

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. 气象, 41(8):942-952.

# 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析<sup>\* 1</sup>

郑媛媛<sup>1,2</sup> 张 备<sup>1,2</sup> 王啸华<sup>3</sup> 孙康远<sup>1,2</sup> 慕瑞琪<sup>4</sup> 夏文梅<sup>1,2</sup>

1 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210008

2 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

3 江苏省气象台, 南京 210008

4 徐州市气象局, 徐州 221002

**提 要:** 利用 NCEP 再分析资料、常规观测和地面加密观测资料及多普勒雷达资料, 对 10 次台风龙卷过程的环境背景和其中 F2~F3 级以上龙卷过程的回波结构演变特征进行了详细分析, 主要结果如下: (1) 台风龙卷所处环境基本为弱对流有效位能(200~1000 J·kg<sup>-1</sup>) 和风随高度强烈顺转的强低空风的垂直切变环境, 0~1 km 风的垂直切变超过 10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 风暴的相对螺旋度很大, 台前龙卷环境的粗理查孙数很小, 平均在 40 以下。台风龙卷大多数出现在台风前进方向的东北侧, 位于 0~1 km 风切变和相对风暴螺旋度大值区。龙卷主要产生于台风外围螺旋雨带上, 台前龙卷往往产生前地面已存在风向切变和风速的辐合, 但温度梯度不大。(2) 在台风影响环境下导致龙卷的风暴属于微超级单体风暴, 有水平尺度 2~4 km 的中气旋; 垂直涡度限制在 4 km 以下; 风暴单体的质心在 2 km 左右, 风暴伸展高度在 5~7 km。

**关键词:** 台风龙卷, 天气背景, 雷达回波特征

**中图分类号:** P445, P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.003

## Analysis of Typhoon-Tornado Weather Background and Radar Echo Structure

ZHENG Yuanyuan<sup>1,2</sup> ZHANG Bei<sup>1,2</sup> WANG Xiaohua<sup>3</sup> SUN Kangyuan<sup>1,2</sup>  
MU Ruiqi<sup>4</sup> XIA Wenmei<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008

2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorology Observatory, Nanjing 210008

4 Xuzhou Meteorology Observatory of Jiangsu, Xuzhou 221002

**Abstract:** Based on NCEP reanalysis data, conventional observations data, surface dense observation data and Doppler radar data, the environmental background of 10 tornadoes which occurred within spiral rain belt of typhoon and the evolution characteristics of echo structure of the tornadoes in F2 class and above were studied in detail. The results show that, firstly typhoon-tornadoes occur in an environment with the weak convective available potential energy (200—1000 J·kg<sup>-1</sup>) and strong low-level vertical wind shear where the vertical wind shear between 0 and 1 km more than 10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. The storm relative helicity is very great and the typhoon tornado environment average bulk Richardson number is small, averagely below 40. Typhoon-tornadoes mostly occur on the right sides of the moving-paths of the typhoons where the 0—1 km vertical wind shear and storm relative helicity are greater. Typhoon-tornadoes are mainly generated in the

\* 国家自然科学基金项目(41475042 和 41175043)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306008 和 GYHY201506006)、江苏省气象科研重点项目(KZ201407)、江苏省科技支撑计划-社会发展项目(BE2013730 和 BE2015731)、北极阁基金(BJG201302)及中国强对流预报专家团队共同资助

2015 年 3 月 9 日收稿; 2015 年 4 月 28 日收修定稿

第一作者: 郑媛媛, 主要从事雷达气象和天气预报研究. Email: zhengyy63@sina.com

spiral rainbands in the outside-region of the typhoons. Before tornadoes come into being the convergence of wind direction and speed appears near the surface, but the temperature gradient is small. Secondly, the storms which produce typhoon-tornadoes are mini supercell storms, with cell centroid being about 2 km and stretching height about 5—7 km, accompanying the mesocyclones in horizontal scales about 2—4 km. The positive vertical vorticity is limited to below 4 km.

**Key words:** typhoon-tornado, weather background, radar echo characteristics

## 引 言

龙卷是最猛烈的大气对流现象,可造成严重人员伤亡和损失,强烈的龙卷大多由超级单体产生,多普勒雷达是探测和预警龙卷的最有力工具,Donaldson(1970)首次利用多普勒雷达探测到超级单体风暴中的龙卷涡旋,最早由 Fujita(1963)提出,现在广泛使用的所谓中气旋,中气旋在速度图上为一沿方位角方向相隔不远的正负速度对,其尺度通常 < 10 km。Brown 等(1978)利用美国 Oklahoma 州 Norman 城的国家强风暴实验室的多普勒天气雷达资料,发现了一个可能伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的多普勒雷达速度场涡旋特征,它们被称为龙卷涡旋式特征(TVS),TVS 表现为径向速度图上沿方位角方向两个紧挨着的像素之间的强烈速度切变,其尺度通常在 2 km 以下。

部分龙卷的产生与飓风或台风有关,日本 1961—1982 年间大约有 40% 的登陆台风产生龙卷(Mitsuta,1983),而在美国 1948—1986 年大约 59% 的飓风产生龙卷(McCaul,1991)。在热带气旋造成

龙卷方面许多研究者已经开展了相关研究(Fujita, 1981;Novlan et al,1974;Gentry,1983),这些研究揭示了龙卷通常出现在飓风或台风(Novlan et al, 1974;Gentry,1983)的东北象限,并且热带气旋这一区域低层强的风垂直切变是产生龙卷的重要因素。在我国东部沿海地区受台风影响产生龙卷的情况很多,以江苏为例,平均 2 年一次,占出现龙卷总数的 20% 左右。在新一代天气雷达布网之前,沈树勤(1990)分析了江苏台前龙卷出现的环境条件,由于当时条件限制,对于造成台风龙卷的超级单体没有进行分析。在新一代天气雷达开始布网之后,对西风带系统龙卷的研究逐渐增多(俞小鼎等,2006; 2008;郑媛媛等,2009;吴芳芳等,2012;张晰莹等,2013;周后福等,2014;朱江山等,2015;李改琴等,2014),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,但并没有对台风龙卷开展系统的分析和研究。本文利用 NCEP 资料、常规探测资料、加密自动站资料和多普勒雷达资料,对发生在我国东部沿海地区的 10 次台风龙卷过程(见表 1)影响系统和热动力条件进行了分析。根据房屋倒塌和损坏情况

