不同体扫识别到的中气旋切变最大值相连,可以发现 13:38—13:46 中气旋切变最大值基本在 3 km 高度以上,到 13:51 切变最大值迅速下

探至低层 2.5 km 处并陡增到 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,随后低层仍维持较强切变,但最大切变所在高度再度向上伸展。我们由旋转速度和距雷达距离客观计算了不同体扫风暴中气旋的强度等级(Andra, 1997; Lee and White, 1998),将强度等级最大值相连发现也存在相似变化趋势(图 8c):该风暴旋转强度核自 13:38 起逐渐下降,13:51 明显下探至低层 2.5 km 并达过程峰值后,强度核大小明显减小,再度抬升到对流中高层。图 8 清晰地显示了伴随本次高邮龙卷天气的出现,中气旋速度切变迅速增强并下探,直径大小呈现“倒梯形”的垂直分布,类似雷达探测特征可作为临近预警的重要指导(王易等, 2018; 张楠等, 2020; 郑永光等, 2021)。

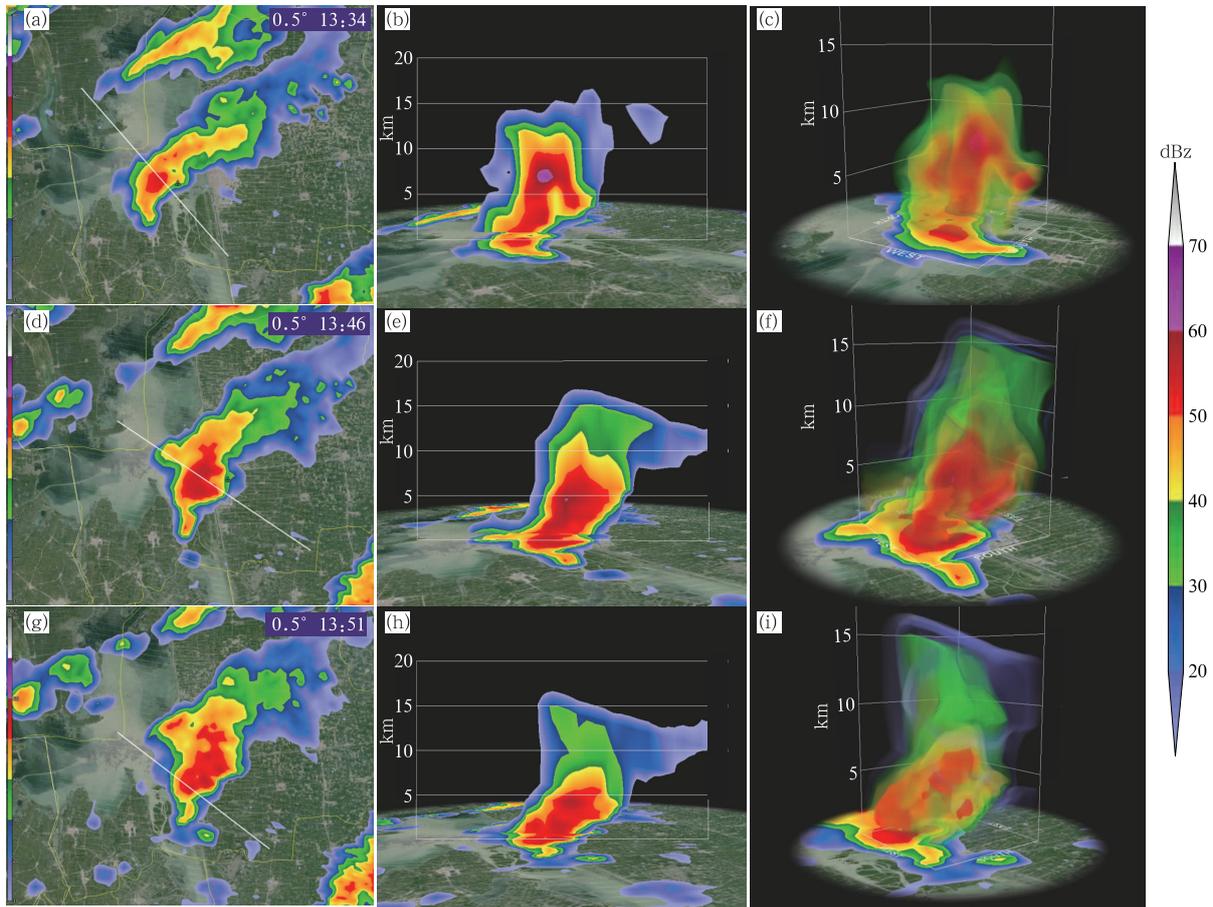


图 7 2020 年 6 月 12 日(a,b,c)13:34,(d,e,f)13:46,(g,h,i)13:51 泰州雷达 0.5°仰角的(a,d,g)基本反射率因子,以及(b,c,e,f,h,i)沿图 7a,7d,7g 的白线自西北向东南的(b,e,h)垂直剖面 and (c,f,i)立体产品

Fig.7 (a, d, g) The basic reflectivity factor, (b, e, h) reflectivity profile and (c, f, i) volumetric mode along the white