

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. 气象, 42(11):1304-1314.

2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析^{*}

张小玲 杨 波 朱文剑 方 翀 刘鑫华 周康辉 蓝 渝 田付友

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 2016 年 6 月 23 日, 江苏省盐城市阜宁县发生了历史罕见的 EF4 级龙卷, 导致 99 人死亡, 846 人受伤, 并有大量建筑物被损毁。文章利用观测资料对产生强龙卷的天气背景和中尺度特征进行了分析, 发现: 阜宁龙卷发生在我国东部龙卷最高发的地区和季节, 产生龙卷的天气尺度背景为典型的梅雨期暴雨环流, 产生龙卷的中尺度对流系统发生在地面暖锋南侧, 这里也是高低空急流耦合的区域, 与高空急流相伴的动力强迫特征明显, 大气热力不稳定条件为中等偏强; 产生阜宁龙卷的中尺度对流系统与美国大部分强龙卷相似, 为块状的离散单体对流模态, 且具有经典超级单体的钩状回波和强中气旋特征, 并伴有龙卷涡旋特征(tornado vortex signature, TVS); 龙卷位于钩状回波顶端, 主要发生在中气旋底高高度低于 1 km 期间。

关键词: 强龙卷, 动力强迫, 暴雨, 超级单体, 中气旋

中图分类号: P425, P445

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.002

Analysis of the EF4 Tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016

ZHANG Xiaoling YANG Bo ZHU Wenjian FANG Chong LIU Xinhua
ZHOU Kanghui LAN Yu TIAN Fuyou

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: An extremely severe EF4 tornado struck Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016. The tornado killed 99 people, injured 846 others, and damaged many buildings. This paper focuses on the synoptic environment and mesoscale characteristics of the tornado by using all kinds of observation data. The tornado occurred in the most sensitive area and season with highest tornado occurrence frequency in East China. The synoptic environment for the tornado was the typical rainstorm circulation in Meiyu season. The tornado-produced mesoscale convective system occurred in the south side of the surface warm front where the high-level jet coupled with the low-level jet. The strong deep-level dynamical forcing characteristics are significant accompanied by high-level jet, and the thermal-dynamic unstable condition is moderately strong. The tornado-produced mesoscale convective system was a discrete cell with elliptically shaped region of reflectivity which is the most favorable convective mode for significant tornado in the United States continent. The structure of cell is the same as the typical super cell with bow echo, severe mesocyclone and tornado vortex signature (TVS). Funing tornado was in the top of the bow echo and occurred during the period when the height of the mesocyclones was lower than 1 km.

Key words: significant tornado, dynamical forcing, rainstorm, super cell, mesocyclone

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430106)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306011)共同资助
2016 年 10 月 8 日收稿; 2016 年 10 月 27 日收修定稿
第一作者: 张小玲, 主要从事强对流和暴雨天气预报方法和机理研究. Email: zhangxl@cma.gov.cn

引 言

2016 年 6 月 23 日下午,江苏省盐城地区发生了历史罕见的龙卷事件,造成 99 人死亡,846 人受伤。根据中国气象局派出的灾害调查组确定,此次在江苏省盐城市阜宁县造成重大人员伤亡的龙卷级别高达 EF4 级(图 1;郑永光等,2016)。EF4 级以上龙卷即便在龙卷高发的美国发生概率也极低,仅占 1%,但 67% 的人员死亡由这类龙卷产生,并且只有 5% 的坚固建筑能在这类龙卷中免遭损坏(Schumacher et al, 2010; Arsen'yev, 2011; Doswell et al, 2012)。

为了更好地认识进而对可能造成严重灾害的龙卷进行更有效的预报,美国对 EF2 级以上的强龙卷发生的天气背景和产生强龙卷的回波特征进行了大量统计和个例分析(Johns, 1982; Johns et al, 1996; Brooks et al, 1994; Rasmussen, 2003; Rasmussen et al, 1998; Schumacher et al, 2010)。Johns 等(1992)、Rose 等(2004)的研究指出,有利于龙卷的环境条件为地面和 850 hPa 露点温度、500 hPa 倾斜槽以及 250 hPa 急流的第二象限,即出口区右侧,这些研究结果在业务中得到使用。但是, Gaffin 等(2006)对 1950—2003 年美国阿帕拉契山脉南部 F2 级以上龙卷的天气学条件分析发现,大多数强龙卷发生在 500 hPa 西南气流中的非倾斜槽区,正好位于 250 或 300 hPa 急流右侧,风的动力作用较之不稳定更容易判断强龙卷和弱龙卷,并进一步指出, 500 hPa 倾斜槽并不有助于阿帕拉契山脉南部强龙卷的形成,强龙卷也不一定必须是在高空急流入口右侧或出口左侧上升气流被预计最大的区域。Philip 等(2011)在研究 2003 年一次强龙卷时指出,大尺度环境维持深厚的湿对流,近地层的暖锋、垂直风切变和中气旋则导致强龙卷的出现。这些研究使得美国龙卷尤其是强龙卷发生的有利环境条件更加清晰,有助于业务预报中判断龙卷尤其强龙卷发生的可能。

为了更好地区分强弱龙卷,有关龙卷的对流模态的认识在近 10 年也有了很大的发展。Gallus 等(2008)和 Duda 等(2010)的研究指出,美国大平原及密西西比河上游和中游的龙卷有 35% 是准线状对流(QLCSs)。但美国风暴预报中心(Storm Prediction Center, SPC)的预报员通常根据块状的离

散单体对流模态去估计美国大平原长生命史的龙卷达到 EF2~EF5 级。Trapp 等(2005)对 1998—2000 年 3828 个美国本土的龙卷统计分析也发现, 79% 龙卷为单体结构, 18% 为 QLCSs, 3% 为其他对流模态,主要在登陆热带气旋的雨带中产生。QLCSs 更倾向产生较弱的龙卷。Grams 等(2012)对美国 2000—2008 年的 EF2 以上强龙卷分析发现:约 70% 以上的强龙卷(EF2 级以上)、80% 以上的 EF4 级龙卷为块状离散单体对流模态。这类龙卷最易在春季和夏季的午后发生。其环境特点表现为 500 hPa 盛行 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的偏西风,温度为 -12°C 左右; 850 hPa 盛行 $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风, 12 h 露点温度变化约为 $0 \sim 4^\circ\text{C}$; $0 \sim 6 \text{ km}$ 风切为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, $0 \sim 1 \text{ km}$ 风切 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;抬升凝结高度(LCL) $750 \sim 1000 \text{ m}$ 。伴随对流模态的综合指数和动力指数较热力指数更能将强龙卷事件与风雹事件区分开。