表 1 10 次龙卷过程等级及灾情

Table 1 Grade and induced disaster situation of 10 tornadoes

序号	时间	地点	台风名称编号	级别	灾情
01	2005 年 9 月 27 日凌晨	海南临高县	达维 0518	F2	6 人死亡,倒房 206 间
02	2005 年 9 月 2 日	江苏如东	泰利 0513	F2	3 人死亡,重伤 16 人
03	2006 年 8 月 4 日	佛山高要、三水、南海、清远	派比安 0606	F3	9 人死亡,172 人受伤,直接经济损失达到 1 亿元
04	2006 年 9 月 30 日夜	海南万宁	象神 0616	F1	1 人死亡,12 人受伤,倒损房屋 70 多间
05	2007 年 8 月 18 日夜	浙江苍南	圣帕 0709	F3	11 人遇难,另有 60 余人受伤,其中 6 人重伤
06	2007 年 10 月 7 日	江苏苏州高新区	罗莎 0716	F1	3 人受伤,20 间房屋受损
07	2008 年 7 月 30 日	江苏高邮、宝应	凤凰 0808	F2	4 人死亡,52 人受伤,其中 8 人受伤
08	2008 年 8 月 6 日下午	广东雷州半岛遂溪县	北冕 0809	F1	131 间房屋受损
09	2009 年 8 月 6 日	广东湛江	天鹅 0907	F1	7 人轻伤,损害房屋 200 多间
10	2014 年 7 月 24 日	江苏南京六合区	麦德姆 1410	F0	上百间房屋受损

及目击和录像,按照 Fujita(1981)提出的龙卷分级标准,我们重点利用离龙卷母体超级单体风暴最近的广州、温州、南通、盐城 CINRAD-SA,分别对 2006 年 8 月 4 日、2007 年 8 月 18 日、2005 年 9 月 2 日、2008 年 7 月 30 日四次 F2~F3 级龙卷过程的多普勒雷达回波特征进行深入分析。

## 1 大尺度环流背景

据统计,江苏热带气旋螺旋雨带上的龙卷一般出现在台风开始登陆迅速减弱阶段(沈树勤,1990)。大多数龙卷出现在台风的东北象限或者相对台风移动方向的右侧,这一事实与以前的统计结果(McCaul,1991)一致。台风龙卷灾害主要以强风为主,并伴有短时强降水和雷电天气。文中分析的 10 次台风龙卷过程主要为台风登陆减弱后和台风靠近陆地时在我国陆地上形成的龙卷。其中 2006 年 8 月 4 日受登陆减弱的台风派比安外围影响引发系列龙卷,分别袭击佛山、高要金渡镇、三水白坭镇、清远石角镇、南海大沥镇等地,造成 9 人死亡,100 多人受伤,仅佛山三水区直接经济损失达一亿多元。0606 号台风派比安于 2006 年 8 月 3 日 19:20 在电白至阳西之间沿海地区登陆后,向西北偏西方向移动,龙卷是在台风派比安登陆 5 小时后出现,此时台风已减弱为热带风暴并移至广西东南部地区,龙卷发生在热带风暴前进方向的右后方。4 日 08 时 500 hPa 副热带高压有所加强西伸,位置偏东,脊线偏北。副热带高压西南缘的东南急流与台风派比安外围东南侧强劲的偏南风在广东的中北部上空汇合,低层 925、850 hPa 大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  强劲的南风与东南风在珠江三角洲汇合,200 hPa 存在明显的分流区即高空辐散区(图略)。从 4 日 14 时地面图可以看到清远与三水站之间有一弱东西向切变(图略)。近地面层辐合和强的低层风垂直切变是产生龙卷风的有利天气背景。

受 0709 号强台风圣帕靠近大陆影响,2007 年 8 月 18 日在温州苍南发生了 F3 级龙卷,造成 11 人死亡,60 余人受伤。台风圣帕形成以来,中心风力曾于 15 日 20 时达到 16 级,形成超强台风,18 日 17 时减弱为台风,18 日 23:30 台风圣帕紧靠福建沿岸时,在其移动方向的右前侧约 300 km 的温州市苍南县龙港镇出现强龙卷风,从 18 日 20 时探空可见,温州地区中低层受台风外围东南急流影响,龙卷产

生在地面准东西向弱的切变线附近。

综合分析 10 次台风龙卷过程环流形势,除两个出现在台风西侧龙卷个例,得到初步概念模型(图 1),中低层都存在偏东风急流,风随高度顺转,低层有辐合线,高层 200 hPa 存在明显的分流区即高空辐散区,龙卷发生在低层辐合与高层辐散和 500 hPa 急流交汇处附近。

## 2 有利于台风龙卷产生的环境热动力条件

### 2.1 垂直结构

为了更好地认识有利于台前龙卷产生的大气环境条件和物理机制,分别利用探空和 NECP 资料共计算了 10 次台前龙卷过程环境的大气对流有效位能、对流抑制能量、相对风暴螺旋度、粗里查孙数、0~1 km 风的垂直切变、0~3 km 风的垂直切变。采用物理量合成分析方法:将龙卷发生前最靠近时次物理量格点场资料,以该时刻台风位置为中心,计算 10 次台前龙卷过程物理量平均值。图 2 是 10 次龙卷过程以台风为中心靠近龙卷发生时刻前的物理量平均场,由图 2a 可见,台前龙卷在其龙卷产生前大气对流有效位能平均在  $200 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,明显小于梅雨期槽前型龙卷大气对流有效位能  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,主要原因是由于台前龙卷基本不属于深对流,而且在龙卷产生前多已经产生降水,不稳定能量已部分得到释放,而西风带系统超级单体龙卷往往在产生龙卷前为晴空少云,不稳定能量没有得到释放,台前龙卷的对流抑制能量很小(图 2b),其直接原因是近地面湿度大,抬升凝结高度和自由对流高度都很低。从对流抑制能量的定义可以看到:对流抑制能量等于平均大气边界层气块通过稳定层到达自由对流高度所做的负功,对流抑制能量低,说明低层大气稳定层很薄,低层大气不稳定度大。