solid line in Figs. 7a, 7d, 7g from northwest to southeast at 0.5° elevation of Taizhou Radar at (a–c) 13:34 BT, (d–f) 13:46 BT, (g–i) 13:51 BT 12 June 2020

4.2.2 龙卷涡旋特征

此次高邮龙卷过程的另一显著特征是生命史较长,单体风暴的小尺度气旋特征较早地出现,虽然在业务使用中 TVS 在识别龙卷时虚警率较高,但仍然是识别龙卷的有效指标之一。我们对淮安、泰州雷达的 TVS 特征进行了统计,图 9 可以反映两部雷达的 TVS 参数包括三维环流特征的底部高度、顶部高度和厚度,以及三维环流特征中最大切变量和所在高度。从 12:54 起,淮安雷达就已监测识别出龙卷涡旋特征,比龙卷天气的出现提前了近 60 min,此时以及之后 10 个体扫识别出的 TVS 底高始终维持在 1 km 上下,但 13:36 起旋转气流的顶高有明显升高,体现了对流风暴垂直方向的强烈发展。泰州

雷达 13:00 第一次识别出龙卷涡旋特征,计算的风暴垂直厚度在 1.3 km,同样也是在 13:42 单体的底高降低到 0.9 km,顶高发展到 5 km,厚度达到全过程中的最大值 4.1 km。13:54,两部雷达监测到的 TVS 最大切变值达到各自的峰值,分别是 $98 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (泰州)和 $50 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (淮安),所在高度均为 2.6 km,TVS 明显下降的底高和增强的切变是我们预警龙卷的重要判据。

