

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流风暴结构特征分析. 气象, 42(3): 280-293.

# 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷 对流风暴结构特征分析<sup>\*1</sup>

曾明剑<sup>1</sup> 吴海英<sup>2</sup> 王晓峰<sup>3</sup> 蒋义芳<sup>2</sup>

1 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

2 江苏省气象台, 南京 210008

3 上海台风研究所, 上海 200030

**提 要:** 利用逐日 4 次  $1^\circ \times 1^\circ$  FNL/NCEP 分析资料及多普勒天气雷达、地面自动气象站等观测资料, 在对近十年江苏梅雨期龙卷天气的环境特征进行合成分析并提炼对流参数特征值后, 着重对 2013 年 7 月 7 日发生在安徽天长至江苏高邮一带导致龙卷的对流风暴的形成和结构特征演变进行了分析。结果表明: 江淮梅雨期间, 地面中尺度气旋的右侧附近(100 km)、对流层低层中尺度低涡右下方约 200~300 km 处和低空急流左后侧之间区域是龙卷易发区; 梅雨期大气环流背景为龙卷的发生提供了对流层低层充沛的水汽和有利的不稳定层结与动力条件, 低层气旋性涡度在龙卷发生前强烈发展, 边界层内强的垂直风切变促进了龙卷风暴内气旋性涡度的迅速增强, 而对流层低层辐合的增强将有利于初始对流的触发; 但梅雨期龙卷对对流不稳定能量蓄积条件要求低于冰雹和雷暴大风; 龙卷对流参数特征值及其与气候平均值的差异性为龙卷天气的短期预报提供了参考依据。引发 2013 年 7 月 7 日龙卷的对流风暴起源于地面辐合线附近, 地面辐合及中尺度锋区的增强有利于对流风暴的快速发展, 此次系列龙卷是由一个生命史较长的超级单体风暴产生, 该对流风暴具有典型超级单体的回波特征, 风暴内的中气旋维持 2 h 之久, 中气旋相关参数的演变对龙卷的临近预警有较高的参考价值, 当中气旋底高较低且中气旋切变值明显增强时, 发生龙卷天气的可能性较大。

**关键词:** 龙卷, 对流参数, 对流风暴, 中气旋, 中尺度锋区

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.003

## Analysis on Environmental Conditions and Structural Features of Typical Convective Tornado Storm in Meiyu Period

ZENG Mingjian<sup>1</sup> WU Haiying<sup>2</sup> WANG Xiaofeng<sup>3</sup> JIANG Yifang<sup>2</sup>

1 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

**Abstract:** By reanalysis data ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) 4 times a day from FNL/NCEP, Doppler radar, and automatic weather station (AWS), this paper analyzed the formation and structure characteristics of the convective storms which resulted in tornadoes from Anhui Tianchang to Jiangsu Gaoyou on 7 July 2013 after analyzing on environmental characteristics and feature extraction of convective parameters of tornadoes in Jiangsu Province in recent ten years' Meiyu period. The results show that during the Meiyu period in Yangtze-Huaihe Region, tornadoes are prone to occur in the right side of mesoscale cyclone (100 km), the lower

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006003 和 GYHY201206004)、江苏省自然科学基金(BK20131459)、江苏省科技支撑计划(BE2013730 和 BE2015731)、国家科技支撑计划(2011BAK21B04)和江苏省气象局科研基金(KZ201502)共同资助

2014 年 10 月 26 日收稿; 2015 年 8 月 25 日收修定稿

第一作者: 曾明剑, 主要从事灾害性天气预报技术研发. Email: swordzmj@qq.com

通信作者: 吴海英, 主要从事天气预报技术研究和业务工作. Email: 951129833@qq.com

right side of mesoscale vortex (200—300 km) and the left rear of low-level jet stream. General circulation in the Meiyu period provides plentiful moisture, favorable unstable stratification and dynamic conditions for tornadoes. The low-level cyclonic vorticity develops strongly before tornado. Vertical wind shear in boundary layer promotes cyclonic vorticity in tornado storm to strengthen rapidly, and enhancement of convergence in low troposphere is conducive to initialization of convection. As for tornadoes in Meiyu period, the demand to convective energy accumulation is lower than hails and thunderstorm gales. Bias between convective parameters feature value and climatic average value provides references for short-range forecast of tornado. The tornado convective storm that triggered the tornado on 7 July 2013 initialized near surface convergence line. The strength of surface convergence and mesoscale frontal zone contributed to the development of convective storm. The series of tornadoes were produced by a long-life super-cell storm which had echo characteristics of typical super-cell. The mesocyclone inside the storm maintained two hours. Generally, the evolution of the mesocyclone parameters has great reference value to tornado warning, which shows that when the bottom height is low and shear values are significantly enhanced in the mesocyclone, tornadoes are more likely to occur.