强的 0~1 km 风的垂直切变是造成龙卷的主要动力条件(Weisman et al,1982; McCaul,1991),从计算结果看(图 2c),台前龙卷的环境 0~1 km 风的垂直切变都很大,基本都超过  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。从靠近龙卷发生地探空垂直风廓线可以看出(图 3),入流空气主要来自于对流层低层几千米范围内。相对风暴螺旋度可以用来估算风的垂直切变环境中风暴运动所产生的旋转潜势,也就是说,在风暴入流层沿流

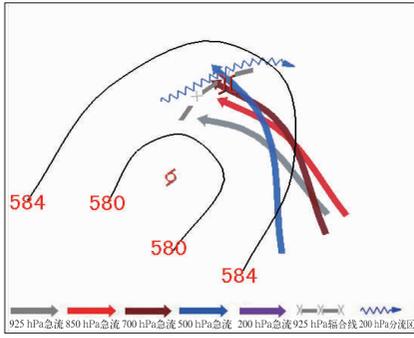


图 1 台风外围龙卷高空形势综合图

Fig. 1 Composite analysis on the upper-level circulation of typhoon-tornado

线方向的涡度可以进入并与上升气流核作用,在风暴的深层产生强大而持久的旋转。而有利于产生龙卷的大尺度环境条件往往有很强的 0~1 km 风的垂直切变,龙卷发生前相对风暴螺旋度都比较大(图 2d)。

大量的分析研究表明,强对流天气可以发生在弱的风垂直切变与强的静力不稳定环境或相反的环境中,即风的垂直切变和静力不稳定两者之间存在某种平衡关系,由于台风龙卷的对流有效位能相对偏小,而风的垂直切变比较大,所以台风龙卷的粗里查孙数(图略)偏小,基本在 40 以下。

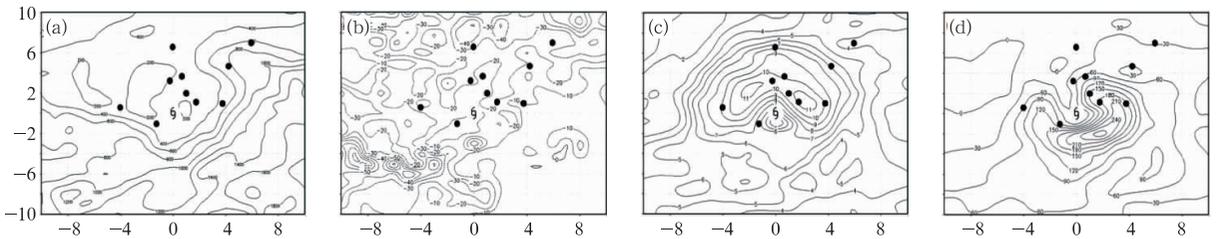


图 2 10 次台风龙卷过程物理量合成图

(a) 对流有效位能(单位: $J \cdot kg^{-1}$ ), (b) 对流抑制能量(单位: $J \cdot kg^{-1}$ ),  
 (c) 0~1 km 风垂直切变(单位: $10^{-2} s^{-1}$ ), (d) 相对风暴螺旋度(单位: $m^2 \cdot s^{-2}$ )  
 (横坐标为距离台风经度,纵坐标为距离台风纬度,☉为台风位置,黑色实心圆为龙卷位置)

Fig. 2 10 composite physical indices of typhoon-tornado

(a) CAPE (unit:  $J \cdot kg^{-1}$ ), (b) CIN (unit:  $J \cdot kg^{-1}$ ), (c) 0-1 km wind shear (unit:  $10^{-2} s^{-1}$ ),  
 (d) storm relative helicity (unit:  $m^2 \cdot s^{-2}$ )

(X-axis is the typhoon center distance longitude, Y-axis is the typhoon center distance latitude,  
 ☉ is typhoon center, and solid black circle is the tornado position)

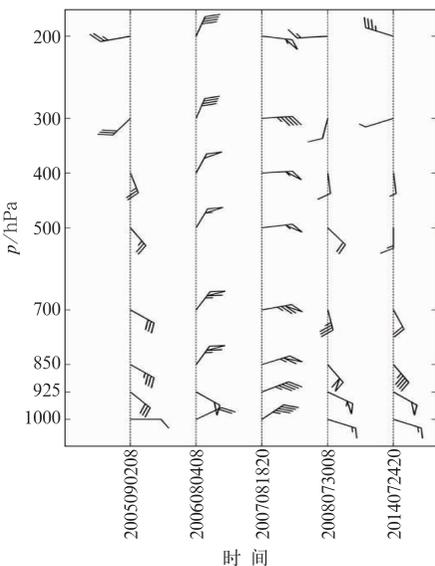


图 3 5 次台风龙卷过程探空风垂直廓线

Fig. 3 Wind profile of 5 typhoon-tornado processes

由图 2 可见,台风龙卷主要出现在台风前进方向的东北侧,位于 0~1 km 风的垂直切变大值区与相对风暴螺旋度梯度大值区重合的区域。McCaul (1991)认为螺旋度增加是导致与飓风有关的龙卷在飓风右前象限出现的原因,而螺旋度增加的原因是飓风旋转气流与大致平行于飓风的具有切变的气流(风随高度变化)间的相互作用。

### 2.2 产生龙卷的环境地面中尺度特征

在大尺度环境背景有利的情况下,龙卷产生往往和地面中尺度辐合密切相关,由于资料限制,仅分析了发生在江苏的台前龙卷,发现在龙卷产生前地面图上可以分析出地面辐合线,但没有明显温度梯度存在,基本上以单一暖湿气团为主;在西风带系统背景下产生龙卷的地面图上,可以分析出明显的气旋性辐合,并存在明显的温度梯度。龙卷出现在辐