由于我国龙卷发生的概率远低于美国(范雯杰等, 2015),有关 F2 级以上强龙卷的研究主要以个例研究为主。姚叶青等(2012)对发生在梅雨期间的两次强龙卷过程分析中指出,梅雨期间较好的低层暖湿气流、中层弱冷空气、低空急流或低层低涡为强龙卷的产生创造了良好的环境。Evans 等(2002)、Brooks 等(2003)指出,强烈的低层($0 \sim 1 \text{ km}$)风垂直切变和低的 LCL 有利于 F2 级以上强龙卷产生。这在我国的大量强龙卷个例研究中也证实(俞小鼎等, 2008; 吴芳芳等, 2013)。俞小鼎等(2006b; 2008)分别对两次安徽强龙卷雷达特征分析。郑媛媛等(2009)对 2003—2007 年发生在安徽的 3 次强龙卷过程分析时指出: F2~F3 级龙卷均由超级单体产生;超级单体龙卷产生在中等大小的对流有效位能(CAPE)和强垂直风切变条件下,同时 LCL 较低;强龙卷发生前、发生时在多普勒雷达上通常(有例外)都探测到强中气旋和龙卷涡旋特征(tornado vortex signature, TVS);与非龙卷超级单体风暴相比,导致强龙卷的中气旋底高明显偏低,基本在 1 km 以下;造成龙卷天气的超级单体风暴最大反射率因子高度与风暴质心高度接近,基本在 3 km 左右,反射率因子在 $50 \sim 60 \text{ dBz}$ 。周后福等(2014)、刘娟等(2009)、姚叶青等(2007)通过对发生在江苏、安徽的超级单体龙卷过程的环境条件和雷达特征分析,也指出了类似的雷达特征。这些研究加深了对我国强龙卷发生的有利环境条件和雷达特征认识。

魏文秀等(1995)在对 1981—1993 年我国的龙卷统计分析指出,中国龙卷风的高发区有两个,一个是自长江三角洲经苏北平原至黄淮海平原,呈南北走向,最大中心在山东和江苏交界处的平原湖泊处;另一个是在广东和广西,呈东西走向。范雯杰等(2015)利用 1961—2010 年的龙卷记录进一步指出:江苏是我国强龙卷发生最多的省,50 年间共发生 36 次,其中 EF3 级 8 次,EF4 级 1 次;盐城则是江苏记录到 EF2 级以上龙卷最多的地区。此次阜宁龙卷正是发生在我国强龙卷发生气候概率最高的地区。

1951 年以来江苏省共发生 12 次造成大量人员伤亡的龙卷事件,2016 年 6 月 23 日的死亡人数居历年之首,也是江苏省的第二次 EF4 级龙卷事件,实属罕见。目前,我国有关 EF4 级以上龙卷的个例研究尚未见。本文拟就 2016 年阜宁 EF4 级龙卷的天气学背景以及中尺度特征进行分析,为未来开展龙卷预警业务提供参考。



图 1 2016 年 6 月 23 日 14—15 时
(北京时,下同)阜宁龙卷灾害路径

[红色方框表示灾害调查证实有 EF4 级龙卷
灾害发生位置,根据郑永光等(2016)标注]

Fig. 1 Damage track of the Funing tornado
during 14:00–15:00 BT 23 June 2016

(Red boxes are the locations of the villages
struck by the EF4 tornado, from Zheng et al, 2016)

1 阜宁及周边地区强对流天气实况

国家气象中心强天气预报中心的强对流业务监测显示,6 月 23 日 08—20 时,在山东南部、江苏北部出现了大范围的以短时强降水为主的强对流天气,江苏西北部和山东南部局地出现小时雨强超过 50 mm,最大超过 80 mm 的强降雨,江苏北部偏东地区伴随有 8 级以上雷暴大风。

现阶段业务监测尚难以对部分冰雹和小尺度的龙卷、下击暴流等强对流天气进行有效监测。阜宁县及周边地区区域自动站间距 4~6 km,盐城雷达

识别的 TVS 经过区域的自动站间距为 8~10 km (图 3)。利用区域自动站、目击者灾情报告和雷达资料的综合监测(图 3)显示,23 日 14—15 时,中气旋主要影响阜宁县新沟镇及其以南的东西向狭窄区域,中气旋影响区域及其西侧共计有 5 个自动站的瞬时风速超过 8 级,大风范围非常小,仅出现在阜宁县西南部长 25 km、宽 10 km 的范围内,最大风速在阜宁县新沟镇为 $34.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级以上,时间为 14:29);自动站降雨监测显示,盐城北部地区,14—20 时 6 h 累积降水量在 40~90 mm,最强在滨海县

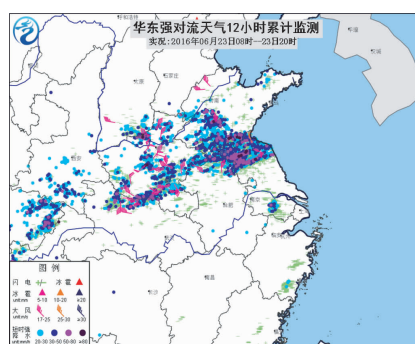


图 2 2016 年 6 月 23 日 08—20 时华东
强对流天气业务监测图

(<http://10.1.64.146/npt/product/iframe/42946>)

Fig. 2 Severe convective weather
monitoring in East China during
08:00–20:00 BT 23 June 2016

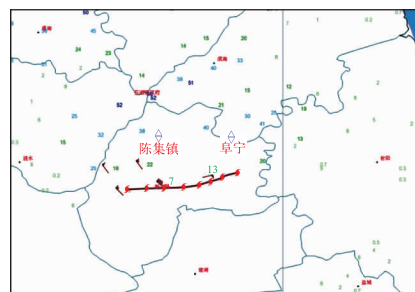


图 3 6 月 23 日 14—15 时自动站观测的
瞬时大风(风标)和 1 h 降水量(标值,单位:mm)

