

江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析¹

慕瑞琪^{1,4} 徐芬^{2,3,4} 孙康远^{2,3,4} 李峰⁵ 王易¹

1 江苏省气象台, 南京 210044

2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

3 南京气象科技创新研究院, 南京 210009

4 中国气象局交通气象重点开发实验室, 南京 210009

5 中国气象局气象探测中心 北京 100081

摘要: 利用常规观测、自动站、多普勒天气雷达以及美国环境预报中心的全球再分析资料, 分析江苏2007-2018年间的台风龙卷活动时空分布特征、龙卷产生的环境条件及多普勒雷达关键特征, 并与广东台风龙卷相应特征进行对比。结果表明: 江苏台风龙卷与过去相比发生频次有所增加, 主要集中在7-8月, 且主要发生于午后16-20时; 比起广东台风龙卷多发生于台风登陆后的24 h以内, 江苏台风龙卷多发生于登陆24 h之后, 位于台风中心的东北象限, 多集中于江淮中部以及西北部地区; 高空急流输送充足的水汽和不稳定能量, 为龙卷的发生提供了有利的环境条件, 地面辐合线是龙卷发生发展的重要系统; 江苏和广东龙卷均发生在对流不稳定能量不大、抬升凝结高度较低、深层(0~6 km)和低层(0~1 km)垂直风切变较大以及风暴相对螺旋度(SRH)较大的环境下, 但从均值来看, 广东龙卷的对流有效位能和对流抑制能更小, 抬升凝结高度更低, 具有更大的深层(0~6 km)和低层(0~1 km)垂直风切变, 且风暴相对螺旋度较小; 江苏台风龙卷单体约有2/3伴随龙卷涡旋特征(TVS)特征, 产生强龙卷的雷暴单体生命期同时伴随有中气旋和TVS特征。当TVS的最低仰角速度差超过 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 更易产生强龙卷。与广东台风龙卷TVS关键特征量对比显示, 江苏地区产生龙卷的TVS最低仰角速度差和最大切变值均偏小(最大切变值为广东的1/3)。

关键词: 台风龙卷, 环境条件, 雷达特征

Analysis of Environmental Conditions and Radar Key features of Typhoon-Tornado in Jiangsu

MU Ruiqi^{1,4} XU Fen^{2,3,4} SUN Kangyuan^{2,3,4} LI Feng⁵ WANG Ying¹

1 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210044

2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009

4 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

5 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081

¹ 资助课题: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1506103)、江苏省社会发展项目(BE2017776)、江苏省气象局面上项目(KM202007)、中国气象科学研究所基本科研业务费专项资金项目(2021Z003)共同资助。

第一作者: 慕瑞琪, 主要从事灾害性天气预报分析和短临天气预警. Email: 103109693@qq.com

通讯作者: 徐芬, 主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. Email: xufen1130@tom.com

Abstract: By conventional observation , automatic station, Doppler radar and reanalysis data ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) from FNL, this paper analyzed the spatial and temporal distribution Characteristic, environmental conditions and radar key features of the typhoon-tornadoes in Jiangsu during the 2007-2018, and compare with the corresponding characteristics of typhoon-tornadoes in Guangdong. The analyses indicate that the frequency of typhoon-tornado in Jiangsu has increased compared with the past, occurrence time of the tornadoes is concentrated in July and August from 16:00 BT to 20:00 BT. Jiangsu typhoon-tornadoes occur after typhoon landfall 24 hours later, different from Guangdong typhoon-tornadoes occur within 24 hours. A strong preference for tornado occurrence is in the northeast quadrant with respect to land-falling typhoon center. High risk areas of tornado occurrence in Jiangsu concentrated in the central of Jiangsu and Xuzhou. The low-level jet transports abundant water vapor and unstable energy, which provides favorable environment for tornado, ground convergence line is an important system for tornado development. The common environmental conditions for Jiangsu and Guangdong tornado appear to be low lifting condensation level (LCL) , strong deep-layer and low-level vertical wind shear (VWS) and high storm relative helicity(SRH). The major difference between Jiangsu and Guangdong tornado cases is that the Guangdong tornado has weaker convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) , lower LCL, but stronger deep-layer and low-level VWS. About 2/3 of typhoon tornadoes in Jiangsu accompanies with tornadic vortex signature (TVS), The thunderstorm cells that produce strong tornado is associated with mesocyclone and TVS. Strong tornado is more likely to occur when the lowest level difference velocity (LLDV) of TVS exceeds $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The LLDV of tornado TVS in Jiangsu is weaker, and the maximum shear is smaller (1/3 of that in Guangdong).

Key words: Typhoon-Tornado, Environmental conditions, Radar features

引言

龙卷作为一种最强烈的灾害性天气,破坏性极强,由于尺度小、生消快,常规的观测资料往往很难监测到,预报预警难度大,可造成严重的人员伤亡和财产损失。美国在龙卷探测和研究方面取得了大量成果, Brown et al (1978) 通过观测资料发现伴随在龙卷过程中的比中气旋尺度更小的速度场涡旋特征,称之为龙卷涡旋特征(Tornadic Vortex Signature, TVS),当中气旋和TVS同时被探测到时,龙卷的发生概率明显提高(Doswell III, 2001)。Brooks et al (2003) 研究了有利于龙卷发生的环境条件,找出了影响龙卷产生的关键因子包括对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)、深层及低层垂直风切变

(Vertical Wind Shear, VWS)、抬升凝结高度 (Lifting Condensation Level, LCL)、风暴相对螺旋度 (Storm Relative Helicity, SRH) 等。热带气旋通常会生成龙卷 (简称台风龙卷) (白兰强等, 2020), 据统计, 在1948-1986年间登陆美国的台风中, 约59%至少有一个龙卷生成 (McCaul, 1991), Schultz and Cecil (2009) 指出, 84%的飓风龙卷发生在台风登陆前12 h至登陆后48 h内, 峰值是登陆后0~12 h。

我国也时常受到龙卷的侵害。范雯杰和俞小鼎 (2015) 研究中国龙卷的时空分布表明, 龙卷多出现在丘陵山区及沿海、沿湖地区, 主要发生在春、夏两季。冯佳玮等 (2017) 研究了中国三个龙卷频发区 (珠三角、江苏、东北地区) 的环流背景和环境物理量特征, 并比较他们之间的区域差异。徐芬等 (2021) 统计分析江苏龙卷的时空分布、等级分布、天气背景特征及风暴形态特征。黄先香等 (2019a; 2019b) 分析了珠三角台风龙卷的活动特征、龙卷产生的环境场特征, 并对台风艾云尼引发的龙卷进行了深入分析。李峰等 (2020) 通过对美国近20年龙卷探测雷达技术和观测研究的文献调研, 提出我国应参照其成功经验, 汲取其技术成果, 为构建龙卷监测预警业务提供科学支撑。郑媛媛等 (2015) 和刁秀广等 (2019) 分析台风产生龙卷的环境物理量特征, 得出低层高湿、强的低层垂直风切变和大的相对风暴螺旋度是关键物理量。沈树勤 (1990) 对台风龙卷的研究指出, 龙卷产生于台风的右前象限, 距离台风中心300~400 km。多普勒雷达是探测和预警龙卷的最有力工具, 何彩芬等 (2006)、蒋义芳等 (2009) 对发生在台风前部龙卷过程的多普勒雷达回波特征进行了个例分析, 王秀明和俞小鼎 (2019) 利用多源资料对热带一次致命龙卷的环境特征和龙卷形成的物理过程进行了深入探讨。朱君鉴等 (2019) 对登陆台风摩羯在山东引发的龙卷进行了灾情调查与天气雷达的识别。此外, 一些学者们还对龙卷影响过程进行了数值模拟 (李佳等, 2017; 王霖吟等, 2019; 陈锋等, 2019)。