合线或气旋性辐合区中。图 4a、4b 分别为台风龙卷和西风带龙卷发生前最接近时刻地面风场、温度场

及雷达反射率因子分布图(图 4a、4b 中黑色星划线为地面辐合线)。

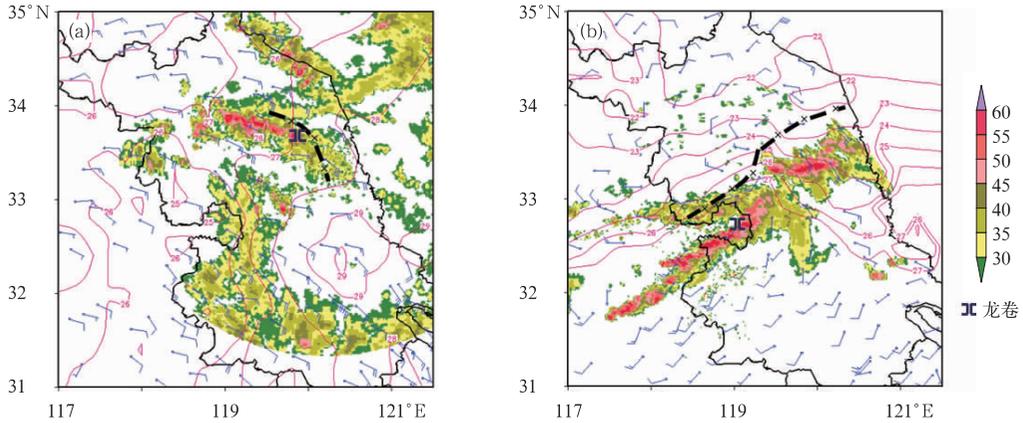


图 4 地面风场、温度场和 0.5°反射率因子叠加图(黑色星划线为地面辐合线)

(a) 2008年7月30日15时, (b) 2007年7月3日16时

Fig. 4 Surface wind and temperature field and 0.5° radar echo reflectivity

(a) 15:00 BT 30 July 2008, (b) 16:00 BT 3 July 2007

### 3 龙卷风暴的雷达回波特征

#### 3.1 台前龙卷风暴雷达回波特征

由于造成台风龙卷的超级单体风暴属于微超级单体风暴,其水平尺度和伸展高度都很低,通常距离多普勒雷达超过 110 km 就很难有效探测到(Burgess et al,1995),故选择了离超级单体风暴最近的盐城、广州、南通、温州 CINRAD-SA,分别对 2005 年 9 月 2 日、2006 年 8 月 4 日、2007 年 8 月 18 日、2008 年 7 月 30 日 F2~F3 级龙卷过程的多普勒雷达回波特征进行深入分析。

分析表明,台风龙卷母体风暴属于微超级单体风暴,基本都产生在螺旋雨带上(图略),回波反射率因子强度一般在 50~60 dBz,没有明显的钩状回波特征,但有时具有 WERS(Weak echo areas)和 BWERS(Bounded weak echo areas)特征。从垂直剖面图上(图 5)可见微超级单体风暴垂直伸展高度基本在 10 km 以下,50 dBz 以上回波高度主要在 6 km 以下。

2005 年 9 月 2 日受 0513 台风泰利倒槽和北方南下冷空气影响,南通市如东县多地出现强降水,14:59 台前龙卷母体超级单体风暴初生(图略),SRM

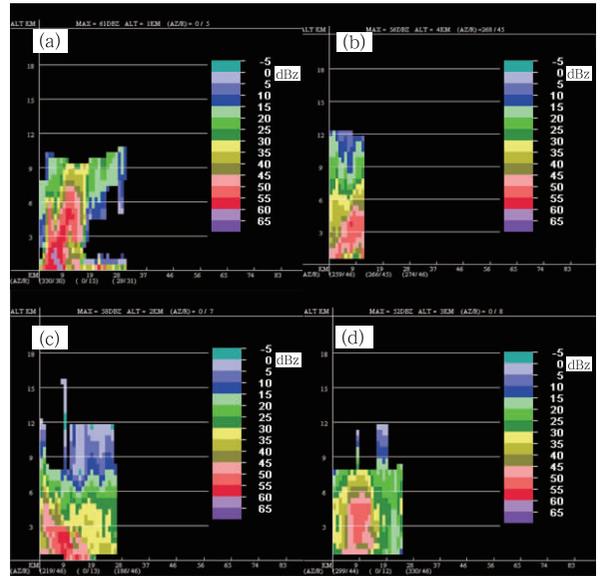


图 5 雷达反射率因子垂直剖面图

(a) 2005年9月2日15:11, (b) 2006年8月4日10:47, (c) 2007年8月18日23:13, (d) 2008年7月30日14:56

Fig. 5 Base reflectivity cross section

(a) 15:11 BT 2 September 2005, (b) 10:47 BT 4 August 2006, (c) 23:13 BT 18 August 2007, (d) 14:56 BT 30 July 2008

(风暴相对径向速度图)产品(图略)上可以清楚看到龙卷涡旋特征(TVS),该 TVS 距离南通雷达只有

27 km,最大转动速度出现在 2.4°仰角(1.2 km),垂直涡度值达到  $7.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,伸展高度 2.6 km。15:05 在其北侧回波与龙卷母体超级单体回波合并,回波强度明显加强,出现明显前侧入流缺口 FIN(front inflow)和后侧入流缺口 RIN(rear inflow)(图 6a),TVS 继续加强,垂直涡度值达到  $9.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1.2 km),15:11 龙卷发生时,50 dBz 以上强回波高度明显降低(图 6b),还出现较明显的有界弱回波区,TVS 最强切变高度降低到 0.3 km,对应的垂直涡度为  $9.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (图 6c)。

2006 年 8 月 4 日受台风派比安外围影响在佛

山、高要金渡镇、三水白坭镇、清远石角镇、南海大沥镇等地受到 F3 级强龙卷袭击,08:00—10:00 广东大部分地区被台风外围降水雨带覆盖,10:29 有一条接近南北走向螺旋雨带发展,10:41 螺旋雨带上回波明显发展加强,反射率因子超过 50 dBz,同时在径向速度图上探测到 TVS(距离广州雷达站 47 km),垂直涡度为  $5.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,高度在 1.3 km,10:47 反射率因子达到 58 dBz,在 0.5°反射率因子图上可以看到明显的前侧入流缺口(FIN)(图 7a),SRM 图上(图 7b),可以看到强中气旋和 TVS,TVS 最大切变高度明显降低到 0.5 km,垂直涡度为  $4.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,