**Key words:** tornado, convective parameters, convective storm, mesocyclone, mesoscale frontal zone

## 引言

龙卷是从雷暴云向下伸展至下垫面的高速旋转的漏斗状云柱,往往由强烈发展的对流风暴所引发,具有尺度小、生消迅急、致灾严重等特点。常规观测资料几乎很难捕捉此类小尺度对流系统生成发展信息,预报预警难度大,常会造成严重的人员伤亡和财产损失。很多气象学者,如沈树勤(1996)、蒋汝庚(1997)和吴海英等(2009)为了解产生龙卷的对流风暴的结构特征及其成因进行了有益的探讨。多普勒天气雷达及自动气象站的布网建设和业务运行,为龙卷天气的监测预警提供了有力的支持,蒋义芳等(2009)、周宏伟等(2011)和吴芳芳等(2012)利用这些高分辨率资料分析了产生龙卷的对流风暴的结构。Brown等(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)。之后越来越多的观测分析(俞小鼎等,2006a;2008;刘娟等,2009)表明,强烈龙卷往往与中气旋和比之尺度更小的TVS相联系,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,2001)。F2级以上的龙卷则多数是由超级单体风暴产生的(俞小鼎等,2006b),2005年7月30日发生在安徽灵璧的龙卷风过程就是由一个强降水型超级单体引发(俞小鼎等,2008)。张一平等(2012)利用多种观测资料对两次暴雨过程中产生龙

卷的微超级单体的回波特征进行了对比分析,发现下沉气流和上升气流交界处是龙卷易出现的关键区域。郑媛媛等(2009;2015)、范雯杰等(2015)和张晰莹等(2013)利用多普勒雷达资料,研究了导致强龙卷和强冰雹的超级单体风暴的多普勒雷达回波特征差异。苏皖平原是我国龙卷天气发生最为频繁的地区之一,时间分布上以6—8月出现最多(孙继松等,2014)。从常年平均来看,7月上旬江淮地区正处在梅雨季节,强降水过程频繁,伴生于梅雨期强降水中的龙卷时有发生。据不完全统计,这类龙卷约占江苏龙卷30%。雷达探测发现,梅雨期龙卷或由镶嵌于梅雨雨带中的对流单体发展引发,或由梅雨带南侧的孤立对流单体强烈发展所致,其生消迅急,发展猛烈,且尺度非常小。尽管上述研究成果一定程度上提高了对龙卷天气生成环境和风暴内部风场的认识,但由于导致龙卷天气产生的原因非常复杂,特别是伴生于梅雨期强降水中的小尺度对流风暴发生、发展的物理过程的研究尚不够深入,无论探测还是预报均面临很大的困难,值得进一步探索和研究。

本文利用逐日4次 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的FNL/NCEP分析资料对近10年发生在江苏梅雨期间龙卷的中尺度系统背景、环境场特征进行了合成分析,并从对流参数角度尝试提炼定量指标,然后结合苏皖两省自动气象站和南京多普勒雷达等多源资料对2013年7月7日发生在安徽天长、江苏高邮的一次典型梅雨期龙卷对流风暴的形成和结构特征演变进行了细致分析,以期对此类梅雨强降水过程中伴随龙卷的对

流风暴发展有进一步的认识,提高其预警能力。

## 1 2005—2013 年江苏梅雨期龙卷统计特征

### 1.1 梅雨期龙卷个例

由于江苏梅雨期龙卷天气的相对普发性,我们

对 2005—2013 年间发生江苏梅雨期的龙卷进行了普查(表 1)。由表 1 可见,江苏梅雨期龙卷主要发生在江苏淮河以南地区,尤其是高邮低洼地带是龙卷的高发区域。

由于资料时空分辨率的限制,这里采用“邻(临)近原则”(章国材,2011),分别以 10 个龙卷发生临近时刻,及邻近 FNL/NCEP 资料的格点为中心,对 10 组 FNL/NCEP 资料按此中心进行合成分析。

表 1 2005—2013 年江苏梅雨期间龙卷

Table 1 Tornadoes in Jiangsu Province during Meiyu period from 2005 to 2013

日期	时间	地点	灾情
2005 年 6 月 27 日	14:00	启东	伤 3 人,6 个乡镇受灾,倒塌房屋 58 间
2006 年 7 月 3 日	18:00	阜宁、大丰、建湖、新沂	5 人死亡,76 人受伤,倒塌房屋 1569 间
2007 年 7 月 3 日	14:00	天长、高邮、兴化、盐都	仅江苏 7 人死亡,84 人受伤,倒塌房屋 2794 间
2008 年 6 月 17 日	15:00	吴江	3 人受伤,3 村 91 户受灾,倒塌房屋 23 间
2008 年 7 月 1 日	16:19	阜宁	5 人受伤,4 村 5000 余人受灾,倒塌房屋 57 间
2009 年 7 月 7 日	12:00	通州	倒塌房屋 55 间
2011 年 7 月 11 日	15:45	高邮	93 间房屋受损,倒断大树 480 棵
2011 年 7 月 12 日	19:00	江都	1 人死亡,倒塌房屋 31 间,倒伏电线杆 10 根
2011 年 7 月 13 日	18:00	海门	30 多间房屋倒塌,300 多亩夏季农作物倒伏受淹
2013 年 7 月 7 日	16:00	天长、高邮	53 人受伤,其中 7 人重伤,400 余户受灾