(◇为目击者报告冰雹灾情位置,9 表示盐城
雷达上识别的 14:14—14:54 TVS 位置)

Fig. 3 Gust of high wind (wind barb) and
1 h precipitation (marked value, unit: mm)
observed by automatic weather stations
during 14:00–15:00 BT 23 June 2016

(◇ is the location of hail disaster reported by sportter
and 9 represents the tornado vortex signature
(TVS) detected by the Yanchen Radar]

天场镇中心小学站, 累计 102 mm(图略); 14—15 小时降水量在 10~50 mm, 最强在涟水县石湖镇镇政府站 56 mm。14:30 左右阜宁县城北、陈集镇一带出现冰雹天气, 冰雹直径 20~50 mm。以上监测信息表明, 影响阜宁及周边地区的强对流系统非常局地, 但造成的大风、冰雹和降水很剧烈。

闪电监测还显示, 在阜宁及周边地区地面观测到强烈大风、冰雹和强降雨之前的 13—14 时闪电密度陡增(图 4a), 表明这期间产生强对流的中尺度对流系统处于强烈发展阶段; 当地面观测到剧烈强对流天气现象的 14—15 时闪电密度则明显降低(图 4b), 但正闪比例明显偏大, 事发地 20 km 内正闪 72 次, 负闪 4 次。

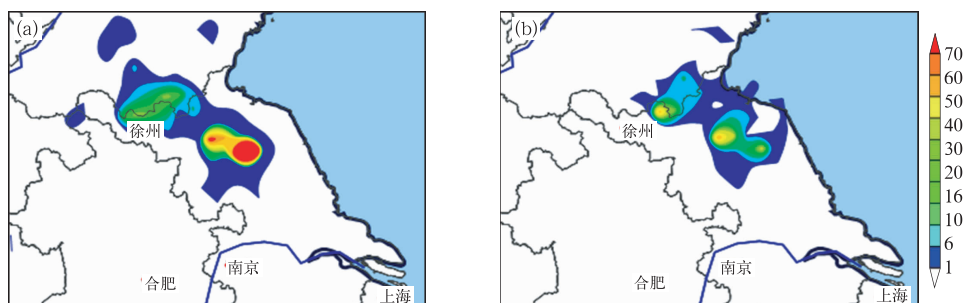


图 4 6 月 23 日 13—14 时(a)和 14—15 时(b)闪电密度分布(单位:次·km⁻²)

Fig. 4 Lightning density (unit: frequency·km⁻²) distribution during
(a) 13:00—14:00 BT and (b) 14:00—15:00 BT 23 June 2016

2006a; 2006b; 刘娟等, 2009)。俞小鼎等(2006b; 2008)认为中等程度的 CAPE 和大的深层垂直风切变有利于超级单体风暴产生, 而大的低层垂直风切变、低的 LCL 和地面阵风锋的存在有利于 F2 级以上强龙卷产生。

2016 年下旬正处于长江中下游梅雨盛期。22—23 日, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)北抬, 其西侧低层西南气流北上, 向江苏北部地区持续输送水汽和热量; 与此同时, 东北冷涡后部一股较强的冷空气南下, 并逐渐影响江苏北部; 受冷空气和西南暖湿气流共同影响, 苏皖北部大气层结不稳定状态持续增强(图略)。从 6 月 23 日 08 时 500 hPa 天气图(图 5)可见, 黄淮和长江中下游地区均位于西风带南缘、副高西北侧非常有利于暴雨天气发生的环流背景下, 从东北冷涡中心向南的 500、700 和 850 hPa 槽线位置自西向东排列, 且位置接近, 与美国阿帕拉契山脉南部 F2 级以上强龙卷的天气学特

2 天气背景分析

典型的暴雨天气背景、台风和冷涡背景是我国龙卷最易发生的三类天气条件(姚叶青等, 2012; 王秀明等, 2015; Zheng et al, 2011)。尤其是伴随在典型暴雨天气中的龙卷(如梅雨锋暴雨和高空槽前暴雨中的龙卷), 这类龙卷发生在湿层非常深厚的环境下, 雷达回波较经典超级单体龙卷弱(姚叶青等, 2012; 张一平等, 2012)。梅雨锋伴随的龙卷是在低层有明显的风切变的有利形势下产生的, 环境场具有较强的对流不稳定性、大的低层垂直风切变和较低的对流凝结高度(周后福等, 2014; 俞小鼎等,

征类似: 强龙卷发生在 500 hPa 西南气流中的非倾斜槽区(Gaffin et al, 2006)。这说明高空锋面陡峭, 干冷气团与暖湿气团交汇剧烈。14 时, 地面锋从长江中游向东北方向延伸到安徽东北部, 低空急流与地面锋的位置、走向一致, 急流从湖北向东北延伸到江苏西北部与安徽交界处, 位于低空急流左侧的河南和安徽北部、低空急流前侧的山东南部 and 江苏北部正好位于高空急流入口的右后侧, 这里也是最有利抬升指数(BLI)梯度最大的区域, 气层非常潮湿且不稳定, 整层可降水量超过 60 mm。14:15 FY-2Y 红外卫星云图显示(图略), 在锋面云系的西北侧, 500 hPa 西北气流控制区暗区清晰, 表明有强盛的冷空气东移南下与暖湿空气交汇, 使得冷锋及其北侧、暖锋南侧对流发展旺盛。在阜宁造成重大人员伤亡的 EF4 级龙卷正是发生在暖锋南侧的中尺度对流系统中。