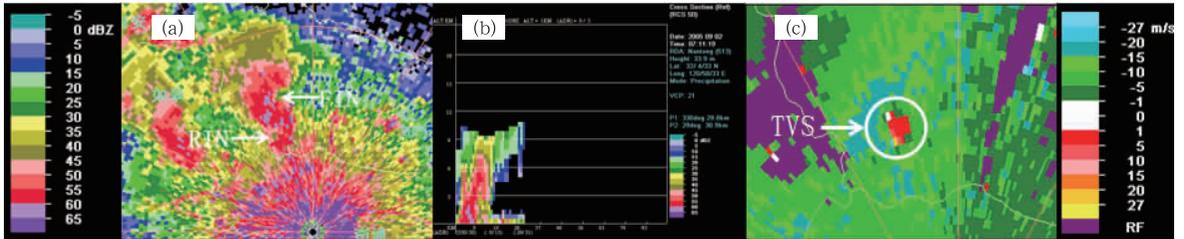


图 6 2005 年 9 月 2 日南通 SA 雷达  
 (a) 15:05 0.5°反射率因子, (b) 15:11 反射率因子垂直剖面, (c) 15:11 0.5° SRM  
 Fig. 6 Nantong SA radar data on 2 September 2005  
 (a) 0.5° reflectivity at 15:05 BT, (b) base reflectivity cross section at 15:11 BT,  
 (c) 0.5° SRM at 15:11 BT

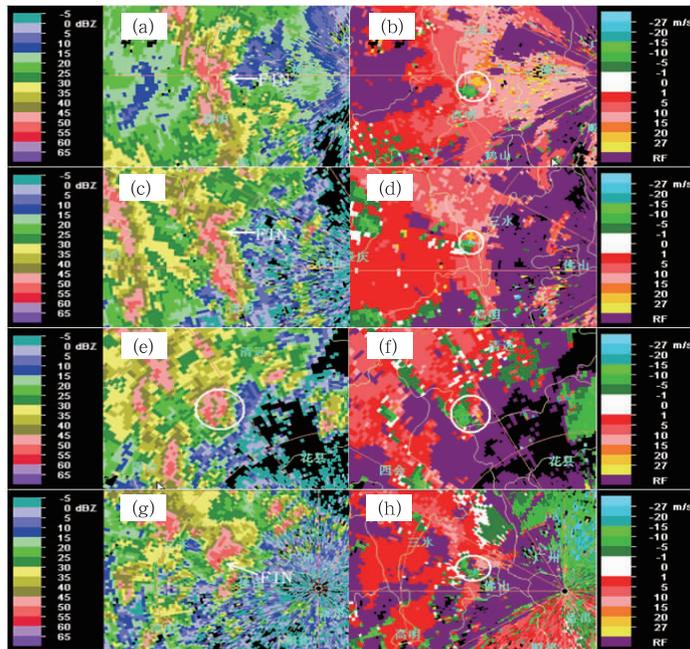


图 7 2006 年 8 月 4 日广州 SA 雷达 0.5°  
 (a) 10:47 R, (b) 10:47 SRM, (c) 13:10 R, (d) 13:10 SRM, (e) 14:10 R,  
 (f) 14:10 SRM, (g) 15:15 R, (h) 15:15 SRM  
 (白色圆圈内为中气旋位置)

Fig. 7 Guangzhou SA radar data on 4 August 2006  
 (a) 0.5° reflectivity at 10:47 BT, (b) 0.5° SRM at 10:47 BT, (c) 0.5° reflectivity at 13:10 BT,  
 (d) 0.5° SRM at 13:10 BT, (e) 0.5° reflectivity at 14:10 BT, (f) 0.5° SRM at 14:10 BT,  
 (g) 0.5° reflectivity at 15:15 BT, (h) 0.5° SRM at 15:15 BT  
 (White circle is for mesocyclone position)

随后在佛山造成龙卷并恰被电视台记者拍摄到整个龙卷肆虐过程,从 TVS 出现到龙卷发生只有两个体扫。12:40—12:58 在径向速度图上再次探测到 TVS 发展,13:04 开始 TVS 明显向低层发展,13:10 0.5°反射率因子图上可以看到明显的入流缺口(图 7c),对应的 TVS 垂直涡度值为  $5.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,高度在 0.7 km(图 7d),在佛山白坭镇再次产生龙卷。13:58 在靠近清远附近有微超级单体风暴发展,探测到低层中气旋,14:10 微超级单体风暴移入清境内,并探测到 TVS,垂直涡度值为  $3.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,对应高度在 0.9 km,10 分钟后在清远城区石角镇出现龙卷。15:15 在佛山境内再次有微超级单体风暴发展,在反射率因子图上可以看到明显的低层入流缺口(图 7g),该缺口对应中气旋正速度极值区,最强转动速度在 0.5°仰角(图 7h),垂直涡度值为  $1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (距离地面 0.8 km),15:21 微超级单体风暴迅速发展出现 TVS,对应的垂直涡度为  $6.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,在佛山大沥镇再次出现龙卷。2006 年 8 月 4 日四次龙卷过程有一个共同特点,在龙卷

发生前都探测 TVS,低仰角反射率因子图上都有入流缺口。

2007 年 8 月 18 日受 0709 号强台风圣帕影响,在浙江上空有大范围台风外围降水回波,23:01 在温州多普勒雷达上探测到中尺度气旋(距离雷达 59 km),该中气旋镶嵌在螺旋雨带上,反射率因子为 57 dBz,中气旋最强切变出现在 0.5°仰角,垂直涡度为  $1.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,中气旋底高为 0.8 km,顶高 2.8 km,直径在 3.4 km,是典型的微超级单体风暴,随后中气旋继续镶嵌在台风螺旋雨带上向西北方向移动,在 23:26(图 8),中尺度气旋向下伸展,高度进一步降低,中气旋底高到达 0.5 km,垂直涡度值为  $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,该微超级单体风暴在温州苍南造成 F3 级龙卷。