### 1.2 龙卷产生的中尺度背景

梅雨锋涉及到不同尺度系统以及它们的相互作用(陶诗言,1980),其中中尺度对流系统是梅雨锋暴雨的直接影响系统(孙晶等,2007),而中尺度对流系统是由不同尺度、不同强度的对流单体(包括  $\beta$  中尺度和  $\gamma$  中尺度对流单体)组成(姚秀萍等,2005)。上述发生在江淮梅雨期间的 10 例  $\gamma$  中尺度龙卷是局地生成还是由  $\beta$  中尺度或  $\alpha$  中尺度系统诱生,或是否与  $\beta$  中尺度或  $\alpha$  中尺度系统相联系?理清这一问题对依据现有探测技术条件通过对  $\beta$  中尺度或  $\alpha$  中尺度系统的及时监测、识别,可为龙卷的预警预报提供有价值的线索。

利用以各次龙卷发生地邻近格点为中心的合成资料,制作以龙卷为中心左右各 8 个格距(约 800 km)范围内的流场图(图 1)可以看到,从地面到 850 hPa(图 1a~1c)在龙卷发生地附近都存在辐合系统,在地面(图 1a)为  $\alpha$  中尺度的切变线及其顶端的气旋,对应气压场也为  $\alpha$  中尺度的闭合低压(图略),而 925 hPa(图 1b)和 850 hPa(图 1c)上为  $\alpha$  中尺度低涡系统,700 hPa(图 1d)及其上则为典型的梅雨锋上的冷暖气流交汇区,中尺度系统不复存在。进一步,通过龙卷与中尺度气旋中心的相对位置变化可以看出,在地面,龙卷发生在紧邻  $\alpha$  中尺度气旋

的右侧,其上直至 850 hPa,由于  $\alpha$  中尺度低涡的向北向西倾斜,龙卷位于其右下方的西南气流区域,而从地面到 700 hPa,龙卷右下侧的西南气流渐次增强,700 hPa 上出现  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的急流核(图 1d 中阴影所示),龙卷出现在紧邻急流核左后侧,这里既存在较强的垂直风切变,也存在一定的水平风的气旋性切变。由此可见,江淮梅雨期间,地面  $\alpha$  中尺度气旋的右侧附近(100 km)、对流层低层  $\alpha$  中尺度低涡右下方约 200~300 km 处和低空急流左后侧之间区域是发生龙卷的重点关注区间。这一位置特征,根据孙继松等(2014),江淮梅雨期间较强的低空急流(意味着较强的低层垂直风切变),抬升凝结高度也很低,同时强降水的不均匀也可能强迫边界层急流的发展,造成 925 hPa 急流加速,形成近地面强烈的垂直切变,形成了有利于产生龙卷的条件。

### 1.3 热力与水汽条件合成分析

梅雨期间,通常副热带高压(简称副高)稳定,江淮流域处于副高西侧西南气流影响之下(图略)。根据合成资料,在对流层低层 850 hPa 风场与水汽通量散度的叠加图(图 2a)上,龙卷发生地位于沿西南气流形成的水汽通量辐合中心附近,其值为  $-14 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,结合比湿的分布(图略),850 hPa 比湿可达  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而近地面比湿

甚至超过  $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对流层中低层西南暖湿气流的输送,表现在假相当位温( $\theta_{se}$ )的合成分布(图2b)上,低层呈现为沿副高西侧一条东北—西南向的 $\theta_{se}$ 高值带伸展至龙卷发生地附近, $\theta_{se}$ 中心值超过