江苏省是中国龙卷 (范雯杰和俞小鼎, 2015; Chen et al, 2018) 天气最频发的省份。过去42年来, 造成中国伤亡人数最多的龙卷亦发生在江苏省 (Meng et al, 2018)。统计表明, 江苏省约20%的龙卷过程与台风有关 (郑媛媛等, 2015)。在1962-1984年和2005-2014年间, 分别有18次和5次台风龙卷记录 (沈树勤, 1990; 郑媛媛等, 2015)。江苏省国民经济发达, 人口密度大, 交通纵横, 城市化水平高, 龙卷发生所造成的灾害损失和人员伤亡较大, 因此, 加强龙卷的分析对防灾减灾意义重大。目前对江苏龙卷的研究仍以个例分析为主, 尤其近年间对于台风龙卷的活动特征及环境条件研究较少。本文利用多源观测资料对江苏2007-2018年间发生的台风龙卷时空分布特征、环境条件及雷达关键特征进行了分析, 并与广东台风龙卷进行对比, 以期对台风龙卷的短临预报和监测预警提供参考。

1 资料与方法

本文龙卷资料主要来源于江苏省气候中心龙卷档案、江苏各市气象灾害档案、与江苏龙卷相关的已发表的研究论文、《中国气象灾害年鉴》以及新闻媒体的视频报道等。近年来公众及网络媒体对灾害性天气的关注增高, 越来越多发生在白天的龙卷被拍摄记录下来, 确保

了龙卷数据集的真实和完整。在龙卷实况灾情的收集过程中，主要依靠灾情调查和新闻媒体的视频报道，无人机连续大范围的航拍，加上多普勒雷达、自动站等资料综合判断，确保了龙卷样本的客观真实。

对龙卷的记录采用了白兰强等（2020）的方法。表1给出了江苏2007–2018年11年间台风龙卷概况以及灾情统计特征，共有7次台风龙卷过程，产生了12个龙卷。该龙卷个数发生比例与广东台风龙卷相似（黄先香等，2019a）。

表1 2007–2018年江苏台风龙卷过程及灾情概述

Table1 Statistics of disaster situations of typhoon tornadoes in Jiangsu during 2007–2018

| 台风 | 日期 (年/月/日) | 时间/BT | 地点 | 龙卷等级 | 灾情概述 |
|-----|---------------|-----------|-----------------------|------|--|
| 罗莎 | 2007/10/07 | 15: 30 左右 | 苏州高新区 | EF0 | 2人受伤，20间房屋受损 |
| 凤凰 | 2008/07/29 | 20: 00 | 东台市溱东镇 | EF1 | 农作物受灾350公顷，毁屋190间。损失255万元 |
| 凤凰 | 2008/07/30 | 5: 10 | 邳州市邹庄镇、港上镇、铁富镇、炮车镇、四户 | EF2 | 死亡，41人受伤，毁屋18间 |
| | | 15: 15 | 高邮市临泽镇 | EF1 | 8人受伤 |
| | | 16: 00 左右 | 宝应县广洋湖镇 | EF2 | 2人受伤，毁屋1172间，损折树木、损坏太阳能、空调、蔬菜大棚、农户猪舍等 |
| 海葵 | 2012/08/09 | 17: 15 | 姜堰市蒋垛镇的界河、兴发、蒋垛等8个村 | EF1 | 7人受伤，毁屋354间，死亡牲畜466头，受灾农作物158亩，折损树木335棵。损失200多万元 |
| 海葵 | 2012/08/10 | 11: 00 左右 | 滨海县阜丰镇的陆集、南、新巨、双龙 | EF1 | 无人员伤亡 |
| 麦德姆 | 2014/07/24 | 9: 28 | 南京六合区 | EF0 | 上百间房屋受损 |
| 海棠 | 2017/08/01 | 17: 40 | 淮安市三堡乡、林集镇 | EF1 | 10人受伤，毁屋130间，折损树木数百棵，50余根农电杆线倒塌数，农作物受灾数百亩 |
| 摩羯 | 2018/08/13 | 22: 30 | 邳州市土山镇薛集和刘井村 | EF0 | 无人员伤亡 |
| 温比亚 | 2018/08/18 | 18: 45 | 徐州刘集镇张集矿 | EF2 | 造成村民房屋倒塌，树木折断，大卡车被吹翻 |
| | | 19: 46 | 徐州丰县孙楼镇 | EF2 | |

2 台风龙卷的时空分布特征

由表1可见，2007–2018年间江苏共有7个台风产生了12个龙卷过程，均为台风登陆减弱后形成的龙卷，年均0.58个台风产生龙卷，略高于21世纪前年均0.5个的发生概率(沈树勤, 1990)，但远低于同年梅汛期龙卷年均1次的发生概率。影响江苏地区的台风生成龙卷个数比例有所上升，从过去的1.63上升至1.71。2007–2018年间0808号“凤凰”产生4

个龙卷、1211号“海葵”和1818号“温比亚”分别产生2个龙卷，为多发龙卷台风；0715号“罗莎”、1410号“麦德姆”、1710号“海棠”、1814号“摩羯”分别产生1个龙卷，为少发龙卷台风。7个影响江苏的台风中有2个产生了EF2及以上的强龙卷，其余均为EF0~EF1级的弱龙卷，总体来看台风龙卷的致灾强度低于同年梅汛期龙卷。

2.1 台风龙卷的时间分布特征

图1给出了2007-2018年江苏台风龙卷的时间分布特征。江苏台风龙卷主要集中在7、8月，8月最为多发，占总数的50%，10月偶有发生，其余月份均无龙卷出现，7、8月副热带高压北推至长江流域，也是江苏地区受台风影响最多的月份。从台风龙卷发生的日变化分布来看，台风龙卷呈现出明显的日变化特征，午后（16-20时）发生频率最高，占总数的83%，这也是由于午后大气层结不稳定性增大，垂直运动强，有利于龙卷天气的形成和维持。与广东台风龙卷时间分布特征对比来看，由于6-10月为珠三角热带气旋活跃期，其相应产生的龙卷也发生于该时间段，长于江苏地区，但仍以8月最为多发，两个地区日变化特征略有不同，广东台风龙卷白天（06-20时）均会发生，而江苏台风龙卷主要集中在午后。

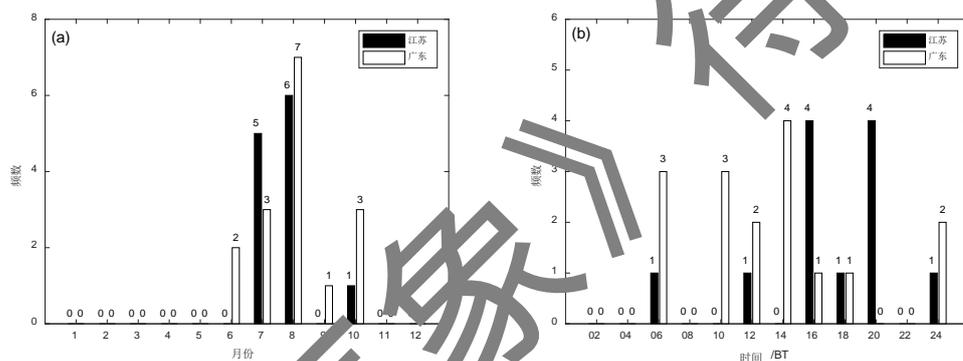


图1 2007-2018年江苏和广东台风龙卷的(a)月分布特征和(b)日变化分布对比

Fig.1 Monthly (a) and diurnal (b) distributions of typhoon tornadoes in Jiangsu during 2007-2018 and in Guangdong

2.2 台风龙卷的空间分布特征

图2给出了江苏台风龙卷的空间分布情况。从图中可以看出，2007-2018年江苏省台风龙卷多发区域主要集中在江淮中部以及西北部的徐州地区，呈西北—东南向带状分布。其中发生在徐州的台风龙卷最多，达4个。2000年以前，江苏东南部始终是龙卷发生的频繁区，与过去相比，台风龙卷多发地带呈现北抬和向内陆移动的趋势。龙卷多发的徐州地区北临微山湖，江淮之间的淮安、扬州、泰州地区紧邻洪泽湖和高邮湖，由此可见江河湖海等大型水体可能促进龙卷的生成。