2008 年 7 月 30 日受 0808 台风凤凰外围螺旋雨带影响,14:56 在盐城多普勒雷达上探测到在南通附近有中尺度气旋发展(距离雷达站 39 km),最强切变在 2.4°仰角(距离地面 1.1 km),垂直涡度值为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,中气旋顶高只有 1.8 km,50 dBz 以上强回波主要在 6 km 以下,15:02(图 9)可见微

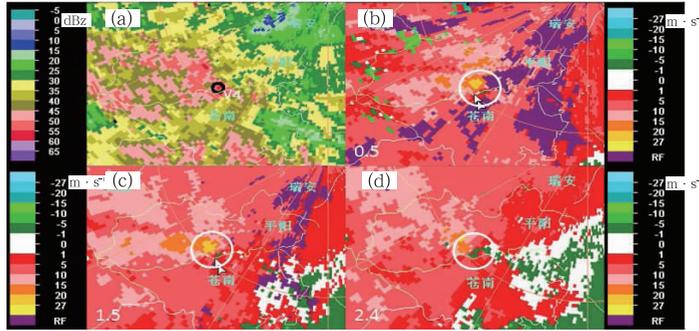


图 8 2007 年 8 月 18 日 23:26 温州 SA 雷达  
(a) 0.5° R, (b) 0.5° SRM, (c) 1.5° SRM, (d) 2.4° SRM  
(白色圆圈为中气旋位置)

Fig. 8 Wenzhou SA radar data at 23:26 BT 18 August 2007  
(a) 0.5° reflectivity, (b) 0.5° SRM, (c) 1.5° SRM, (d) 2.4° SRM  
(White circle is for mesocyclone position)

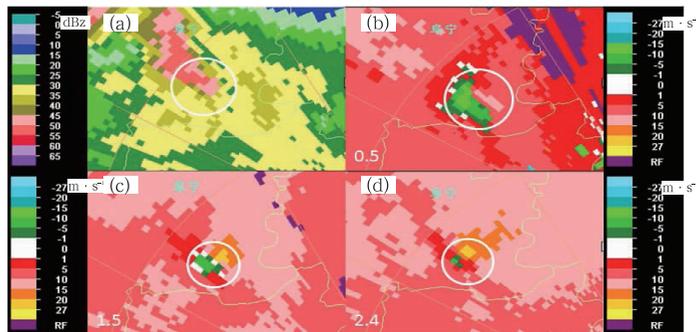


图 9 2008 年 7 月 30 日 15:02 盐城 SA 雷达  
(a) 0.5°R, (b) 0.5° SRM, (c) 1.5° SRM, (d) 2.4° SRM  
(白色圆圈为中气旋位置)

Fig. 9 Yanchen SA radar data at 15:02 BT 30 July 2008  
(a) 0.5° reflectivity, (b) 0.5° SRM, (c) 1.5° SRM, (d) 2.4° SRM  
(White circle is for mesocyclone position)

超级单体风暴回波强度在 50 dBz, 有弱 BWER, 中气旋进一步发展并上下伸展, 垂直伸展高度到 2.0 km, 1.5° 仰角转动速度增大, 垂直涡度值为  $1.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 中气旋直径进一步减小, 由 3.4 km 缩小到 3.0 km, 其后在江苏高邮产生龙卷, 造成 4 人死亡, 58 人受伤。据龙卷灾后现场调查显示, 龙卷影响直径只有 50 m, 由于龙卷母体中尺度气旋水平尺度小, 垂直伸展高度太低, 导致中尺度气旋算法只能探测到两个时次达到中气旋标准, 该次龙卷过程没有识别出 TVS。其后在 16:00 左右在扬州宝应出现龙卷, 16:03 在附近探测到龙卷涡旋特征(图略)。

### 3.2 台前龙卷和西风带龙卷中气旋差异分析

图 10 分别是 2006 年 8 月 4 日 13:10(台风影响)和 2007 年 7 月 3 日 16:48(西风带影响)龙卷超级单体风暴反射率因子垂直剖面、径向速度垂直剖面图, 从其反射率因子垂直剖面可见(图 10a), 50 dBz 以上强回波主要在 4 km 以下, 径向速度垂直剖面图(图 10b)径向速度场都存在中尺度气旋和龙

卷涡旋特征, 主要差别在台风龙卷中气旋的尺度更小, 垂直伸展高度更低, 图 10b 台风环境下龙卷涡旋特征伸展厚度 2.8 km, 平均直径 3.5 km; 图 10d 西风带环境下龙卷中气旋伸展厚度 4.3 km, 平均直径 4.8 km。

根据美国统计结果, 产生龙卷的中气旋占总数 20% 左右(Doswell, 2001)。在探测到强中气旋同时探测到龙卷涡旋特征(TVS), 则发生龙卷的概率提高到 50% 以上, 最近研究表明(Trapp et al, 2005), 如果探测到中等强度以上中气旋其底到地面距离小于 1 km, 龙卷产生的概率可达 40% 以上。

2005 年 9 月 2 日龙卷过程共探测到 3 个时次 TVS, 皆与龙卷有关, 并没有探测到中气旋。2006 年 8 月 4 日强龙卷袭击该过程中共探测到 59 个龙卷涡旋特征, 其中仅有 13 次和龙卷风暴有关, 占总数的 22%, 55 个中尺度气旋, 其中 5 个和龙卷有关。2007 年 8 月 18 日龙卷过程中探测到 11 个龙卷涡旋特征, 但和龙卷产生地点没有对应, 9 个中气旋, 其中 3 个和龙卷有关。2008 年 7 月 30 日的台前龙卷过程, 共探测到 4 个时次龙卷涡旋特征, 其中 2 个时次和龙卷有关, 5 个时次出现中尺度气旋, 其中 2 个时次和龙卷有关。需要指出, 由于速度模糊的出现, 目前 SA 雷达的中气旋算法和 TVS 算法可能会出现较高的错误识别率, 需要通过基于基本径向速度图并结合相应反射率因子图主观判别进行核实。