348 K,龙卷发生于 $\theta_{se}$ 锋区附近暖湿空气一侧。显然,在有利的大气环流背景下,充沛的暖湿气流输送和集中使得龙卷发生地附近低层大气非常潮湿。

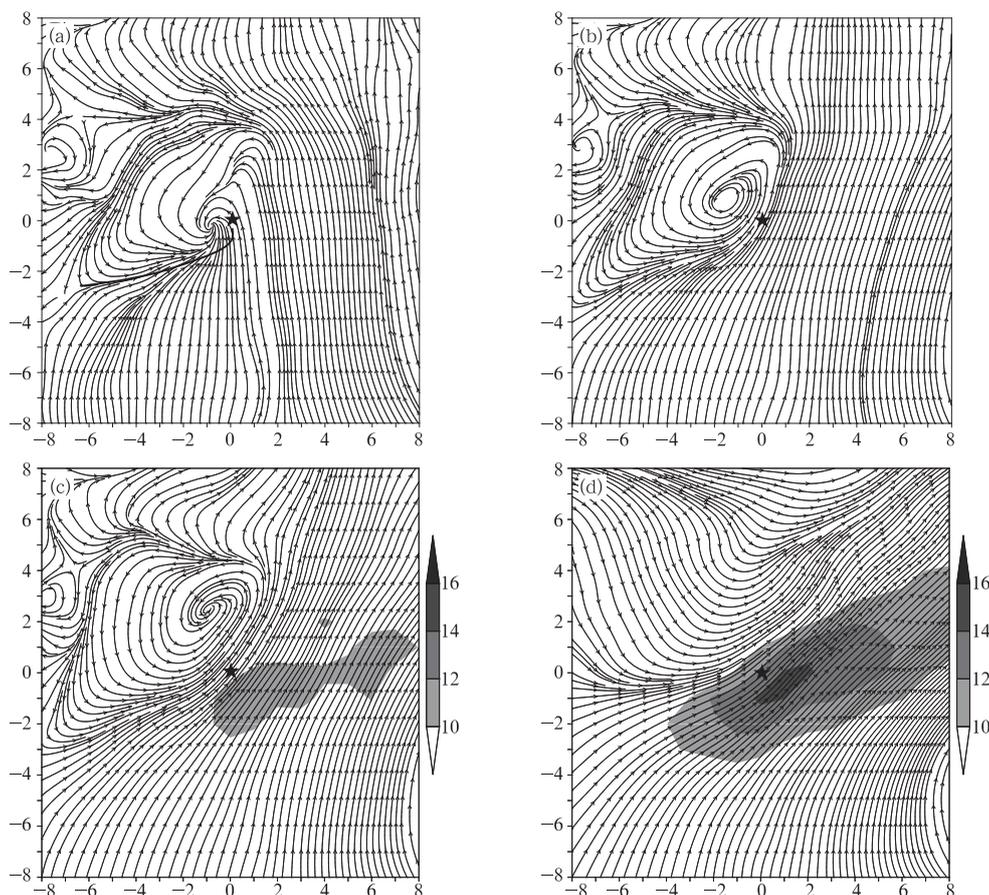


图1 以龙卷为中心的流场

(a)地面,(b)925 hPa,(c)850 hPa,(d)700 hPa

(图中横纵坐标为距龙卷位置的FNL资料格点编号,

图中的★表征龙卷发生地,图c,d中阴影区为风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域)

Fig. 1 Stream fields

(a) surface, (b) 925 hPa, (c) 850 hPa, (d) 700 hPa

(Numbers on  $x$ -,  $y$ -axis are the grid point number from tornado location of FNL data,

★ stands for tornado, the shaded area represents wind speed  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

进一步,从龙卷所在经度制作的 $\theta_{se}$ 合成经向垂直剖面(图2c)可以看出,龙卷出现在梅雨锋南侧约1个纬距处,而其北侧的梅雨锋结构较为典型,锋面中低层(700 hPa以下)坡度陡直,700 hPa以上的锋面则随高度逐渐向北倾斜,梅雨锋南侧的700 hPa附近以下高度为显著的不稳定层结,尤其在龙卷出现的位置上不稳定层结既强且深厚,这显然有利于中尺度对流系统的发生发展。同时可以看到, $\theta_{se}$ 在龙卷发生地右侧陡直而且密集, $\theta_{se}$ 的这一结构反映了大气强的湿斜压性特征,当然,强烈的垂直风切变

(详见下节)也反映出大气的斜压性特征,根据湿位涡守恒制约下的倾斜涡度理论(吴国雄等,1995;1997),大气湿斜压性的增加将导致垂直涡度的显著发展,倾斜越大,气旋性涡度越强烈。为进一步考察 $\theta_{se}$ 这一结构的演变,仍以龙卷发生地为中心,但以前一时刻的FNL资料进行合成并做 $\theta_{se}$ 经向垂直剖面(图2d),由图看到,龙卷南侧的不稳定层结出现在850 hPa以下,与图2c比较,不稳定层高度明显偏低,且强度也明显偏弱;而龙卷北侧, $\theta_{se}$ 坡度陡直且密集区也集中在850 hPa以下,其上则向北倾斜。

可见,邻近龙卷发生时刻,大气不稳定层结和湿斜压性都有显著的增强,从而可导致气旋性涡度强烈发展,这将为龙卷的发生提供极为有利的动力条件。

从 CAPE 合成图(图 2e)中可以看出,未来龙卷并未发生在 CAPE 大值中心,而是发生于 CAPE 等值线密集区,即能量锋区附近,且 CAPE 本身也并不强,约  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,CAPE 大值中心位于龙卷发

生地南侧约 2 个纬距,中心值超过  $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

可见,龙卷作为一种破坏力极强的小尺度对流天气易出现在低层潮湿的不稳定大气层结中,除与俞小鼎等(2006b)的分析结果一致外,环境场上还表现出显著的倾斜涡度发展特征,而江淮梅雨特有的锋面结构、大气温湿、水汽输送条件,为龙卷的酝酿、产生提供了这一良好环境。