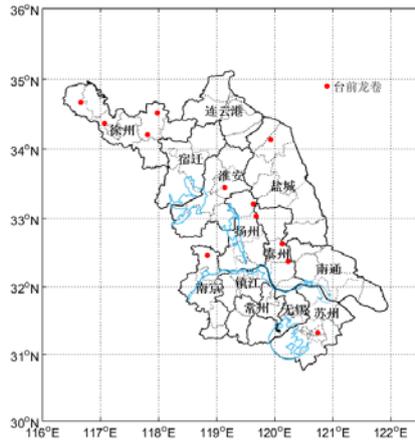


图 2 2007-2018 年江苏台风龙卷地域分布特征

Fig.2 Geographical distribution of typhoon tornado in Jiangsu during 2007-2018

3 江苏引发龙卷的台风路径

和广东台风龙卷多由西行的台风引发不同的是，江苏引发龙卷的台风路径以西北行为主（图 3），台风生成后从菲律宾以东向西北方向移动，在福建—浙江—上海一带登陆，除“罗莎”外，其他台风均在登陆后继续向西北偏北方向移动。当台风中心位于福建北部—江西北部—安徽南部一带时，江淮地区易出现龙卷，而当台风中心位于安徽中北部—河南东部驻马店一带时，江苏西北部地区易出现龙卷。

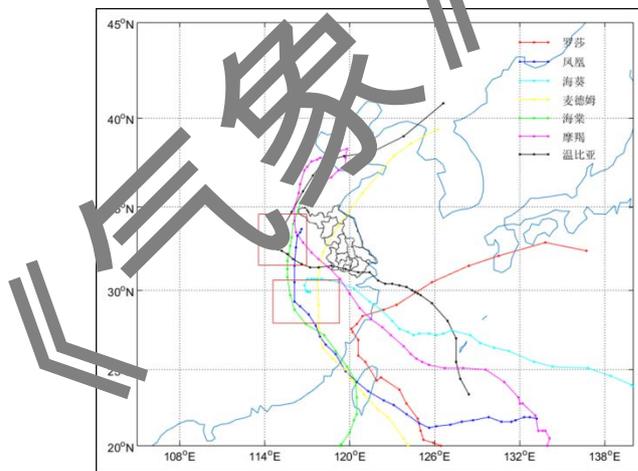


图3 2007-2018年引发江苏龙卷的台风路径

（图中红框表示出现龙卷时台风中心位置）

Fig.3 The contrastive tracks of tornadic typhoons during 2007-2018

（red frame represent positions of the typhoon center at the time of tornado genesis in Fig.3 ）

沈树勤（1990）的研究显示，江苏台风龙卷一般出现在台风开始登陆迅速减弱阶段。江苏台风龙卷均发生于台风登陆之后，约有75%的龙卷发生在台风登陆24 h之后，峰值出现在台风登陆后的36~48 h内，占总数的41%（5个）。而广东台风龙卷的高发时段主要在台风登陆后24 h内（黄先香等，2019a）。从龙卷发生时的台风强度变化情况看（表2），大多数台风

在生成龙卷时的强度为热带低压（38 %）和热带风暴（30 %），另有约15 %和7 %的龙卷分别产生于强度为台风和台风停编时，没有发现在强热带风暴和强台风环境下生成的龙卷案例，而广东台风龙卷发生时，台风强度在热带低压到强台风量级之间，其中维持在热带风暴以上量级的约占73 %（黄先香等，2019a）。影响广东地区产生龙卷的台风多在广东及其以南地区登陆，故龙卷发生时台风强度减弱较慢，强于江苏龙卷发生时的台风强度，台风登陆后龙卷的发生时间也早于江苏地区。

表2. 2007-2018年江苏龙卷发生时的台风强度

Table 2 Typhoon intensity at the occurrence time of tornado during 2007-2018 in Jiangsu

| 台风强度 | 龙卷个数/个 | 概率/% |
|-------|--------|------|
| 热带低压 | 5 | 38 |
| 热带风暴 | 4 | 30 |
| 强热带风暴 | 0 | 0 |
| 台风 | 2 | 15 |
| 强台风 | 0 | 0 |
| 其他 | 1 | 7 |

从龙卷与台风中心的相对位置来看（图4），除一个龙卷发生在台风中心的正东方向外，江苏台风龙卷主要分布在相对于台风中心的东北象限，这与白兰强等（2020）研究指出的中国台风龙卷主要分布在相对于台风中心的东北象限的结论一致。而龙卷发生地的位置主要集中在距离台风中心 250~500 km 范围内，平均值为 336 km。

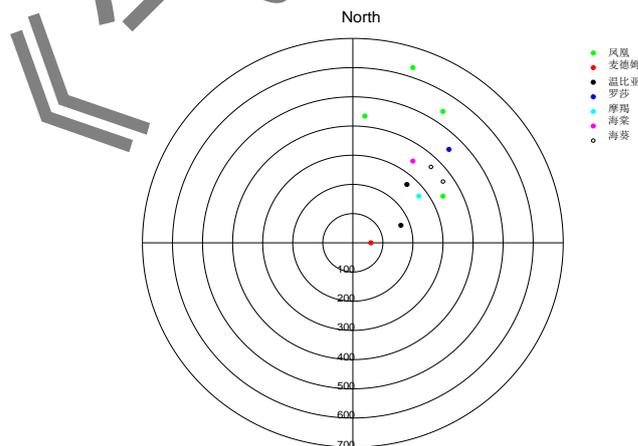


图 4 2007-2018 年江苏龙卷发生地与台风中心的位置关系（单位：km）

Fig.4 The relationship between the typhoon center and the tornado location in Jiangsu during 2007-2018 (unit:km)

4 台风龙卷发生的环境条件分析

4.1 台风龙卷大尺度环流背景

龙卷作为一种小尺度强对流天气系统,通常发生在一定的大尺度环流背景之下。参照“邻(临)近原则”(章国材,2011),利用龙卷发生前最近时次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球再分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL)对龙卷的环流形势进行合成,分别合成了9次台风龙卷过程的500、850和925 hPa的高度场(图5)。由图5可见,龙卷发生时,500 hPa台风中心平均位置在安徽池州的南部,副热带高压东退于海上,江苏处于台风东侧以及副热带高压西侧之间的强盛偏南到东南气流当中,中低层存在东南风急流,850 hPa和925 hPa的急流强度达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。

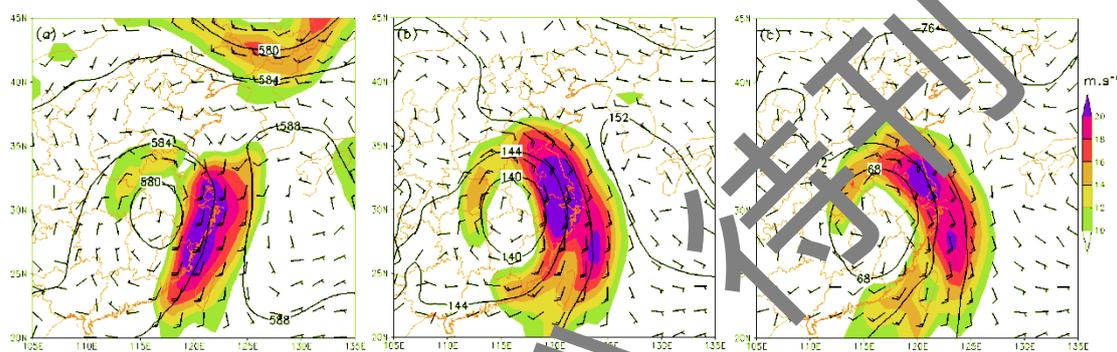


图5 江苏9次台风龙卷过程环流形势合成图

(a) 500 hPa; (b) 850 hPa; (c) 925 hPa;