对台风龙卷和江淮地区典型西风带龙卷过程特征统计结果(表 2、表 3): 最长一次中气旋生命史 114 min, 最长龙卷涡旋特征生命史为 48 min。由表 2 可见, 台风影响导致的龙卷, 根据中气旋的出现进行预警的提前时间(lead time)在 3~29 min, 其中还有部分漏报, 龙卷涡旋特征在 2005 年 9 月 2 日和 2006 年 8 月 4 日过程中有很好的预警, 但 2007 年 8 月 18 日和 2008 年 7 月 30 日龙卷过程就没有探测到龙卷涡旋特征, 只探测到低层中气旋。相比之下梅雨期受西风带影响产生的龙卷, 中气旋的预警提前时间明显要长一些, 在 23~71 min, 而龙卷涡旋特征的预警提前时间很短, 只有 5~9 min。从中气旋结构来说, 对于台风影响造成的龙卷, 其中气旋底高平均在 1 km 以下, 顶高 2.7 km, 平均直径 3.6 km, 比西风带系统影响造成龙卷的中气旋尺度小, 伸展高度低。

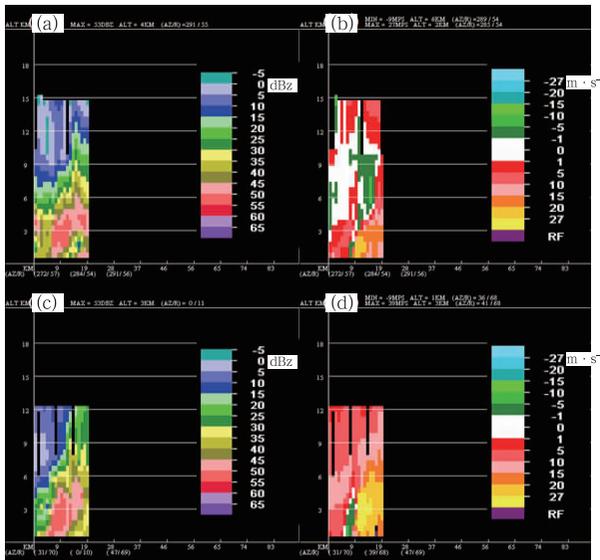


图 10 超级单体风暴沿龙卷中心的反射率因子(a, c)和径向速度(b, d)垂直剖面  
(a, b) 2006 年 8 月 4 日 13:10,  
(c, d) 2007 年 7 月 3 日 16:48

Fig. 10 Supercell storm of RHI radar echo reflectivity (a, c), RHI radar radial velocity (b, d)  
(a, b) 13:10 BT 4 August 2006,  
(c, d) 16:48 BT 3 July 2007

表 2 六次龙卷过程中尺度气旋特征

Table 2 Characteristics of the mesocyclone in six tornado processes

时间 /年月日	提前时间 /min	平均底高 /km	平均顶高 /km	平均直径* /km	最强切变高度 /km	平均切变 /10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
20060804	3	0.6	2.2	3.8	0.9	19.0
	20	0.7	3.0	3.5	1.6	18.5
	20	0.8	2.9	3.9	1.2	12.0
	15	0.9	3.6	3.7	0.9	16.0
20070818	29	0.7	2.5	3.5	1.0	14.0
20080730	24	1.0	1.9	3.1	1.5	15.0
台风型平均		0.8	2.7	3.6	1.2	15.8
20030708	71	0.8	2.3	5.4	1.4	15.3
20070703	29	0.7	3.5	5.1	1.8	19.0
20130707	23	2.4	5.1	4.1	3.34	15.0
西风带平均		1.3	3.6	4.9	2.2	16.4

\* 平均直径=(径向直径+AZ直径)/2

\* Average diameter = (radial + AZ diameters)/2

表 3 六次龙卷过程龙卷涡旋特征

Table 3 Characteristics of the tornado vortex signature in six tornado processes

时间 /年月日	提前时间 /min	平均底高 /km	平均顶高 /km	平均切变 /10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>	最强切变高度 /km
20050902	0	0.3	2.8	88.6	0.8
20060804	6	0.5	2.4	46.0	1.1
	24	0.6	3.0	39.7	1.1
	4	0.8	2.8	33.0	0.9
	9	0.4	2.8	66.0	0.9
20080730	-3	0.7	2.7	39.0	1.7
台风型平均		0.5	2.8	52.1	1.1
20030708	9	0.7	3.5	28.9	1.4
20070703	5	0.8	3.5	36.3	1.9
20130707	5	0.7	5.0	49.0	0.9
西风带平均		0.7	4.0	38.1	1.4

## 4 讨 论

### 4.1 微型超级单体风暴中尺度气旋的空间尺度

对典型台前龙卷超级单体风暴的分析可见,这些风暴的最显著特征是垂直涡度被限制在低层,这一事实在 McCaul(1993)数值试验中也被证明。

这种限制的原因可以解释如下:选取了 5 次典型过程靠近龙卷发生时刻前的探空资料如图 3 所示,1 km 以下风的垂直切变很强,1~7 km 风的垂直切变相对较弱,根据很多以前的研究显示(Rotunno et al, 1985),强风的垂直切变中发展的中气旋,其垂直涡度主要来自环境水平涡度倾斜拉伸导致的涡度增加,如图 10b 可见,台前龙卷超级单体风

暴强辐合主要在 3 km 以下,高层辐散。因此,由于风暴上升气流造成水平涡度倾斜导致的垂直涡度在 3 km 以上逐渐减小。

造成台前龙卷超级单体风暴的中尺度气旋直径比较小的原因可以解释如下:因为中层中气旋是由于环境风的水平涡度倾斜产生的,中气旋的水平尺度与上升气流接近一致,在干对流中(Rayleigh-Bernard 对流),上升气流的水平尺度与垂直尺度一致,因为造成台前龙卷的超级单体风暴的垂直尺度小于西风带系统典型超级单体风暴,因此造成台前龙卷超级单体风暴的上升气流和水平尺度比西风带系统下典型超级单体风暴更小。