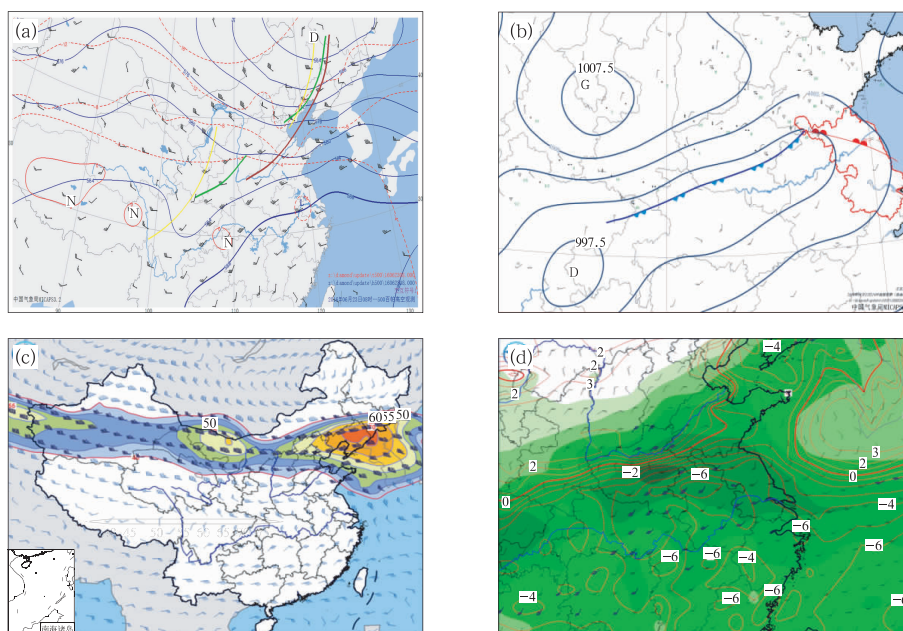


图 5 2016 年 6 月 23 日 08 时 500 hPa 天气图(a), 14 时地面天气图(b),
14 时 NCEP_GFS 模式起报时的 200 hPa(c)和 850 hPa(d)风场

(图 a 中黄色、绿色和棕色实线分别表示 500、700 和 850 hPa 槽线;

图 d 中阴影为整层可降水量, 单位: mm; 等值线为最有利抬升指数 BLI, 单位: K)

Fig. 5 The 500 hPa chart at 08:00 BT (a), surface chart at 14:00 BT (b),
200 hPa (c) and 850 hPa (d) wind field simulated by NCEP_GFS
starting at 14:00 BT 23 June 2016

(Yellow, green and brown lines represent trough lines at 500 hPa,

700 hPa and 850 hPa in Fig. a; shadow and contour lines represent precipitable

water (unit: mm) and BLI (best lifting index, unit: K) in Fig. d, respectively)

探空站观测通常能代表站点周围 100~200 km 范围的大气状态。根据距离阜宁 36 km 的射阳站 6 月 23 日 08 和 14 时探空分析(图 6), 大气处于不稳定状态, CAPE 分别为 952 和 $657 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; LCL 很低, 14 时位于 984.6 hPa 处(约为海拔高度 240 m); 14 时 0~1 和 0~6 km 垂直风切变分别为 8 和 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于射阳 14 时探空在 380 hPa 以上资料缺失, 考虑到高层温度变化小, 在 380 hPa 以上用 08 时温度代替 14 时温度, 则计算的自地面抬升的 CAPE 为 $1623 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 自最不稳定层抬升的 CAPE 则高达 $2991 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Markowski 等(2010)在分析强对流发生概率与 CAPE 和 0~6 km 垂直风切变时指出, CAPE 和 0~6 km 的垂直风切变越大, 发生龙卷的可能性越大。Craven 等(2004)则认为, 1200 m 以下低的 LCL 和 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上高的 0~1 km 风切变更有利于龙卷的发生, 尤其强龙卷

更是具有低层强垂直风切变和低 LCL 特点。与美国龙卷发生时的条件气候概率比较发现, 射阳探空站附近发生龙卷的条件气候概率中等偏低。本次 EF4 级龙卷动力条件与美国 F2 级以上的强龙卷的动力条件相比, 0~1 km 远较美国的 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 弱, 但 0~6 km 风切略高于美国的 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; LCL 远低于美国的 750~1000 m (Grams et al, 2012)。吴芳芳等(2013)的统计研究表明: 苏北产生龙卷特别是 F2 级以上强龙卷的超级单体通常对应高 CAPE、较高的低层垂直风切变和低的 LCL; 他们的结果表明超级单体龙卷对应的 0~1 km 风切变在 $6 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 89% 以上超过 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 63% 超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 89% 龙卷事件对应的 CAPE 达到 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及以上。由此可见, 6 月 23 日江苏北部的大气环境条件比较有利于龙卷的发生, 对于强龙卷, 其低层的垂直风切变条件相对较弱。