Fig.5 Composite synoptic situations of 9 times typhoon tornadoes in Jiangsu

(a) 500 hPa; (b) 850 hPa; (c) 925 hPa

广东台风龙卷发生前合成的环境场(黄先香等,2019a)显示(图略),无论是强龙卷还是弱龙卷,龙卷发生前的环境场与江苏类似,珠三角地区也处于台风东侧以及副热带高压西侧之间的东南气流当中,中低层在珠江口附近存在东南偏南急流,850 hPa和925 hPa的东南急流均在 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,强龙卷过程甚至达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,各层东南急流轴的位置非常接近。

以上分析表明,强盛的低空急流输送充足的水汽和不稳定能量,促使层结不稳定性增强,为龙卷的发生提供了有利的环境条件。

4.2 台风龙卷对应的环境参数

龙卷的发生需要合适的动力、热力和水汽条件。为了更好地认识有利于台风龙卷发生的大气环境条件,分别利用龙卷发生前最靠近时次FNL资料和距离最近的探空站资料计算了江苏9次台风龙卷过程环境的CAPE、对流抑制能(Convective Inhibition, CIN)、SRH、LCL、0~1 km垂直风切变、0~6 km垂直风切变。对FNL再分析资料与探空资料接近时刻进行定性对比,两者物理量变化趋势相似,合成结果具有参考性。

图6是9次台风龙卷过程靠近龙卷发生时刻前的物理量平均场，从对流层低层850 hPa的涡度场（图6a）可见，江苏的西南侧安徽至江西、福建地区有显著的气旋性涡度发展，正涡度中心值为 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，且此区域也是假相当位温（ θ_{se} ）的大值区（图6b）， θ_{se} 中心值超过354 K，江苏龙卷发生于正涡度中心东北侧以及 θ_{se} 锋区东北暖湿空气一侧，这与第3节的统计分析结果一致。从850 hPa风场与水汽通量散度的叠加图（图6c）上，江苏龙卷发生在沿南到东南气流形成的水汽通量辐合中心附近，对流层低层有暖湿气流输送并在龙卷发生地集中，使得低层大气非常潮湿。

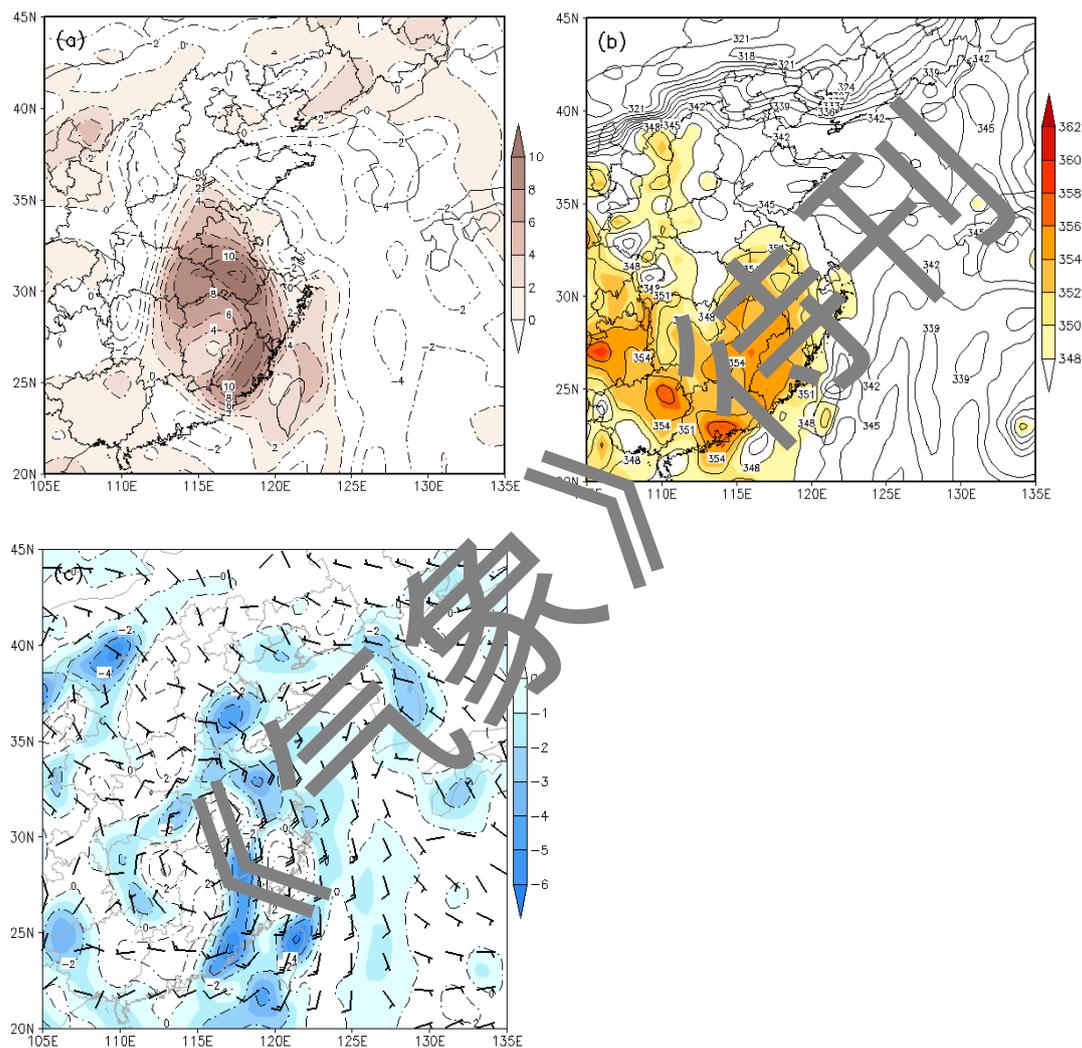


图6 江苏9次台风龙卷过程的850hPa涡度（单位： 10^{-5} s^{-1} ）、假相当位温 θ_{se} （单位：K）及水汽通量散度（单位： $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）与风场的合成

(a) 涡度场, (b) 假相当位温场, (c) 水汽通量散度与风场

Fig.6 9 times typhoon tornados composite analysis on 850 hpa (a) vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}), (b) θ_{se} (unit: K) and (c) divergence of moisture flux (unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) with wind field

从江苏（表3）和广东（黄先香等，2019a）探空计算的环境参数对比可以看出，两个区域龙卷过程的环境条件共同特征为：CAPE值不太大，CIN较小，LCL较低，深层（0~6 km）和

低层(0~1 km)垂直风切变较大,SRH值较高。江苏台风龙卷的CAPE值平均为1255.5 J·kg⁻¹,而广东台风龙卷的CAPE值更低,平均仅为314.4 J·kg⁻¹。台风龙卷与西风带超级单体龙卷不同,在其龙卷发生前的CAPE值不大,主要是由于台风龙卷产生前多已经产生降水,不稳定能量已部分得到释放。较低的LCL有利于水汽迅速凝结,导致深厚湿对流的触发,研究表明(俞小鼎等,2006;郑媛媛等,2015),LCL大于1200 m会大大降低龙卷产生的概率。江苏除“麦德姆”龙卷LCL为1700 m,其他均在400 m以下。强的垂直风切变会增加对流风暴内部气流的强度,使对流风暴更易组织化,且十分有利于产生龙卷形成与发展所需的涡度增长。江苏龙卷过程中,0~6 km为0.8~2.9×10⁻³ s⁻¹,0~1 km有5次过程达到10×10⁻³ s⁻¹以上。SHR高值中心与龙卷频发位置基本一致(冯佳玮等,2017),江苏台风龙卷发生前SHR普遍较大,有5次在200 m²·s⁻²以上,1818“温比亚”甚至达到了960 m²·s⁻²,但也有3次台风龙卷的SRH在100 m²·s⁻²以下。

从均值来看,广东龙卷的CAPE和CIN更小,LCL更低,具有更大的深度(0~6 km)和低层(0~1 km)垂直风切变,且SRH较小。产生这些差异的可能原因为广东地区潮湿条件更好,更低的LCL易于水汽快速凝结,降水显著,不稳定能量进一步释放,且广东龙卷产生时台风强度更强,使得垂直风切变更强。