5 监测预警思考

因为尺度小、生消迅疾、机理复杂、多灾种并发等原因,龙卷一直是强对流天气预报预警的难点。

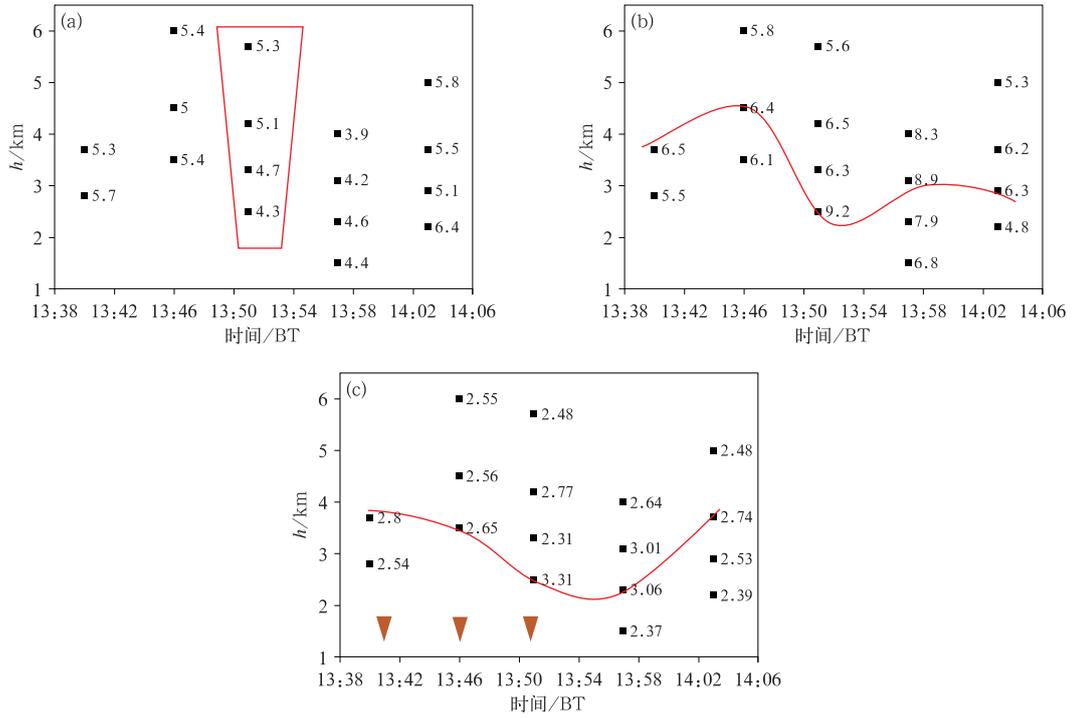


图 8 2020 年 6 月 12 日 13:38—14:06 泰州雷达不同仰角中气旋的特征
(a)直径(单位:km),(b)切变值(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$),(c)强度等级
(红色倒三角为 TVS 出现时刻)

Fig. 8 Characteristics of mesocyclones at different elevations of Taizhou Radar from 13:38 BT to 14:06 BT 12 June 2020

(a) velocity couplet diameter (unit: km), (b) azimuthal shear (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$), (c) vertical distribution of rotational velocity
(The red inverted triangles show the moment when TVS appears)

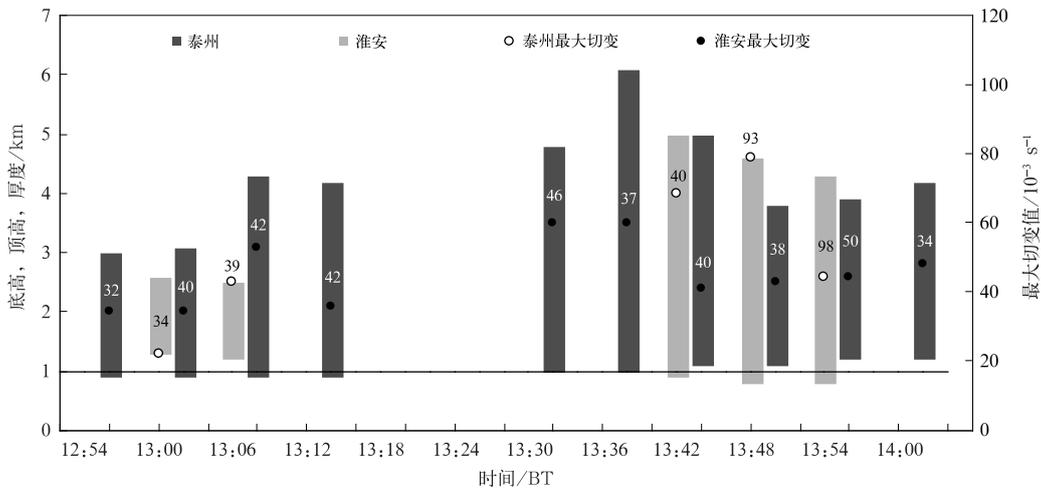


图 9 2020 年 6 月 12 日 12:54—14:03 淮安和泰州雷达龙卷涡旋特征 TVS 的厚度、底高、顶高和最大切变值(数字)和所在高度

Fig. 9 The depth, bottom height, top height and maximum shear (numbers) of tornado vortex signatures of Taizhou Radar and Huai'an Radar from 12:54 BT to 14:03 BT 12 June 2020