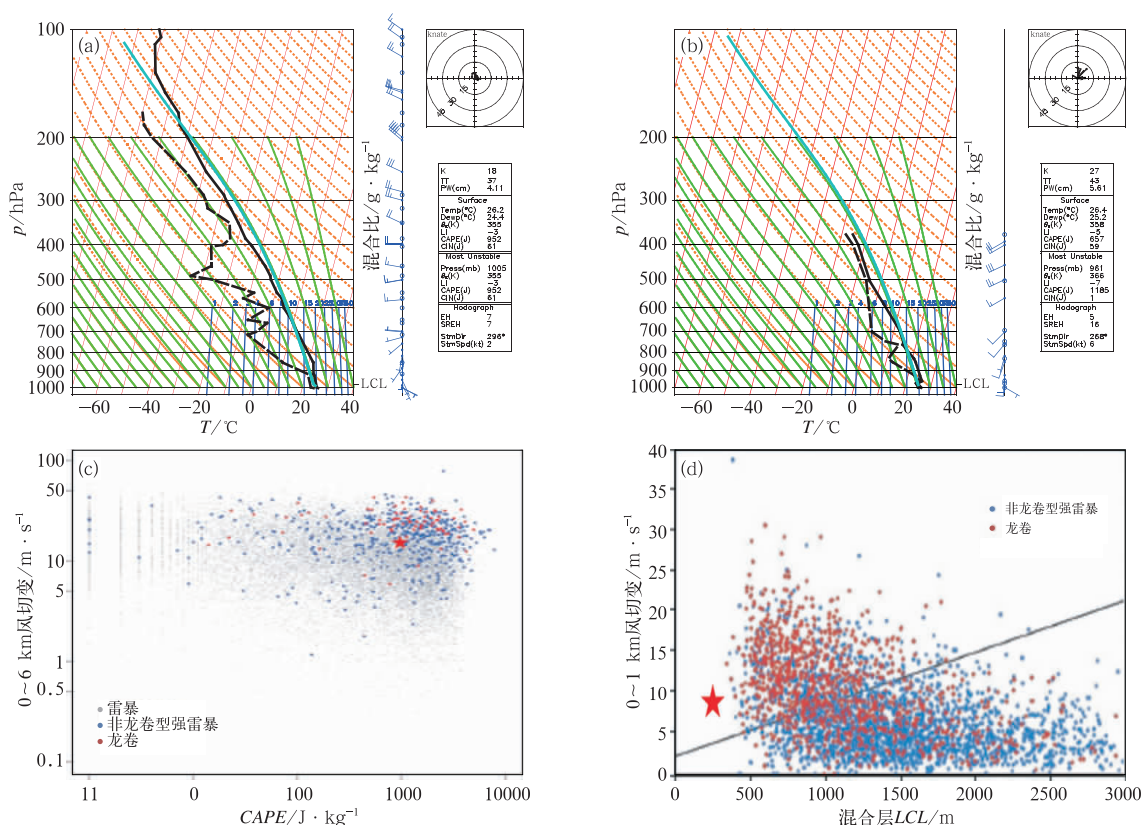


图 6 2016 年 6 月 23 日 08 时(a)和 14 时(b)射阳探空图,强对流发生概率的 CAPE 和 0~6 km 风切关系图(c),龙卷发生概率对应的 LCL 和 0~1 km 风切关系图(d)

[图 c 和 d 引自 Markowski 等(2010),灰色圆点、蓝色圆点和红色圆点分别表示发生雷暴、非龙卷型强雷暴和龙卷的位置,红色星型符号为根据射阳探空站分析的 CAPE 和 0~6 km 风切变、LCL 和 0~1 km 风切变对应位置]

Fig. 6 Sounding for Sheyang at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 23 June 2016; correlation between the chance of severe thunderstorms and the 0–6 km vertical wind shear (c), correlation between the LCL corresponding to observed tornadoes and the 0–1 km vertical wind shear (d) (Figs. c and d are cited from Markowski et al (2010); the grey, blue and red dots represent the locations of thunderstorm, non-tornadoic severe thunderstorm and severe tornado, respectively; red star is the location of CAPE corresponding to 0–6 km shear calculated from Sheyang sounding in Fig. c, LCL and 0–1 km shear in Fig. d)

进一步分析阜宁县出现剧烈大风时(阜宁县新沟镇 14:29 瞬时风速为 $34.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的地面自动站观测(图 7)显示,阜宁及周边地区位于暖湿舌内;地面气旋中心位于距阜宁县城 19 km 的板湖镇,气旋直径约 20 km;气旋所在的地面辐合线位于阜宁县城南和西南侧,辐合线东段位于发生灾情最重的阜宁县计桥村、王滩村、两合村以南 2 km。14:30 地面气旋东移到计桥村正南 2 km 处,东段辐合线仍然位于原地。结合图 5 可见,阜宁南部地区正好位于高低空急流耦合和地面高露点、湿热汇合区。在美国,这类地区比较容易产生龙卷(Giordano

et al,1991;Rasmussen et al,2000)。

3 中尺度特征分析

Grams 等(2012)在对美国强龙卷进行统计研究时,将产生 EF2 级以上龙卷的对流模态分为 3 类:第一类为相对独立的单体聚集成圆形或椭圆形的离散单体(discrete cell),最大回波可达 50 dBz 以上;第二类为主轴长度超过 100 km 并且至少是短轴 3 倍且有共同前导边界以串联方式移动的准线状对流(QLCSs);第三类为多个单体聚集成团并且难

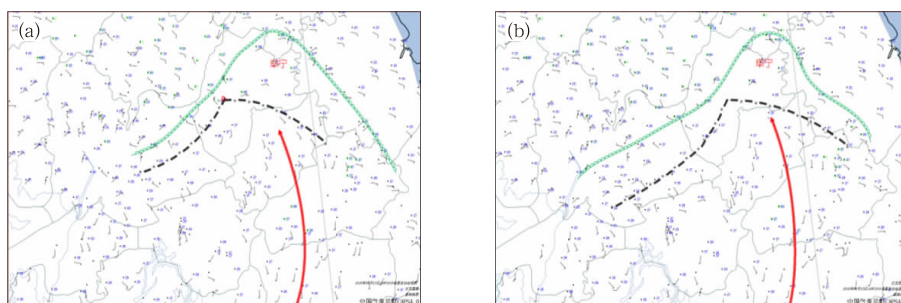


图 7 2016 年 6 月 23 日 14:20(a)和 14:30(b)地面天气图
(红色箭头表示暖湿气流,黑色断线表示地面辐合线,绿色锯齿线南侧为露点温度高值区)
Fig. 7 Surface charts at (a) 14:20 BT and (b) 14:30 BT 23 June 2016
(Red arrow represents wet and warm flow, black broken line is surface convergence line,
area with high dew-point temperature is to the south of the green aliasing line)

以区分是非连续的还是线状的簇类对流(cluster),其 40 dBz 以上回波区域范围至少为 2500 km² (图 8)。其中,78%以上的 EF2 级以上龙卷发生在块状的离散对流单体模态中,EF4 级以上龙卷的比例更是高达 85%以上。此次阜宁 EF4 级龙卷也是发生在这类不连续的块状对流中(图 9)。6 月 23 日 12:00,在地面暖锋及其南侧的山东南部与江苏北部交界处有大片的 40 dBz 回波发展,在主回波的南

侧、江苏西北的洪泽县有一块状回波单体,最强回波超过 50 dBz(图 9a)。在随后的 4 h,该回波向东略偏北方向移动,在 14:00—15:00 影响阜宁,后经射阳于 16:00 以后出海。期间,虽然在该回波的南北侧均有对流单体发生发展,但该回波一直独立发展,在 14:00 进入阜宁境内最强回波超过 60 dBz,该强度一直维持到团状回波东移出海。

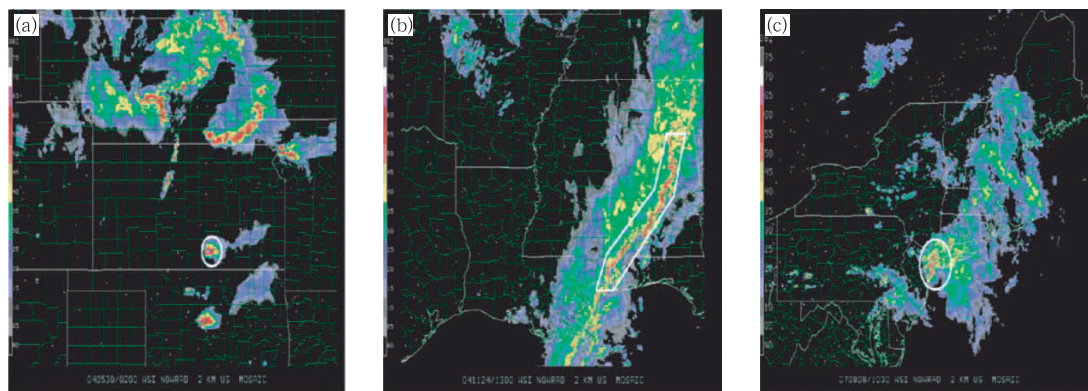


图 8 EF2 级以上龙卷的 3 种对流模态[引自 Grams 等(2012)]