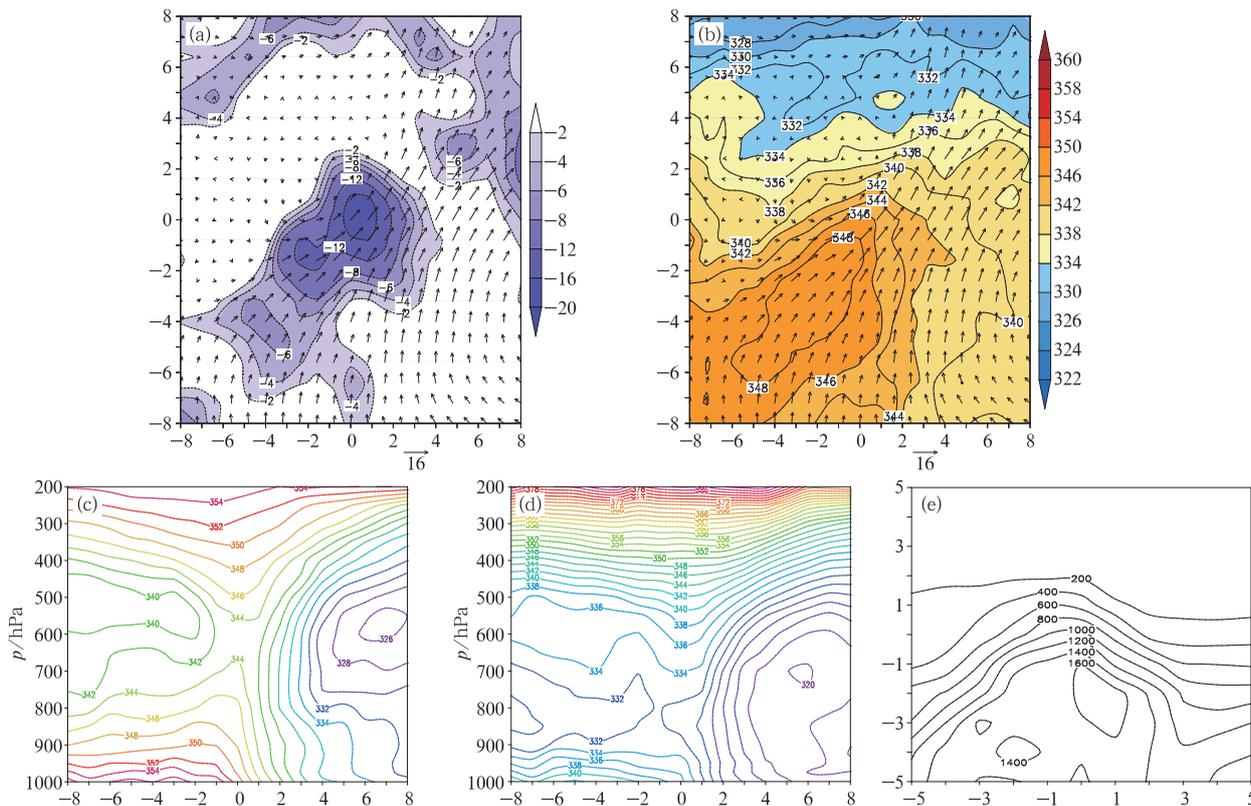


图 2 水汽通量散度(单位:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 风场, 假相当位温  $\theta_{se}$  (单位: K) 及 CAPE(单位:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 合成分布

(图中横纵坐标为距龙卷位置的 FNL 资料格点编号)

(a) 850 hPa 风场与水汽通量散度(阴影), (b) 850 hPa 假相当位温  $\theta_{se}$  与风场,

(c)  $\theta_{se}$  沿龙卷所在沿经度的距离-高度垂直剖面,

(d) 龙卷发生前一时刻  $\theta_{se}$  沿经度的距离-高度垂直剖面, (e) 对流有效位能 CAPE

Fig. 2 Composite distribution of divergence of moisture flux (unit:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), wind, pseudo-equivalent temperature  $\theta_{se}$  (unit: K), and CAPE (unit:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

(Numbers on axis are the grid point number from tornado location of FNL data)

(a) divergence of moisture flux and wind field at 850 hPa, (b) distribution of  $\theta_{se}$  and wind at 850 hPa,

(c) distance-height section of  $\theta_{se}$  along longitude of tornado, (d) distance-height section of  $\theta_{se}$  of previous time along longitude of tornado, (e) convective available potential energy (CAPE)

#### 1.4 动力条件合成分析

在美国,龙卷事件除与热带气旋相联系外,还常与春季由强斜压性驱动的中纬度气旋风暴有关(叶家东等,1993)。苏皖地区的龙卷天气则常发生在台风外围螺旋云带、梅雨期低涡或气旋暴雨区中。龙卷作为一种组织化程度高的小尺度对流系统,区别

于其他类型强对流天气的一个最明显特征就是高速旋转。1.3 节,根据  $\theta_{se}$  的垂直结构,从湿位涡守恒制约下的倾斜涡度理论推演气旋性涡度将显著发展,为龙卷的发生提供有利的环境动力条件。真实情况如何?下面仍采用合成资料考察龙卷发生临近时刻包括气旋性涡度在内的龙卷发生的动力条件。

为了解龙卷发生过程中其周围环境动力场的结

构特征,沿龙卷发生地所在经度制作合成平均的涡度、散度、垂直速度的垂直剖面图及850 hPa到地面垂直风切变分布(由于资料限制及避免插值引起的误差,以此代替常用的0~1 km垂直风切变)。在涡度垂直剖面图(图3a)上,龙卷发生地附近以显著的气旋性涡度发展为主要特征,一支由地面伸展至200 hPa以上的深厚气旋性涡度柱位于未来龙卷发生地上空,气旋性涡度柱随高度逐渐向北倾斜,涡度值为 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的两个中心分别位于700 hPa附近和边界层内900~1000 hPa之间。在合成的散度场(图3b)中,与气旋性涡度区相对应的是一深厚的辐合区,其中边界层内的气旋性涡度中心与形成于近地面的辐合中心相对应,而此处正是未来龙卷出现所在地。相应的合成垂直运动(图3c)表明在临近龙卷发生时刻,其上空为一致的上升气流,最强的上升运动位于500~400 hPa之间。图3d是龙卷发生前850 hPa到地面的垂直风切变的合成分布,可以看到,龙卷发生于低层垂直风切变大值中心北侧附近,切变中心值约为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。较强垂直风切变的存在一方面根据倾斜涡度发展理论将促进大气湿斜压性特征的形成和发展,从而导致气旋性涡度的