江苏省自2017年试点参加全国龙卷监测预警业务试验已开展多次预警实践:建成了江苏省市县一体化监测预警技术规范 and 扁平化工作流程,构建了天气学概念模型和潜势预报思路,研发了基于中气旋特征量的分类强对流识别技术集成于强天气综合报警追踪平台(SWatch平台),并开展了11次灾害调查形成龙卷个例库。

此次6月12日高邮龙卷伴生于2020年超强梅雨期,高邮市气象局成功预报预警为龙卷防御打出“来之不易的46分钟提前量”(叶奕宏和孙啸,2020),不失为一次值得总结探讨的个例,此次过程依据预警流程有序开展,复盘后有几点经验和思考:(1)通过不断对比梅雨锋龙卷天气概念模型的环流配置,对照阜宁EF4级强龙卷的物理量指标开展龙卷潜势预报,重点关注“江苏龙卷走廊”天长—阜宁沿线的苏北平原地区,在会商提示和决策服务材料里提及强对流天气可能,提前做好防御和服务准备;(2)融合卫星、闪电、雷达等多源探测资料对对流初生的识别和监测,应用自动站数据分析地面辐合加强、暖湿舌发展等地面中尺度特征,并充分考虑下垫面影响(风暴经高邮湖到达“龙卷走廊”)等预报风暴演变趋势;(3)结合本地龙卷经验指标(中气旋/TVS底高、顶高、切变阈值等),依据强天气综合报警追踪平台(SWatch)对多部雷达监测识别结果的集中反映,“谁发现,谁发起”江苏省气象台及时指导地市联防。本次过程,12:46首次探测到TVS后,随后SWatch平台连续数个个体扫识别到TVS特征,并判识警报龙卷;13:14,江苏省气象台指导高邮市气象局提前发布暴雨黄色预警,提醒公众注意强降水和与之相伴的雷暴、8~10级大风、龙卷风,并通过短信、微博等渠道第一时间向社会推送。尽管TVS会出现一定虚警,但如果出现在离雷达站合适的距离,并且和反射率因子场上强对流回波系统相联系,和径向速度场上正负速度相对配合,就有理由不失时机地发布临近预警。

结合前文对本次过程中尺度演变特征的分析,我们考虑未来在强对流预警业务系统中增加地面物理量的中尺度分析工具,对局地气温、湿度、气压、散度场实现精密监测分析;同时在SWatch平台进一步集成多种短临预报算法和客观外推产品,借助实时检验对比给予最优预报推荐。期望通过多源资料快速融合、精细化监测和智能判识为短时强降水、冰雹、大风(龙卷)等强对流天气分类分级预警给予进

一步支撑。

6 结论

2020年6月12日高邮EF2级龙卷过程与2016年6月23日阜宁EF4级龙卷过程具有部分相似的梅雨期龙卷背景形势,虽然灾害严重程度不及后者,但因为成功的预警和服务引起了高度关注,同时也是江苏地区的高影响天气而颇具探讨价值。本文综合应用多源高分辨率观测和再分析资料全面阐释了本次过程的灾调实况、气象条件、中尺度系统和对流风暴的演变特征,获得结论如下:

(1)本次龙卷过程发生地位于“江苏龙卷走廊”天长—阜宁沿线的平原地区,背景形势符合梅雨锋龙卷典型特征,产生龙卷的对流系统位于500 hPa华北冷涡底部及东移西风槽前,850 hPa低涡西南象限暖式切变南侧、活跃的低空暖湿急流左前端,高能高湿不断蓄积而大气层结不稳定状态也持续增强。