表 3 2007-2018 年江苏台风龙卷的环境参数

Table3 Environmental parameters of typical tornadoes in Jiangsu during 2007-2018

| 台风编号及名称 | 时间/BT (年/月/日/时) | 地点 | CAPE/ J·kg ⁻¹ | CIN/ J·kg ⁻¹ | LCL/ m | VWS0-6km/ 10 ⁻³ s ⁻¹ | VWS0-1km/ 10 ⁻³ s ⁻¹ | SRH/ m ² ·s ⁻² |
|---------------|--------------------|----|-----------------------------|----------------------------|-----------|---|---|---|
| 0715 “罗莎” | 2007/10/7/08 | 宝山 | 487.1 | 23.8 | 264 | 0.8 | 6.2 | 265 |
| 0808 “凤凰” | 2008/7/29/20 | 盐城 | 2016.8 | 6.3 | 254 | 2.3 | 13 | 370 |
| 0808 “凤凰” | 2008/7/30/08 | 南京 | 712.1 | 2.8 | 250 | 1.8 | 21 | 502 |
| 1211 “海葵” | 2012/9/3/08 | 南京 | 1118.2 | 0 | 195 | 2.3 | 14.6 | 196 |
| 1211 “海葵” | 2012/8/10/08 | 盐城 | 1421.1 | 5.5 | 259 | 1 | 4.3 | 243 |
| 1410 “麦德姆” | 2017/7/23/20 | 南京 | 2183.1 | 181 | 1700 | 0.3 | 2.8 | 63 |
| 1710 “海棠” | 2017/8/1/08 | 徐州 | 1354.3 | 3.9 | 374 | 2.3 | 7.3 | 84 |
| 1814 “摩羯” | 2018/8/13/20 | 徐州 | 1745.6 | 0 | 161 | 1.6 | 11.4 | 99 |
| 1818 “温比亚” | 2018/8/18/08 | 徐州 | 260.6 | 9.7 | 398 | 2.9 | 11.6 | 960 |
| 江苏台风龙卷各环境参数均值 | | | 1255.5 | 25.9 | 428.3 | 1.7 | 10.2 | 309.1 |
| 广东台风龙卷各环境参数均值 | | | 314.4 | 17.1 | 306.6 | 3.9 | 15.3 | 221.1 |

4.3 台风龙卷的环境地面中尺度特征

在有利的大尺度环境背景下,龙卷的产生通常与地面中小尺度辐合关系密切。分析了12次龙卷发生前地面自动站风场,图7为多发龙卷(1818号“温比亚”)和单个龙卷(1710号“海棠”)发生前最接近时刻的地面风场,发现在龙卷发生前地面图上存在清晰的辐合线,龙卷发生在地面辐合线以北、台风低压中心的东北侧。且整个江苏地区均处于暖区当中,没有明显的温度梯度,龙卷一般发生于远离冷暖边界的暖区当中,这是由于在冷区下部的冷空

气较冷较厚，龙卷无法生成，这与郑媛媛等（2015）对江苏4个台风龙卷的统计结果一致。

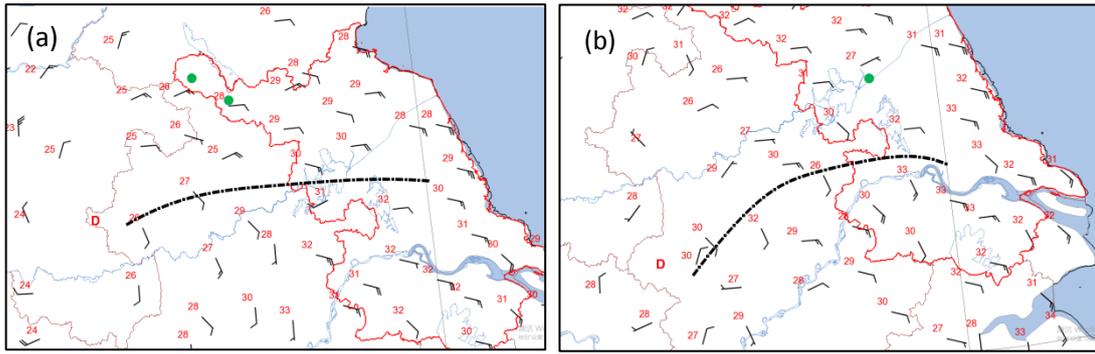


图7 2018年8月18日17时(a)和2017年8月1日17时(b)地面填图
(绿色圆点为龙卷发生地)

Fig.7 Surface weather map of (a) 17: 00 BT 18 August 2018; (b) 17: 00 BT 1 August 2017
(Occurrence area are marked by green dot)

从黄先香等（2019a）对珠三角地区台风龙卷过程的地面中尺度特征分析也可以看出，在龙卷发生前，龙卷风暴移动方向上均存在地面辐合线和小尺度涡旋，小尺度涡旋沿着地面辐合线方向移动，强烈发展产生龙卷，龙卷的移动路径与小尺度涡旋的移动路径一致。

以上分析表明，在特定的环境背景下，地面辐合线和中小尺度涡旋是龙卷发生发展的重要系统，对地面风场的分析有助于龙卷的预报预警。

5 江苏台风龙卷雷达关键特征分析

郑媛媛等（2015）通过对产生于江苏、广东、浙江等地几次强台风龙卷的雷达关键特征进行初步统计认为台风影响导致的龙卷根据中气旋或TVS的出现进行预警具有一定的提前时间，比西风带系统影响造成龙卷的尺度更小，伸展高度更低。详细统计分析台风龙卷雷暴单体关键特征有助于预报员识别具有产生龙卷可能性的单体。

5.1 雷达关键特征处理

为统一统计的标准，本节所涉及的龙卷雷达数据集均为龙卷日龙卷事件发生前3 h至结束后3 h时间段、并能有效覆盖龙卷发生地点的雷达站的雷达基数据。经过径向速度退模糊算法后的基数据分别采用Stumpf et al(1998)的中气旋识别方法和Mitchell et al(1998)的TVS识别方法进行雷达关键特征提取处理，两种方法被广泛应用于美国气象部门和中国气象部门，统计结果有助于业务应用。由于TVS特征结构尺度较小，受径向速度数据质量影响仍会出现误判结果，本文为确保TVS关键特征统计的准确性，基于TVS算法识别结果，结合人工核对相应径向速度图像的涡旋特征，剔除因速度数据质量问题导致的错误TVS识别结果。

通常龙卷发生后持续时间较短，且由于观测和认定手段有限，绝大部分结束时间无法准确确认，因此本节把演变过程中任一时次或多时次与龙卷事件有关的中气旋（或TVS）称为龙卷中气旋（或龙卷TVS）。其他中气旋（或TVS）被认为非龙卷中气旋（或TVS）。龙卷中气旋（或TVS）显著特征采用龙卷发生时刻的中气旋（或TVS）结构特征进入统计。

5.2 江苏台风龙卷关键特征统计分析

2007-2018 年间江苏在 7 个台风影响下产生的 12 个龙卷过程, 其中 33.3 % 的台风龙卷单体无中气旋和 TVS 伴随, 67.7 % 的台风龙卷单体伴随 TVS 特征, 只有 16.7 % 的台风龙卷单体同时伴随有中气旋和 TVS 特征。同时伴随有中气旋和 TVS 特征的台风龙卷单体所产生的龙卷级别均为 EF2 级强龙卷。而其他无中气旋、无 TVS 特征伴随或仅有 TVS 伴随的台风龙卷单体所产生的龙卷均为 EF0~EF1 级的弱龙卷。由于江苏台风龙卷中气旋出现次数极低, 下文只统计分析江苏台风龙卷的 TVS 特征值。为分析台风龙卷单体本身结构特征, 还统计了 TVS 提前于龙卷出现的时间, TVS 的持续时间、平均底高和顶高、厚度、平均最大切变、龙卷时刻的最大切变值、最大切变值所在高度和最低仰角速度差 (Lowest Level Difference Velocity, LLDV), 以及表征龙卷单体强度的最大回波强度值及所在高度(表 4)。