发展,同时也将有利于形成一支水平轴涡管,当上升气流分布不均匀时,水平涡管发生倾斜或扭转,会促进涡度垂直分量的增长,有利于风暴内部的涡度迅速发展(Markowski et al, 2010),也就是说环境水平风场的垂直切变将十分有利于产生龙卷形成和发展所需的涡度增长。在强垂直风切变背景下,对流的发展将更有组织性,其内部气流的改变与重构将促进对流风暴发展,这也正是F2级以上的龙卷常发生在较大的低层风垂直切变(尤其是0~1 km)环境下(俞小鼎等, 2006b)的根本原因。此外,图1已表明龙卷发生地处于自下而上逐渐增强,至700 hPa已达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流西北侧,对应自下而上水平风气旋性切变也渐次增强,也就是气旋性涡度的逐渐加强。在强的水平风垂直切变导致的气旋性涡度发展和水平风气旋性切变直接产生的气旋性涡度的叠加作用下,龙卷发生地的气旋性涡度势必强烈发展,为龙卷的发生提供了极为有利的动力条件,这也可能正是图3a上涡度发展强盛且在700 hPa存在一大值中心的原因所在。回到垂直风切变,需要注意的是,由于资料时空分辨率的限制,图3d给出的850 hPa到地面的垂直风切变对龙卷发生临近

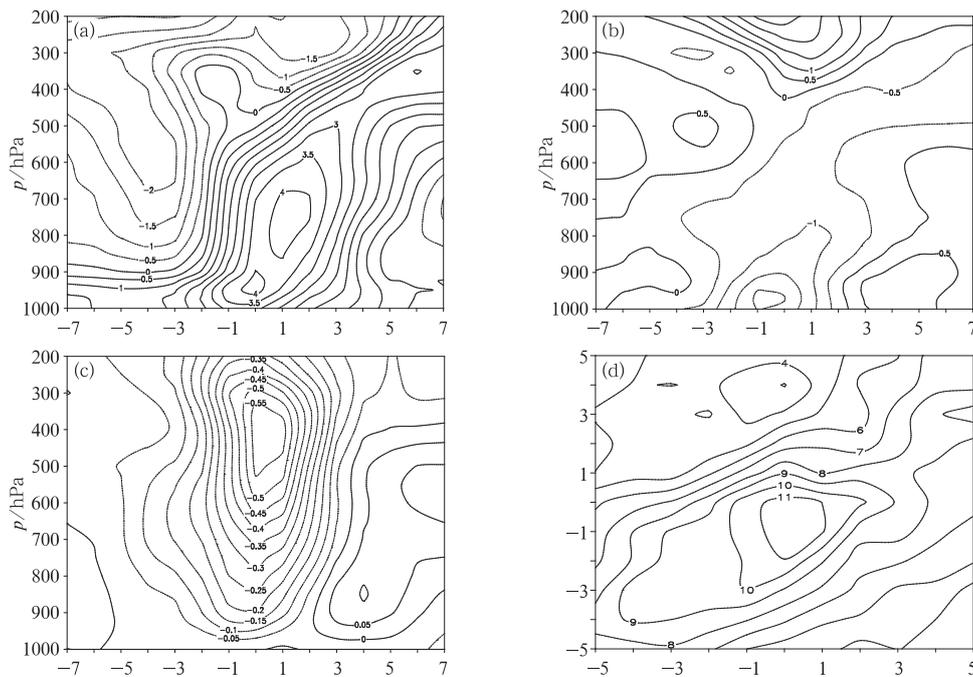


图3 沿龙卷所在经度(a)涡度(unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), (b)散度(unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), (c)垂直速度(unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )的距离-高度垂直剖面及 (d)850 hPa到地面垂直风切变(unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 The vertical section of (a) vorticity (unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), (b) divergence (unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), (c) vertical velocity (unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along the longitude of tornado, (d) vertical wind shear from 850 hPa to surface (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

时刻的实际垂直切变状态应是有所弱化的,尽管如此,图 3d 也在一定程度上反映出龙卷发生区域在低层垂直风切变上相较其他区域更强的特征。

以上对梅雨期多个龙卷个例的合成分析表明,此类龙卷易发生于潮湿不稳定的大气环境中,龙卷发生前伴随有气旋性涡度的强烈发展,尤以中低层气旋性涡度发展较为显著,边界层内强的垂直风切变对气旋性涡度的迅速增强具有重要作用,而对流层低层辐合的增强将有利于初始对流的触发。