(2)午后江淮一带的环境条件有利于龙卷的发生,具有较高强度的对流不稳定能量和较低抬升凝结高度,0~1 km、0~6 km风矢量差较大,但相较于苏北龙卷统计值和阜宁EF4级强龙卷过程低层风切变条件偏弱。

(3)此次龙卷风暴的发展与地面辐合线和中尺度低压的移动关系紧密,龙卷出现在移动的1000 hPa β 中尺度低压顶部,并处于地面散度辐合区和地面暖湿舌内。风暴中心地面散度值急剧下降(辐合急剧加强)可能对应于龙卷风暴内部出现涡管接地现象,这些特征信号如有更多个例的验证,未来可成为龙卷临近预警和过程回溯的重要参考。

(4)产生该龙卷的对流系统来自切变线东南侧暖区的一个孤立超级单体,具有经典的钩状回波特征和中等强度的中气旋。其显著特点是风暴生命史长,早在龙卷天气出现前近60 min已识别到连续龙卷涡旋特征(TVS),移经高邮湖面后风暴加强出现中气旋(M)并继续与TVS共存8个体扫。龙卷接地前雷达探测到TVS底高明显下降且切变增强,中气旋速度切变迅速增强下探、中气旋直径呈“倒梯形”垂直分布,这些特征可作为龙卷临近预警的重要指标。

(5)江苏气象部门按照省市县一体化监测预警技术规范 and 扁平化工作流程,应用多源观测资料从

天气尺度系统配置模型、中小尺度环境物理量指标、对流尺度风暴特征演变等方面递进式预警,是一次较成功的业务实践。但对龙卷发生、发展和消亡的机理尚有待深入研究,龙卷预警的流程和指标还需通过更多的龙卷个例和预警实践进一步优化和改进。

参考文献

- 范雯杰,俞小鼎,2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7): 793-805(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析[J]. 气象,45(6):777-790. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 45(6):777-790(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2021. 2019年4月13日广东徐闻强龙卷天气分析[J]. 气象,47(2):216-229. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2021. Analysis of the 13 April 2019 strong tornado in Xuwen County, Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 47(2): 216-229(in Chinese).
- 李峰,李柏,唐晓文,等,2020. 近20年美国龙卷探测研究进展——对我国龙卷风研究的启示[J]. 气象,46(2):245-256. Li F, Li B, Tang X W, et al, 2020. Advances in tornado detection in the United States in recent 20 years—inspiration to the study of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 46(2):245-256(in Chinese).
- 刘娟,朱君莹,魏德斌,等,2009. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象,35(10):32-39. Liu J, Zhu J J, Wei D B, et al, 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang supercell tornado [J]. Meteor Mon, 35(10):32-39(in Chinese).
- 孙继松,杨波,2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学,32(6):1352-1364. Sun J S, Yang B, 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1352-1364(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).
- 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).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象,38(11):1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon, 38(11):1330-1338(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):209-227(in Chinese).
- 徐芬,郑媛媛,孙康远,2021. 江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J]. 气象,47(5):517-528. Xu F, Zheng Y Y, Sun K Y, 2021. Characteristics of spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 47(5):517-528(in Chinese).
- 杨波,孙继松,刘鑫华,2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. 气象学报,77(3):427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):427-441(in Chinese).
- 姚叶青,郝莹,张义军,等,2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象,31(6):1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor, 31(6):1721-1730(in Chinese).
- 姚叶青,俞小鼎,郝莹,等,2007. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析[J]. 热带气象学报,23(5):483-490. Yao Y Q, Yu X D, Hao Y, et al, 2007. The contrastive analysis of synoptic situation and Doppler radar data for two intense tornado cases[J]. J Trop Meteor, 23(5):483-490(in Chinese).
- 叶奕宏,孙啸,2020. 预报预警为江苏高邮龙卷风防御打出提前量——来之不易的46分钟[N]. 中国气象报,2020-6-17(2). Ye Y H, Sun X, 2020. Forecast and early warnings help set advance defense measures for tornado in Gaoyou County, Jiangsu Province in 2020—hard-won 46 minutes [N]. China Meteorological Daily, 2020-6-17(2)(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:297-305. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing, China Meteorological Press: 297-305(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006b. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等,2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,32(3):508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 袁潮,王式功,马湘宜,等,2021. 2019年7月3日开原龙卷形成环境背景及机理探究[J]. 高原气象,40(2):384-393. Yuan C, Wang S G, Ma X Y, et al, 2021. Environmental background and formative