(a) 离散单体, (b) 准线状对流, (c) 强对流

Fig. 8 Examples of EF2 tornadic convective modes derived from regional reflectivity mosaic images

[From Grams et al (2012)]

(a) discrete cell, (b) QLCS, (c) cluster

在我国通常不少 F2(EF2)级以上的龙卷具有超级单体风暴的雷达气象学特征(郑媛媛等,2004;2009;俞小鼎等,2006b;姚叶青等,2012)。超级单体风暴概念最初由 Browning(1964)提出。1978 年,Brown 等(1978)对超级单体风暴概念进行了修正,强调超级单体是具有深厚中气旋的对流单体。

在雷达回波图像上,经典超级单体经常在右后方(相对于风暴运动而言)低层出现钩状回波,最强的龙卷往往在钩状回波或有界弱回波区消失以后发生(俞小鼎,2006a)。根据龙卷在雷达图像上的结构特征,Wilson(1986)将龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷。超级单体龙卷通常在雷达上能观测到伴随

低层的中气旋(1 km 以下)出现而产生,有时还能从雷达径向速度图上识别出比中气旋更小、旋转更快的 TVS。此次产生龙卷的对流单体是否具有这样

的特征,可以利用距离阜宁 26 km 的盐城双多普勒雷达资料进行诊断分析。

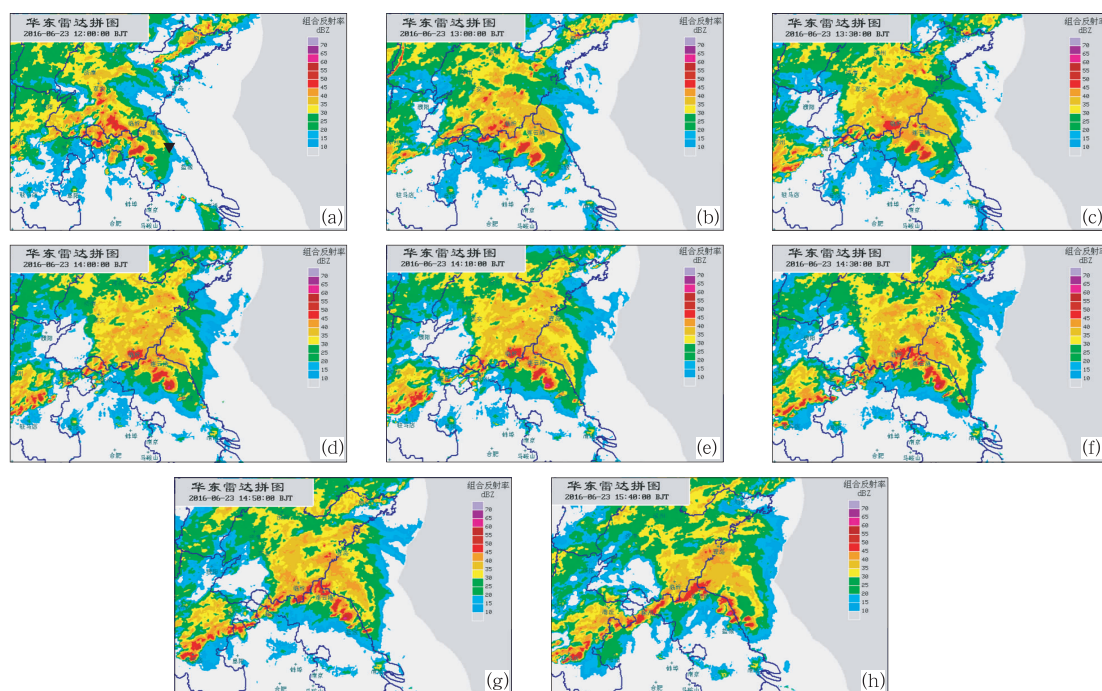


图 9 2016 年 6 月 23 日 12:00(a)、13:00(b)、13:30(c)、14:00(d)、14:10(e)、14:30(f)、14:50(g)、15:40(h)华东雷达组合反射率拼图
(图 a 中▼表示阜宁所在位置)

Fig. 9 Radar reflectivity mosaic images in East China at (a) 12:00 BT, (b) 13:00 BT, (c) 13:30 BT, (d) 14:00 BT, (e) 14:10 BT, (f) 14:30 BT, (g) 14:50 BT, (h) 15:40 BT 23 June 2016
(▼ represents the location where Funing County lies in Fig. a)

华东雷达组合反射率拼图(图 9)显示,在 14:00—15:00,块状对流单体在阜宁境内发展旺盛,14:29 在阜宁龙卷受灾路径北侧约 2 km 的新沟镇(图 1)观测到 $34.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风(图 3),说明此时正是对流单体发展旺盛阶段。为此,我们选取了 14:31 的雷达回波和径向速度资料进行分析,如图 10 所示。 0.5° 仰角回波图上有明显钩状回波,回波强度达 55 dBZ 以上。同仰角的速度图上可见,在钩状回波顶端的阜宁境内有明显的中气旋特征,旋转速度达 51 节(约为 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。根据俞小鼎等(2006a)的研究,可判定为强中气旋。在反射率因子垂直剖面图上(图 10b),回波悬垂和有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)均清晰可见,表明低层有很强的东南气流流入。回波三维结构图更清晰显示,超过 30 dBZ 的回波顶高超过 12 km,对

流风暴整体发展高度则可达 15 km。这些特征均符合经典超级单体结构特征,也符合 Lemon 等(1979)总结的龙卷超级单体风暴概念模型:龙卷发生在钩状回波顶端,后侧下沉气流与前侧上升气流交界面。