### 1.5 对流参数特征值

灾害性天气能否发生本质上取决于天气系统空间配置背后的物理条件(孙继松等,2012)以及该物理条件是否表现出相对于气候平均值或与其他天气现象间明显的一致性差异。上述江淮梅雨期龙卷发生环境条件的分析,为龙卷发生发展的定性预报提供了诊断分析基础,能否再从定量化角度提炼出梅雨期龙卷的预报指标?目前,已发展出上百种基于探空资料的针对强对流天气分析预报的对流参数或物理量(刘健文等,2005),很多学者据此开展了各类强对流特征对流参数的分析归纳(李耀东等,2004;雷蕾等,2011;樊李苗等,2013;孙继松等,2014),张晰莹等(2013)和王毅等(2014)重点针对发生龙卷的大气环境条件进行了总结,也有采用不同的技术基于对流指数构建强对流天气的预报方法(郝莹等,2007;庞古乾等,2012;雷蕾等,2012),并取得了一定进展。这里采用 FNL/NCEP 格点资料计算了部分反映环境水汽、热力和动力条件的对流参数,然后按临近时刻和邻近格点匹配得到江苏梅雨期 10 个龙卷个例的对流参数,并以其平均值代表龙卷对流参数特征值(表 2)。其中,表 2 最后一列气候值是根据 FNL/NCEP 逐日 4 次资料计算得到的以江苏地区前述 10 次龙卷发生当日为基准、前后一周共计 15 天滑动计算的各对流参数的平均值。这里需要

说明的是,由于各例龙卷与基于  $1^\circ \times 1^\circ$ 、6 h 间隔的 FNL/NCEP 分析资料计算的对流参数在空间和时间匹配上都可能存在一定的差异,这些对流参数实际上反映的仍是龙卷发生的环境条件而不能描述龙卷本身的局地特征。

表 2 中,用大气可降水量(PWV)和 925 hPa 比湿( $q_{925}$ )来代表环境大气水汽条件,可见大气可降水量 PWV 和 925 hPa 比湿都明显高于气候平均值,且接近或超过了江苏 7 月发生短时强降水的阈值指标 63.8 mm 和  $16.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,这充分反映了龙卷发生所依赖的潮湿大气环境条件;热力不稳定条件可考察  $K$  指数和抬升指数(LI),由于  $K$  指数实际反映了在对流层中低层内的上下温差和水汽饱和程度,是能较好指示热力不稳定和水汽条件的综合指标,表 2 中, $K$  指数除第 5 例值相对较小外,其余 9 例都明显高于气候平均值,10 例平均值达到  $36.3^\circ\text{C}$ ,超过气候平均值  $11.6^\circ\text{C}$ ,也超过了统计的江苏地区 6 月冰雹、雷暴大风以及短时强降水的阈值(分别为  $25.3^\circ\text{C}$ 、 $29.9^\circ\text{C}$  和  $35.4^\circ\text{C}$ )。抬升指数 LI 反映的是大气层结不稳定特征,其负值越大,不稳定层度也越强,从表 2 来看,10 例龙卷也都表现出环境大气较强的不稳定特征;动力条件上用 925 hPa 的涡度、散度和 850 hPa 与地面的水平风垂直切变来代表,可见三者强度也都一致性地强于气候平均值,梅雨期间低层气旋性涡度发展区及强烈辐合区通常是此类龙卷的易发区,特别是低层垂直风切变条件明显强于江苏地区 6—7 月其他强对流天气  $3\sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的统计值,可见理论和事实都表明了低层垂直风切变对于龙卷发生的极端重要性;对流不稳定能量(CAPE)条件则没有显著的一致性特征,10 例龙卷间差别较大,其平均值与气候值相较也差别较小,从数值来看与姚叶青等(2012)针对安徽地区 6 次龙卷过程的统计值相当,平均约  $1100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,这远比江苏冰雹和雷雨大风天气需要近  $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的

表 2 江苏梅雨期龙卷对流参数特征值

指数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	气候值
PWV/mm	64.5	62.9	72.5	67.6	43.8	64.3	64.1	64.3	68.2	56.6	62.9	43.9
$q_{925} \text{ hPa} / \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	21.4	21.7	17.7	17.1	20.9	19.0	17.8	18.5	18.2	21.0	19.3	13.2
$K / ^\circ\text{C}$	37.8	36.9	39.7	39.7	25.9	35.9	37.0	37.9	38.7	33.9	36.3	24.7
$LI / ^\circ\text{C}$	-5.8	-6.7	-2.3	-0.8	-4.0	-3.3	-3.1	-5.6	-4.2	-3.8	-4.0	0.1
$Vor_{925 \text{ hPa}} / \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	3.5	4.9	3.8	4.3	4.6	5.0	4.7	3.9	4.6	3.7	4.3	2.6
$Div_{925 \text{ hPa}} / \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	-0.3	-3.5	-2.2	-0.9	-2.6	-0.1	-1.5	-1.1	-4.4	-4.8	-2.1	0.8
$Shr_{850 \text{ 地面}} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.9	18.2	14.7	10.6	11.0	12.5	5.2	7.5	7.0	12.5	11.1	3.5
$CAPE / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	1504.0	1704.0	668.0	147.0	1010.0	795.0	1494.0	1653.0	1411.0	669.0	1105.5	1000.5

注:  $Shr_{850 \text{ 地面}}$  为 850 hPa 到地面的垂直风切变,其他为常用物理量符号(刘健文等,2005)