- mechanisms of a tornado occurred in Kaiyuan on 3 July 2019 [J]. *Plateau Meteor*, 40(2):384-393(in Chinese).
- 曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016.梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对风流暴结构特征分析[J]. *气象*, 42(3):280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al, 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. *Meteor Mon*, 42(3):280-293(in Chinese).
- 张楠,杨晓君,林晓萌,等,2020.线状对流中EF3级强龙卷的多尺度机理研究[J]. *气象*, 46(7):873-884. Zhang N, Yang X J, Lin X M, et al, 2020. Multi-scale mechanisms of EF3 tornado in linear convection[J]. *Meteor Mon*, 46(7):873-884(in Chinese).
- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016.2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J]. *气象*, 42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. *Meteor Mon*, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017.海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. *气象*, 43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. *Meteor Mon*, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020.2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. *气象*, 46(5):589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. *Meteor Mon*, 46(5):589-602(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).
- 郑永光,朱文剑,姚聘,等,2016.风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. *气象*, 42(11):1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. *Meteor Mon*, 42(11):1289-1303(in Chinese).
- 郑媛媛,朱红芳,方翔,等,2009.强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. *高原气象*, 28(3):617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. *Plateau Meteor*, 28(3):617-625(in Chinese).
- 周海光,2018.“6·23”江苏阜宁EF4级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. *地球物理学报*, 61(9):3617-3639. Zhou H G, 2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing County, Jiangsu Province [J]. *Chin J Geophys*, 61(9):3617-3639(in Chinese).
- 周后福,刁秀广,夏文梅,等,2014.江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J]. *气象学报*, 72(2):306-317. Zhou H F, Diao X G, Xia W M, et al, 2014. Analysis of the tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe Region [J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2):306-317(in Chinese).
- Andra D L Jr, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram [C] // Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology. Austin: Amer Meteor Soc:364-365.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. *Atmos Res*, 67/68:73-94.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. *Mon Wea Rev*, 106(1):29-38.
- Craven J P, Brooks H E, Hart J A, 2002. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection [C] // Preprints, 21th Conf. on Severe Local Storms. San Antonio: Amer Meteor Soc:642-650.
- Donaldson R J Jr, 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 9(4):661-670.
- Duda J D, Gallus W A, 2010. Spring and summer midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies [J]. *Wea Forecasting*, 25(1):190-206.
- Evans J S, Doswell C A, 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings [C] // Preprints, 21th Conf. on Severe Local Storms. San Antonio: AMS:635-638.
- Fujita T T, 1963. Analytical mesometeorology: a review [J]. *Meteor Monogr*, 5(27):77-125.
- Gallus W A, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the midwest as a function of convective mode: a preliminary study [J]. *Wea Forecasting*, 23(1):101-113.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States [J]. *Wea Forecasting*, 27(1):106-123.
- Lee R R, White A, 1998. Accepted for publication in weather and forecasting 1998; improvement of the WSR-88D mesocyclone algorithm [Z].
- Markowski P M, Richardson Y, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes* [M]. Chichester: Wiley-Blackwell Publication.
- McCaul E W Jr, 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments [J]. *Mon Wea Rev*, 119(8):1954-1978.
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, 2014. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings [Z].
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle [J]. *Wea Forecasting*, 18(6):1243-1261.
- Trapp R J, Tessendorf S A, Godfrey E S, et al, 2005. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: climatological distribution [J]. *Wea Forecasting*, 20(1):23-34.