表 4 2007-2018 年江苏台风龙卷 TVS 特征统计表

| Table4 TVS Statistical characteristic of typhoon-tornadoes in Jiangsu during 2007-2018 | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|--------------|--------------|--|--------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|----------------|-------------------------|-------------|------------|
| 发生日期 | 提前时间 | 持续时间 /min | TVS 平均底高 /km | TVS 平均顶高 /km | 平均最大切变 T_{maxsh} 及时间 / $10^{-3} s^{-1} /min$ | 最低仰角速度差 / $m \cdot s^{-1} /km$ | 最强切变 / $m \cdot s^{-1} /km$ | TVS 厚度 /km | 龙卷时刻最大切变 / $10^{-3} s^{-1}$ | 龙卷时刻最大切变高度 /km | LLDV / $m \cdot s^{-1}$ | 最大回波强度 /dBz | 最大回波高度 /km |
| 2008/07/30 | 12 | 36 | 0.9 | 3.3 | 55.4/8 | 23.0 | 1.1 | 2.4 | 67.3 | 0.9 | 37.5 | 54.8 | 2.6 |
| 2008/07/30* | 24 | 49 | 0.8 | 2.2 | 50.4/30 | 25.0 | 1.1 | 1.9 | 65.9 | 0.8 | 33 | 55.3 | 2.6 |
| 2008/07/30 | -18 | 30 | 1.3 | 3.3 | 52.4/30 | 22.1 | 1.6 | 2.2 | | | | 56.9 | 3.6 |
| 2012/08/10 | 0 | 6 | 1.3 | 2.2 | 32.7/6 | 23.0 | 1.3 | 1.5 | 32 | 1.3 | 23 | 57.5 | 6.1 |
| 2014/07/24 | 0 | 12 | 0.7 | 1.7 | 58.6/6 | 22.7 | 0.9 | 1.0 | 62.8 | 0.7 | 25 | 57 | 2.1 |
| 2017/08/01 | 12 | 5 | 0.5 | 3.1 | 54/6 | 17.5 | 0.5 | 2.6 | | | | 54 | 1.6 |
| 2018/08/18 | 0 | 12 | 1.2 | 5.1 | 29.6/18 | 31.5 | 2.3 | 2.7 | 30.6 | 2.1 | 30.5 | 55.1 | 2.6 |
| 2018/08/18* | 10 | 12 | 1.0 | 1.5 | 40.6/6 | 23.0 | 1.0 | 0.5 | 43.3 | 1.0 | 23.0 | 50.3 | 1.6 |
| 龙卷 TVS 平均值 | 5 | 20.4 | 1.1 | 3.1 | 45.7 | 26.0 | 1.3 | 2.0 | 50.7 | 1.0 | 27 | 55.1 | 2.7 |
| 非龙卷 TVS 平均值 | / | / | 1.9 | 5.1 | 32.7 | 22.2 | 2.5 | 3.2 | / | / | / | 54.3 | 3.2 |

注: 表中“*”处表示台风龙卷单体伴随有中气旋生成; 第五列 T_{maxsh} 表示该龙卷单体 TVS 平均最大切变出现的时刻, 如某 TVS 持续时间为 5 个时次, 时间分辨率为 6min, 若 T_{maxsh} 在第 5 个时次出现, 则列表中标为 5*6=30min。

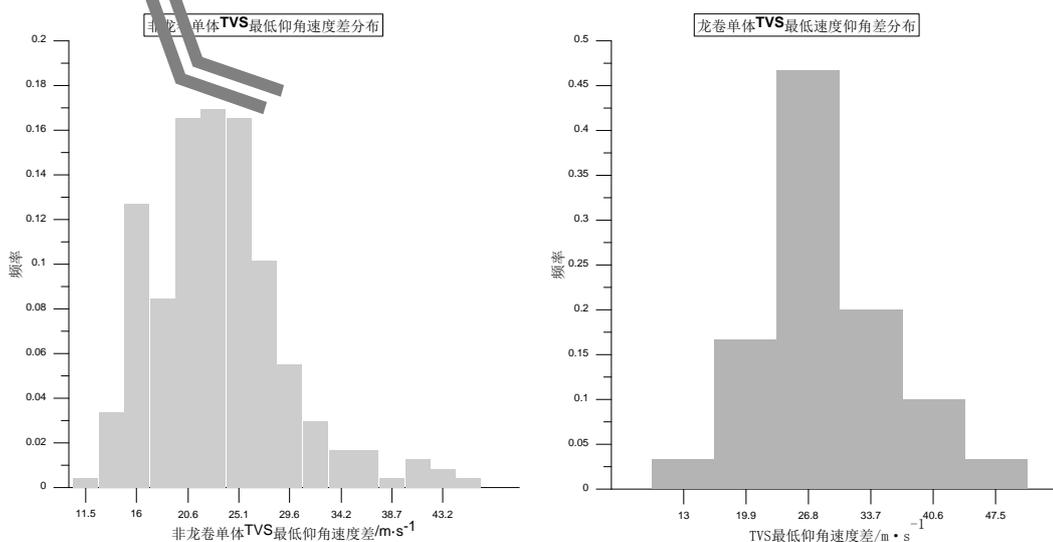
Note: The “*” in the table indicates that the typhoon tornado is accompanied by mesocyclone; T_{maxsh} in fifth column indicates the time when the average maximum shear of the tornado cell TVS occurs. Such as the duration of a TVS is 5 times and the time resolution is 6min, if the T_{maxsh} appears in the fifth time, it is 5 * 6 = 30min in the list.

从表 4 可见, 8 个伴随有 TVS 的台风龙卷单体在出现 TVS 特征时, 50 %没有提前量; 25 %的台风龙卷单体尽管在移动过程中伴随有 TVS, 但在龙卷发生时无 TVS 被识别出, 一是有可能龙卷距离雷达站较远, 无法探测到龙卷单体底部特征; 二是有可能龙卷发生时, 最低层正负速度对距离进一步缩小, 目前业务雷达的空间分辨率无法辨识这种变化, 因此会丢失 TVS 特征。

从 TVS 特征量来看, 龙卷发生时刻的 TVS 最大切变值在 $30.6\sim 67.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 平均为 $50.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$; TVS 最低仰角速度差为 $20.1\sim 31.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与龙卷强度等级对应看, 当最低仰角速度差超过 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 均为 EF2 级以上强龙卷。比起切变值, TVS 最低仰角速度差指示作用更明显。

在上述台风龙卷过程中, 除龙卷单体伴随有 TVS 特征外, 也有大量非龙卷单体伴随 TVS, 龙卷 TVS 和非龙卷 TVS 比例为 31:181, 只有 14.5 %的 TVS 与龙卷有关。与非龙卷 TVS 相应平均特征对比来看(表 4), 台风系统下产生龙卷的单体强回波中心更强, 质心更低, TVS 垂直伸展高度更低, 厚度更薄; 表征 TVS 强度的平均最大切变值也有较大差异, 龙卷 TVS 平均最大切变值约为 $46\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 而非龙卷 TVS 相应平均值约为 $25\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。

为能更清晰表征龙卷单体 TVS 和非龙卷单体 TVS 强度差异, 分别绘制了两者 TVS 最低仰角速度差和最大切变的频率分布情况(图 8)。如图所示: 龙卷单体 TVS 最低仰角速度差在 $13\sim 47.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大于非龙卷单体 TVS ($11.5\sim 43.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。且龙卷 TVS 强速度差频率更高, 速度差 $26.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率达 0.45。从最大切变值来看, 非龙卷 TVS 最大切变分布范围较广, 在 $10.1\sim 147.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大值虽然达到了 $147.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但大于 $90\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率非常低, 仅为 0.1; 龙卷 TVS 最大切变值为 $25.1\sim 30.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且在 $37.4\sim 49.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内的频率最高, 达 0.6。相比之下, 龙卷 TVS 的最大切变更强, 强切变出现的频率更高。