### 4.2 中气旋的形成

给出垂直涡度方程(忽略湍流摩擦作用)表示如

下:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \omega_h \cdot \nabla_h \omega + \zeta \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (1)$$

式中,  $\zeta$  为垂直涡度,  $d/dt$  为流体块的时间导数,  $\omega_h$  是涡度向量  $\omega$  的水平分量,  $\nabla_h$  是水平向量导数,  $\omega$  是速度向量  $(u, v, \omega)$  的垂直分量。式(1)右边的第一项为水平涡度扭曲的垂直涡度项, 第二项为垂直涡度拉伸项。第一项是在水平分布不均匀的垂直速度场作用下水平涡度扭曲为垂直涡度, 第二是涡旋在随高度逐渐加强的上升气流中被垂直拉伸而旋转加快。

研究结果(Davies, 1984; Rotunno et al, 1985)认为, 超级单体风暴中中气旋产生是由于环境风的垂直切变产生水平涡度, 沿着对流单体低层入流方向的水平涡度分量随入流转变为上升气流过程中被逐渐扭曲为垂直涡度, 随后垂直涡度在上升运动的垂直拉伸下进一步加强为中气旋。2008年7月30日15:00左右, 从盐城多普勒雷达VWP产品可以看出, 盐城(距离龙卷发生地40 km)上空最强风的垂直切变出现在0.3~2 km之间, 由0.3 km处的  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  偏东风转为2 km处的  $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  偏南风, 对应的风矢量差值在  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相应风的垂直切变值为  $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。相应水平涡度指向为从南指向北, 超级单体风暴低层入流主要来自东南偏东方向, 水平涡度在低层入流方向有很大的分量。当低层入流逐渐变为上升气流时, 相应的水平涡度被扭曲为垂直涡度, 垂直涡度在上升气流的进一步拉伸作用下旋转加强而形成中气旋。根据Klemp(1987)分析, 超级单体中上升气流的加强与垂直涡度通过与环境风的垂直切变间的动力相互作用产生向上的扰动气压梯度力直接相关, 这种上升气流的动力增强机制使得微超级单体风暴能够在CAPE不是很大的环境下发展。

## 5 结论

(1) 从10次台风龙卷环境场热动力条件分析可见, 台风龙卷往往发生在对流不稳定能量较小环境下, 都伴有强的低空(0~1 km)顺时针风的垂直切变, 平均值超过  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 相对风暴螺旋度很大, 粗理查孙数小于40。而西风带龙卷通常发生在中等强度的CAPE( $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )环境下。

(2) 台风龙卷产生于接近前期存在的地面辐合

线附近的单一暖气团中, 这说明边界层的垂直涡度的发展造成了低层中尺度气旋垂直涡度的加强从而产生龙卷。西风带系统影响下的龙卷产生于地面气旋性辐合和水平温度梯度区域, 常有锋面存在。

(3) 台风龙卷超级单体风暴有很多与典型超级单体相似的特征, 包括中气旋的发展。然而多普勒雷达观测表明: 其超级单体中的中气旋具有更小的直径(3.3~4.2 km), 垂直涡旋伸展高度更低(低于4 km), 属于微型超级单体。

台风影响导致的龙卷, 根据中气旋的出现进行预警的提前时间在3~29 min, 平均在18 min, 当中气旋出现在比较有利于龙卷产生的大尺度环境背景下, 可以考虑及时发布龙卷临近预报。由于我国台风龙卷超级单体风暴尺度小, 生命史短, 以及受到龙卷距离多普勒雷达太近或太远等影响, 有效的多普勒雷达探测资料有限, 对于造成台风龙卷超级单体风暴的研究还需要更多的观测数据和数值模拟研究。

## 参考文献

- 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. 应用气象学报, 17(3): 370-375.
- 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. 气象, 35(4): 68-75.
- 李改琴, 许庆娥, 吴丽敏, 等. 2014. 一次龙卷风天气的特征分析. 气象, 40(5): 628-636.
- 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. 气象, 16(1): 11-15.
- 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.
- 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.
- 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. 高原气象, 25(5): 914-924.
- 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, 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. 气象学报, 72(2): 306-317.
- 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝, 等. 2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件. 气象, 39(6): 728-737.
- 朱江山, 刘娟, 边智, 等. 2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. 气象, 41(2): 182-191.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, et al. 1978. Tornado detection on by pulsed doppler radar. Mon Wea Rev, 106: 29-38.
- Burgess D W, Lee R R, Parker S S, et al. 1995. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars// Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology. Vail CO: Amer Meteor Soc, 4-6.

- Davies J R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J Atmos Sci*, 41:2991-3006.
- Donaldson R J. 1970. Vortex signature recognition by a doppler radar. *J Appl Meteor*, 9:661-670.
- Doswell C A. 2001. Severe convective storms. *Meteor Monogr* 69 AMS, Boston, 561.
- Fujita T T. 1963. Analytical meso-meteorology: A review severe local storms. *Meteor Monogr* 27 AMS, Boston, 77-125.
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J Atmos Sci*, 38:1511-1533.
- Gentry R C. 1983. Genesis of tornadoes associated with hurricanes. *Mon Wea Rev*, 111:1793-1805.
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms. *J Ann Rev Fluid Mech*, 19:369-402.
- McCaul E W. 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon Wea Rev*, 119:1954-1978.
- McCaul E W. 1993. Observations and simulations of hurricane-spawned tornadic storms. The tornado: Its structure, dynamics, prediction and hazards. *J Amer Geophys*, 119-142.
- Mitsuta Y E. 1983. Studies on wind disasters caused by tatsumaki (tornadoes and waterspouts) and severe local storms in Japan (in Japanese with English abstract). Final Report of the Special Research Project for Natural Disaster Sponsored by the Ministry of Education, 124.
- Novlan D J, Gray W M. 1974. Hurricane-spawned tornadoes. *Mon Wea Rev*, 102: 476-488.
- Rotunno R, Klemp J. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *Atmos Sci*, 42:271-292.
- Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea Forecasting*, 20:680-687.
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon Wea Rev*, 110:504-520.