图 11 是利用雷达业务 PUP 产品提取的阜宁龙卷相关的中气旋特征演变图。可见,中气旋在 14:14 后迅速加强并持续到 14:36 之后;在这期间中气旋底高低于 1 km,几乎接近地面,表明中气旋触地的可能性较大;中气旋顶高则大部分时间保持在 6~8 km,但在 14:19—14:31 顶高也不断下降,14:25 降至最低。此外,14:14—14:54,盐城雷达上还探测到 TVS,并在 14:36 达到最强,与低层中气旋最强时间一致(图略)。

在美国,中气旋已经成为龙卷的重要预警指标。David-Jones 等(2001)指出,当监测到中气旋并伴随

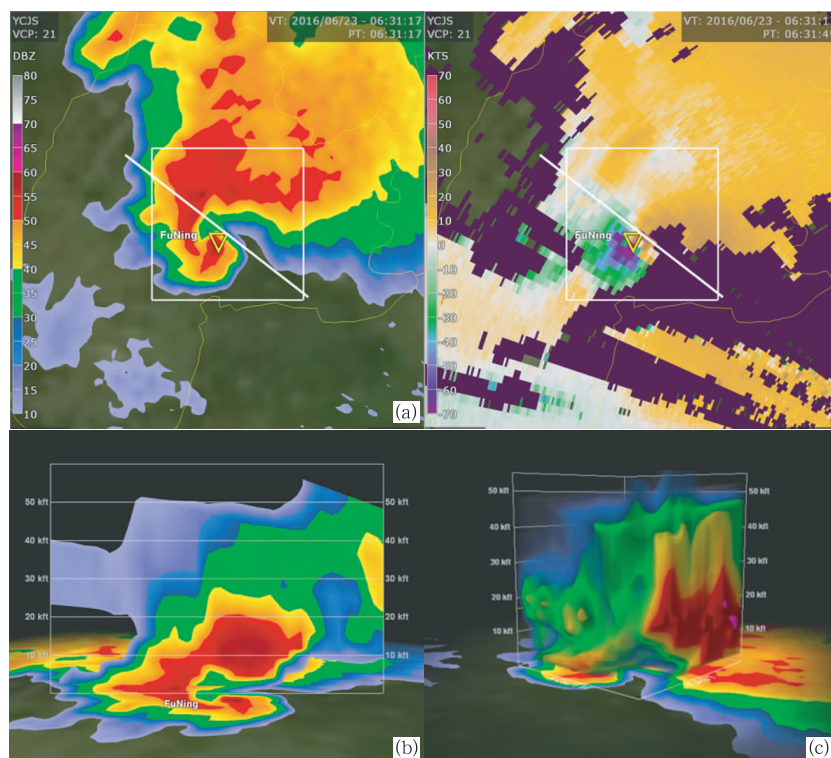


图 10 2016 年 6 月 23 日 14:31 盐城雷达(a)0.5°仰角反射率因子(单位: dBZ)与径向速度(单位: $\text{kts} \cdot \text{h}^{-1}$, $1 \text{ kts} \cdot \text{h}^{-1} \approx 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)回波沿图 a 中白色实线自东南向西北的剖面 and (c)图 a 白色方框范围内的三维结构(黄色三角形表示中气旋位置)

Fig. 10 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation (unit: dBZ) and radial velocity (unit: $\text{kts} \cdot \text{h}^{-1}$) of Yancheng Radar at 14:30 BT 23 June 2016, (b) reflectivity profile along the white solid line from southeast to northwest and (c) 3-D structure zoomed in the white box (Yellow triangle represents the mesocyclone)

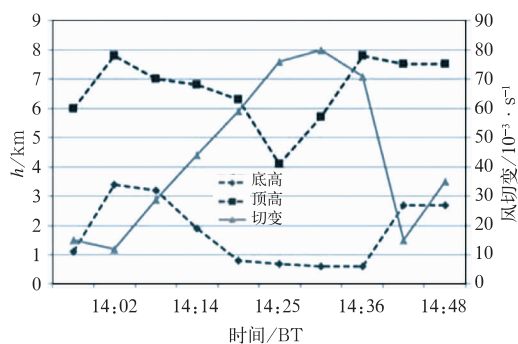


图 11 2016 年 6 月 23 日盐城雷达识别的中气旋特征时间演变图

Fig. 11 Temporal evolution of mesocyclones detected by the Yancheng Radar on 23 June 2016

有龙卷涡旋特征,则龙卷发生概率从 15% 上升到 50% 以上。在国内,大量的研究也表明,很多龙卷发

生时伴随有中气旋,且中气旋底高很低。吴芳芳等(2013)对苏北超级单体龙卷的统计发现,77% 的龙卷伴随中气旋最低底高低于 1 km。郑媛媛等(2009)对安徽 3 次 F2~F3 级龙卷的研究中也指出,龙卷发生前、发生时都探测到强中气旋和 TVS,导致强龙卷的中气旋底高基本在 1 km 以下,而非龙卷超级单体的底高明显更高,并提出了在我国江淮地区的可能龙卷预警指标:在天气条件有利于龙卷生成,如非常低的抬升凝结高度和非常大的 0~1 km 垂直风切变,当探测到强烈中气旋,或者在龙卷多发地区探测到中等强度的中层中气旋可以发布龙卷警报。姚叶青等(2012)在对安徽 6 次龙卷雷达特征分析时也指出,在近距离(距离雷达 20~100 km)探测到低仰角中气旋并识别出 TVS 对龙卷临近预警很有意义。结合本次阜宁 EF4 级龙卷的分析表

明:发展利用双多普勒雷达径向速度资料的中气旋监测技术,可以在我国龙卷高发的江苏和安徽等地适时开展龙卷预警业务试验。

4 结 论

本文对 2016 年 6 月 23 日江苏省盐城市阜宁县罕见的 EF4 级龙卷发生的天气背景和中尺度特征进行了初步分析,所得结论如下:

(1) 阜宁龙卷发生在梅雨期有利于暴雨发生的天气背景下,高低空急流耦合、地面暖锋南侧高温、高湿的不稳定气层是此次龙卷发生的有利环境条件。

(2) 射阳探空分析表明,与美国强龙卷(EF2 级以上)的發生的气候概率条件和我国已有的江淮地区 EF2~EF3 级强龙卷个例研究结果相比,本次阜宁龙卷发生期间阜宁及周边地区有利于龙卷发生的环境条件表现为中等偏强的热力条件和低层垂直风切变条件,但具有强的深层垂直风切变和低的抬升凝结高度。