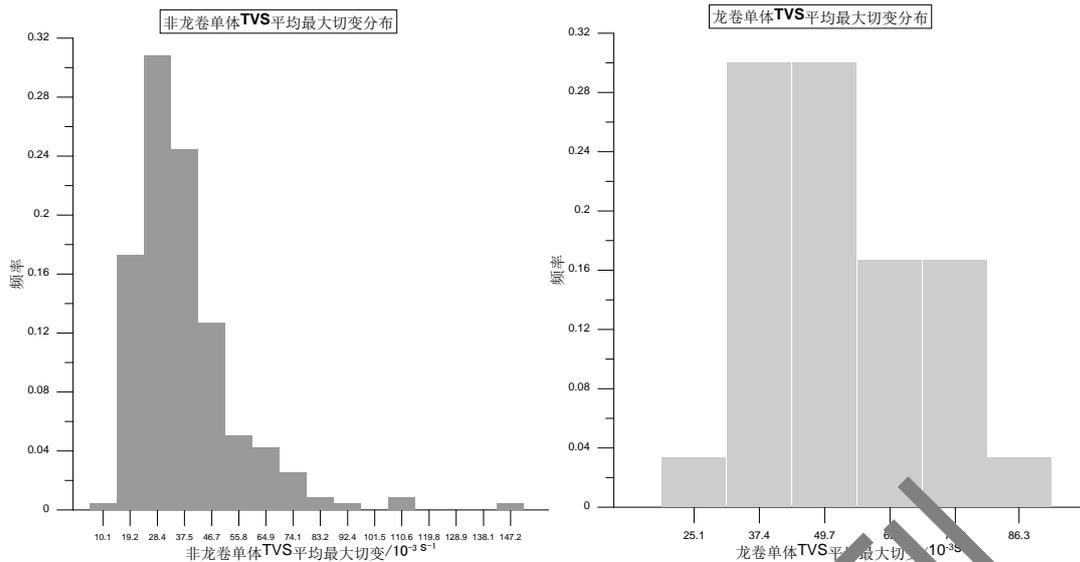


图8 2007-2018年江苏台风龙卷天气中龙卷与非龙卷单体TVS关键特征分布

- (a) 非龙卷单体TVS最低仰角速度差；(b) 龙卷单体TVS最低仰角速度差；
(c) 非龙卷单体TVS平均最大切变；(d) 龙卷单体TVS平均最大切变

Fig.8 Key feature distribution of tornado TVS and non-tornado TVS in Jiangsu during 2007-2018

- (a) LLDV of non-tornado TVS; (b) LLDV of tornado TVS;
(c) mean maximum shear of non-tornado TVS; (d) mean maximum shear of tornado TVS

5.3 江苏广东台风龙卷关键特征差异分析

为探讨江苏台风龙卷的雷达关键特征是否与广东台风龙卷相应特征量存在差异，本节按照5.1节雷达数据处理方式提取了广东台风龙卷数据集中含有TVS特征的龙卷个例，分别为2006年8月4日台风派比安影响下产生的5个龙卷事件和2015年10月4日台风彩虹影响下产生的2个龙卷事件。统计广东台风龙卷TVS和非龙卷TVS出现时次个数，结果为67:215，约23.8%的TVS与龙卷有关，高于江苏台风龙卷相应统计结果14.5%。该统计结果表明江苏台风系统影响下出现TVS特征对龙卷的预警能力只有广东的1/2。

从龙卷TVS持续时间看（图略），广东台风龙卷TVS提前时间平均为17.9 min，平均持续时长长达49 min，比起江苏台风龙卷TVS的可指示性，广东台风系统下TVS的出现均预示着更早的预警提前量以及可跟踪效果。

再对比两者龙卷TVS的关键特征量最大切变值和LLDV。图9统计了广东龙卷TVS最低仰角速度差频率分布直方图，图9a可见广东地区产生龙卷的TVS最低仰角速度差50%分布于 $28.6\sim 39.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而江苏地区相应值偏弱，50%分布于 $26.8\sim 33.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；对比图8d和图9b，广东台风龙卷的TVS最大切变值平均是江苏的3倍，超过60%的最大切变值位于 $46.7\sim 77.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ，远高于江苏台风龙卷相应频率区间（ $37.4\sim 49.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ）。为分析两地龙卷单体TVS最大切变差异原因，绘制了最大切变与距离雷达斜距的曲线图（图10）。

由该图可见，两地平均最大切变值相差接近 $30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，该巨大差异来自广东地区距离雷达站 35 km 半径范围内的 TVS 结构贡献，这是由于切变计算公式中切变值与距离成反比，当 TVS 结构距离雷达站越近，切变值越大。35~80 km 距离间两地切变分布较为接近，约 $50 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 左右。

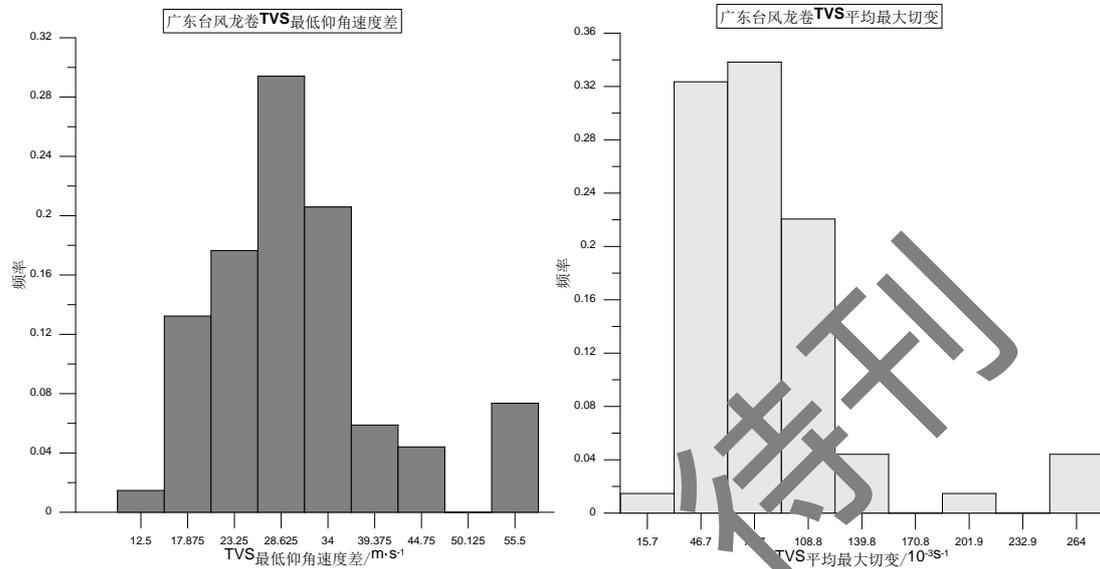


图9 广东台风龙卷TVS关键特征分布

(a) 最低仰角速度差 (b) 平均最大切变

Fig.9 Key feature distribution of tornado TVS in Guangdong typhoon
(a) LLDV of tornado TVS (b) average maximum shear of tornado TVS

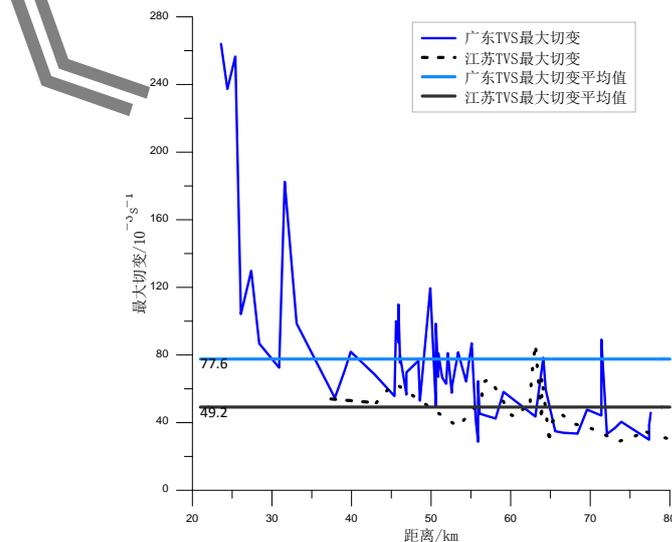


图10 江苏、广东两地台风龙卷TVS最大切变与距离分布

Fig.10 Maximum shear and distance distribution of tornado TVS in Jiangsu and Guangdong