(3) 阜宁龙卷具有美国强龙卷发生相似的结构特征,即组合反射率图像上表现为椭圆状离散单体,但雷达回波图像和速度图像上表现为经典超级单体龙卷结构特征,龙卷位于钩状回波顶端上升气流与下沉气流交界处,主要发生在中气旋底高低于 1 km 并伴随有 TVS 期间。

龙卷在我国属于小概率的极端强对流事件,EF4 级龙卷更是极为罕见。本文有关 EF4 级龙卷的天气学和雷达特征虽然与国外的一些强龙卷事件进行了比较,但缺少国内相关个例的验证,研究所得结论有待与国内其他强龙卷事件(如 EF3 级以上龙卷个例)验证。此外,研究仅对此次强龙卷事件的特征进行了初步分析,而 EF4 级龙卷发生发展的机理还有待深入研究。

致 谢:感谢南京大学赵坤教授、中国气象局干部培训学院俞小鼎教授、国家气象中心张涛、盛杰、张小雯、曹艳察、林隐静提供的支持和帮助。感谢郑媛媛女士提供图 11。

参考文献

- 范雯杰,俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 41(7): 793-805.
- 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒

- 雷达典型特征. 气象, 35(10): 32-39.
- 王秀明,俞小鼎,周小刚. 2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析. 气象学报, 73(3): 425-441.
- 魏文秀,赵亚民. 1995. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 21(5): 37-40.
- 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. 气象, 38(11): 1330-1338.
- 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. 气象学报, 71(2): 209-227.
- 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. 高原气象, 31(6): 1721-1730.
- 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. 热带气象学报, 23(5): 483-490.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等. 2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社.
- 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. 高原气象, 25(5): 914-924.
- 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. 大气科学, 32(3): 508-522.
- 张一平,俞小鼎,吴蓁,等. 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. 气象学报, 70(5): 961-973.
- 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. 气象, 42(11): 1289-1303.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 62(3): 317-328.
- 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. 高原气象, 28(3): 617-625.
- 周后福,施丹平,刁秀广,等. 2014. 2013 年 7 月 7 日苏皖龙卷环境场与雷达特征分析. 干旱气象, 32(3): 415-423.
- Arsen'yev S A. 2011. Mathematical modeling of tornadoes and squall line storms. Geosci Front, 2(2): 215-221.
- Brooks H E, Doswell C A, Cooper J. 1994. On the environments of tornadic and nontornadic mesocyclones. Wea Forecasting, 9(4): 606-618.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global re-analysis data. Atmos Res, 67/68: 73-94.
- Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories with in severe local storms which travel to the right of the winds. J Atmos Sci, 21(6): 634-639.
- Brown K A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar. Mon Wea Rev, 106(1): 29-38.
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. Natl Wea Dig, 28: 13-24.
- David-Jounes R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms // Severe Convective Storms. Meteor Monogr, (50): 167-221.
- Doswell C A, Carbin G W, Brooks H E. 2012. The tornadoes of spring 2011 in the USA: An historical perspective. Wea Forecas-

- ting, 67(4):88-94.
- Duda J D, Gallus Jr W A. 2010. Spring and summer Midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies. *Wea Forecasting*, 25(1):190-206.
- Evans J S, Doswell C A. 2002. Investigating Derecho and Supercell proximity soundings. Preprints, 21st Conf Severe Local Storm. San Antonio TX, USA, American Meteorological Society, 635-638.
- Gaffin D M, Parker S S. 2006. A climatology of synoptic conditions associated with significant tornadoes across the southern Appalachian region. *Wea Forecasting*, 21(4):735-751.
- Gallus Jr 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. *Wea Forecasting*, 23(1):101-113.
- Giordano L A, Fritsch J M. 1991. Strong tornadoes and flash-flood-producing rainstorms during the warm season in the mid-Atlantic region. *Wea Forecasting*, 6(4):437-455.
- Grams J G, Thompson R L, Snively V, et al. 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. *Wea Forecasting*, 27(1):106-123.
- Johns R H. 1982. A synoptic climatology of northwest flow severe weather outbreaks. Part I: Nature and significance. *Mon Wea Rev*, 110(11):1653-1663.
- Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 7(4):588-612.
- Johns R H, Dorr Jr R A. 1996. Some meteorological aspects of strong and violent tornado episodes in New England and eastern New York. *Natl Wea Dig*, 20(4):2-12.
- Lemon L R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 107(9):1184-1197.
- Markowski P M, Richardson Y. 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. New York: Wiley-Blackwell.
- Philip N S, Joshua M B. 2011. Mesocyclone evolution associated with varying shear profiles during the 24 June 2003 Tornado Outbreak. *Wea Forecasting*, 26(6):808-827.
- Rasmussen E N. 2003. Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea Forecasting*, 18(3):530-535.
- Rasmussen E N, Blanchard D O. 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea Forecasting*, 13(4):1148-1164.
- Rasmussen E N, Richardson S, Straka J M, et al. 2000. The association of significant tornadoes with a baroclinic boundary on 2 June 1995. *Mon Wea Rev*, 128(1):174-191.
- Rose S F, Hobbs P V, Locatelli J D and Stoelinga M T. 2004. A 10-yr climatology relating the locations of reported tornadoes to the quadrants of upper-level jet streaks. *Wea Forecasting*, 19(2):301-309.
- Schumacher S S, Lindsey D T, Schumacher A B, et al. 2010. Multidisciplinary analysis of an unusual tornado: Meteorology, climatology, and the communication and interpretation of warnings. *Wea Forecasting*, 25(5):1412-1428.
- Trapp R J, Tessendorf S A, Godfrey E S, et al. 2005. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: Climatological distribution. *Wea Forecasting*, 20(1):23-34.
- Wilson J W. 1986. Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines. *Mon Wea Rev*, 114(2):270-284.
- Zheng Feng, Chen Lian-shou, Zhong Jian-feng. 2011. Analysis of a tornado-like severe storm in the outer region of the 2007 super typhoon Sepat. *J Trop Meteorol*, 17(2):175-180.