6 结论

本文对 2007–2018 年间江苏发生的台风龙卷进行了统计分析, 总结出江苏台风龙卷的基本活动特征, 并与广东地区台风龙卷的环流背景、环境特征、地面中尺度特征及雷达关键特征进行对比, 得出以下结论:

(1) 2007–2018 年间江苏共有 7 个台风产生了 12 个龙卷过程, 年均有 0.58 个台风会产生龙卷。江苏台风龙卷主要集中在 7、8 月, 8 月最为多发, 占总数的 50%, 主要发生在午后, 在 16–20 时发生的龙卷占总数的 83%。而广东龙卷在 6–10 月均有发生, 8 月最为多发, 且龙卷在白天均有发生。江淮中部以及西北部的徐州是江苏台风龙卷频发的两个地区, 江河湖海等大型水体可能促进龙卷的生成。

(2) 西北行的台风易在江苏产生龙卷, 台风龙卷出现在登陆台风中心的东北象限, 距台风中心 250~500 km 范围。江苏台风龙卷多发生于台风登陆 24 h 之后, 占总数的 75%。峰值出现在台风登陆后的 36~48 h, 占总数的 41% (5 个); 大多数台风在生成龙卷时的强度为热带低压 (38%) 和热带风暴 (30%)。而在广东地区产生龙卷的台风多为西行, 龙卷的高发时段主要在台风登陆后 24 h 内, 龙卷发生时, 台风强度在热带低压到强台风量级之间, 约 73% 的台风强度在热带风暴以上量级。

(3) 对比江苏和广东地区龙卷发生前的环境背景, 共性为龙卷发生地均处于台风东侧以及副热带高压西侧之间的东南气流当中, 中低层存在东南偏南急流, 地面有明显的辐合线, 强盛的低空急流输送充足的水汽和不稳定能量, 促使层结不稳定性增强, 为龙卷的发生提供了有利的环境条件。

(4) 江苏和广东地区台风龙卷的发生环境差异在于: 尽管两个区域台风龙卷均发生在 CAPE 值不大、LCL 较低、深层 (0~6 km) 和低层 (0~1 km) 垂直风切变较大以及 SHR 较大的环境下, 但与江苏龙卷相比, 从均值来看, 广东龙卷的 CAPE 和 CIN 更小, LCL 更低, 具有更大的深层 (0~6 km) 和低层 (0~1 km) 垂直风切变, 且 SRH 较小。产生这些差异的可能原因为广东地区温湿条件更好, 更低的 LCL 易于水汽快速凝结, 降水显著, 不稳定能量进一步释放, 且广东龙卷产生时台风强度更强, 使得垂直风切变更强。

(5) 江苏台风龙卷单体约有 2/3 伴随 TVS 特征, 其中 50% 单体的 TVS 特征出现于龙卷发生后; 25% 的台风龙卷单体尽管在移动过程中伴随有 TVS, 但在龙卷发生时无 TVS 被识别出。产生强龙卷的单体同时伴随有中气旋和 TVS 特征。当 TVS 的最低仰角速度差超过 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 更易产生强龙卷。与广东台风龙卷 TVS 关键特征量对比显示, 江苏地区产生龙卷的 TVS 最低仰角速度差偏小, 最大切变值也偏小 (为广东的 1/3)。

参考文献

- 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等. 2020. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018)[J]. 中国科学: 地球科学, 50(5): 619-634. Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al. 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China: Earth Sci,

63(1): 37-51.

- 陈锋, 董美莹, 冀春晓, 等, 2019. 雷达资料同化对2016年6月23日阜宁龙卷模拟的改进[J]. 气象学报, 77(3): 405-426. Chen F, Dong M Y, Ji C X, 2019. Improving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 77(3): 405-426 (in Chinese).
- 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等, 2019. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J]. 海洋气象学报, 39(3): 19-28. Xi X G, Meng X G, Zhang L, et al, 2019. Analysis of microscale vortex signature and early warning capability of tornadoes in the circulations of typhoon YAGI and RUMBIA[J]. J Mar Meteor, 39(3): 19-28 (in Chinese).
- 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).
- 冯佳玮, 闵锦忠, 庄潇然, 2017. 中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J]. 热带气象学报, 33(4): 530-539. Feng J W, Min J Z, Zhang X R, 2017. The spatial and temporal distribution of Chinese tornados and their characteristics analysis of environmental physical variations[J]. J Trop Meteor, 33(4): 530-539 (in Chinese).
- 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾, 等, 2006. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 17(3): 370-375. He C F, Yao X P, Hu C L, et al, 2006. Analyses on a tornado event in front of a typhoon[J]. J App Meteor Sci, 17(3): 370-375 (in Chinese).
- 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等, 2019a. 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, 2019a. 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, 2019b. 1804号台风“艾利”龙卷分析[J]. 气象学报, 77(4): 645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019b. An analysis on tornadoes in typhoon Fenghuan[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 645-661 (in Chinese).
- 蒋义芳, 吴海英, 沈树勤, 等, 2009. 0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析[J]. 气象, 35(4): 68-75. Jiang Y F, Wu H Y, Shen S Q, et al, 2009. Analysis of environmental conditions and Doppler radar data for tornado events in front of typhoon Fenghuang (0808)[J]. Meteor Mon, 35(4): 68-75 (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).
- 李佳, 陈葆德, 张旭, 等, 2017. 2016年6月23日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析[J]. 大气科学, 41(6): 1221-1233. Li J, Chen B D, Zhang X, et al, 2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1221-1233 (in Chinese).
- 沈树勤, 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析[J]. 气象, 16(1): 11-16. Shen S Q, 1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon[J]. Meteor Mon, 16(1): 11-16 (in Chinese).
- 王霁吟, 陈宝君, 郑凯琳, 等, 2019. 云滴数浓度对超级单体龙卷影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 43(6): 1413-1423. Wang J Y, Chen B J, Zheng K L, et al, 2019. A numerical study of the influence of the droplets number concentration on supercell tornadoes[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1413-1423 (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).
- 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).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等, 2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. *高原气象*, 25(05): 914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006. The Detection of a Severe Tornado Event in Anhui with China New Generation Weather Radar[J]. *Plateau Meteor*, 25(5):914-924(in Chinese).
- 章国材, 2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社: 68-72. Zhang G C, 2011. Analysis and Prediction of Severe Convective Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press: 68-72 (in Chinese).
- 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等, 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. *气象*, 41(8): 942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. *Meteor Mon*, 41(8): 942-952 (in Chinese).
- 朱君鉴, 蔡康龙, 龚佃利, 等, 2019. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别[J]. *海洋气象学报*, 39(4): 21-34. Zhu J J, Cai K L, Gong D L, et al, 2019. Disaster investigation and weather radar identification of tornadoes in Shandong caused by landfalling typhoon YAGI (2018)[J]. *J Mar Meteor*, 39(4): 21-34 (in Chinese).
- 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.
- Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al, 2018. Tornado climatology of China[J]. *Int J Climatol*, 38(5): 2478-2489.
- Doswell III C A, 2001. Severe convective storms-An overview[J]. *Meteor Monogr*, 28(50): 1-26.
- McCaul Jr E W, 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments[J]. *Mon Wea Rev*, 119(8): 1954-1978.
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, et al, 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China[J]. *Wea Forecasting*, 33(3): 693-713.
- Mitchell E D W, Vasiloff G J, Stumpf G J, et al, 1998. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm[J]. *Wea Forecasting*, 13(2): 352-366.
- Schultz L A, Cecil D J, 2009. Tropical cyclone tornadoes, 1950-2007[J]. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3471-3484.
- Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D W, et al, 1998. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D[J]. *Wea Forecasting*, 13(2): 304-326.