CAPE 值低。

从表 2 及上述分析可见,龙卷是否能够生成发展必须依赖于良好的环境水汽、不稳定层结和动力条件,其条件阈值远超气候平均状态,也异于冰雹、雷暴大风等其他强对流天气,特别是对流层低层充沛的水汽和较强的垂直风切变条件对于龙卷而言至关重要,但与冰雹、雷暴大风相比较,此类龙卷对对流不稳定能量蓄积条件要求较低。当然,所谓条件阈值是就平均而言,是否环境大气满足这些基本条件就一定能够产生或在业务上就必须预报龙卷,显然还是比较困难的。这主要是因为江淮地区梅雨期龙卷常与梅雨期气旋暴雨相联系,常伴随短时强降水过程,其部分指标阈值与短时强降水接近,之间并不存在非常明确的物理界限,也就是说,它们发生的阈值区间存在很大的重叠性(孙继松等,2014)。不过采用适当的技术方法(雷蕾等,2012;曾明剑等,2015),仍可以在一定程度上开展包括龙卷在内的分类强对流潜势预报。随着数值模式的发展,根据模式探空可计算大量对流参数,上述特征对流参数的分析可为选择性地利用预报的对流参数开展龙卷的

短期潜势预报或新的预报方法的构建提供一定的参考依据。

## 2 典型个例

### 2.1 天气与灾情

2013 年 7 月 7 日受东移西风槽影响,江苏中部出现大到暴雨天气,同时伴有雷电、短时强降水和雷暴大风等对流天气。7 日 16—17 时,安徽天长、江苏仪征至高邮市一带部分乡镇出现了龙卷天气。其中,天长市秦栏镇、高邮三垛镇、卸甲镇、横泾镇和仪征市大仪镇等乡镇受灾严重,百余人受伤,并造成房屋倒塌,农作物受损,据统计,因灾直接经济损失约 4500 万元。根据房屋损害、树木折损程度和目击者描述,按照 Fujita(1981)龙卷风等级标准,可确定此次龙卷等级为 F1~F2 级。图 4 是 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时苏皖两省 24 h 累积雨量(图 4a)和江苏省 7 月 7 日的重要天气实况。

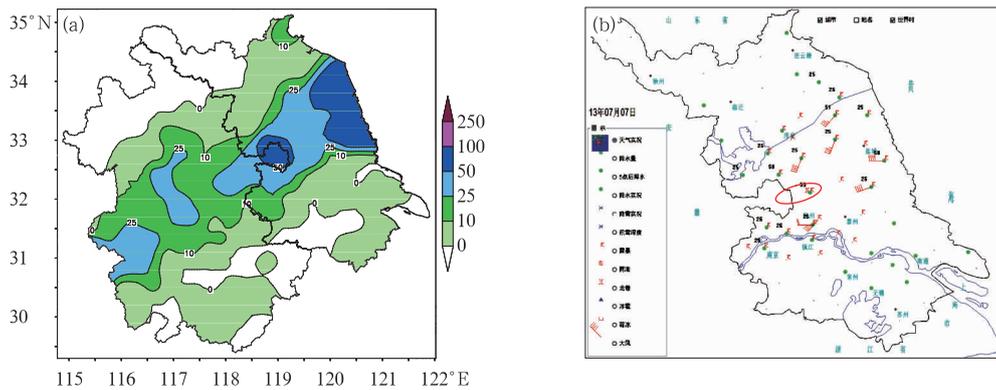


图 4 2013 年 7 月 7 日天气实况

(a)8 日 08 时 24 h 降水量,(b)重要天气报告(椭圆区为龙卷出现地带)

Fig. 4 The weather report on 7 July 2013

(a) 24 h accumulated rain at 08:00 BT 8 July 2013, (b) the very important weather reports

(The oval area covers the tornado belt)

### 2.2 环流背景

此次降水过程实际是 2013 年 7 月 4—7 日江淮地区持续强降水的一次高峰之一,8 日随着副高增强北抬,江苏梅雨结束。根据  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的 FNL/NCEP 分析资料,在强降水和龙卷天气发生的 7 月 7 日 08 时,500 hPa 上(图 5a),中纬度地区有西风槽东移,该槽与温度场中的冷槽相配合,此时副高脊线位于

$24^{\circ}N$  附近。随着副高增强,西风槽东移北缩,槽后冷空气与副高西侧的暖湿气流交汇于江淮地区。850 hPa 风场中,江淮北部有低涡东移,7 日 14 时(图 5b),低涡中心位于安徽北部,低涡前部的暖切伸至淮北地区,沿副高西北侧从华南沿海至江淮地区建立了一支强盛西南风急流,急流前部伸至低涡南侧,龙卷就发生在低涡南侧的西南风急流北侧附近(图 5b 星型符号处),其位置与图 1 合成分析的结

果一致。这支急流不仅提供了较好的低层垂直风切变及其北侧的气旋性切变条件,同时输送了充沛的水汽,并且低层暖湿气流与高空槽携带的冷空气垂直叠置在江淮上空,促进了这一地区对流不稳定层结的发展。环境场对流参数特征由表 2 第 10 个个例所示可见,本次龙卷除与其余龙卷在水汽、不稳定层结和动力条件上都表现出相对气候平均值明显的

一致性差异之外,与其余 9 例龙卷个例比较,其整层大气可降水量、不稳定层结相对偏弱,但低层水汽(925 hPa 比湿)、动力辐合及低层垂直风切变则相对较强。总体来说,环境场形势背景,对流参数特征都如前述合成分析,是有利于本例龙卷产生的,下面进一步分析小尺度龙卷对流风暴触发机制。

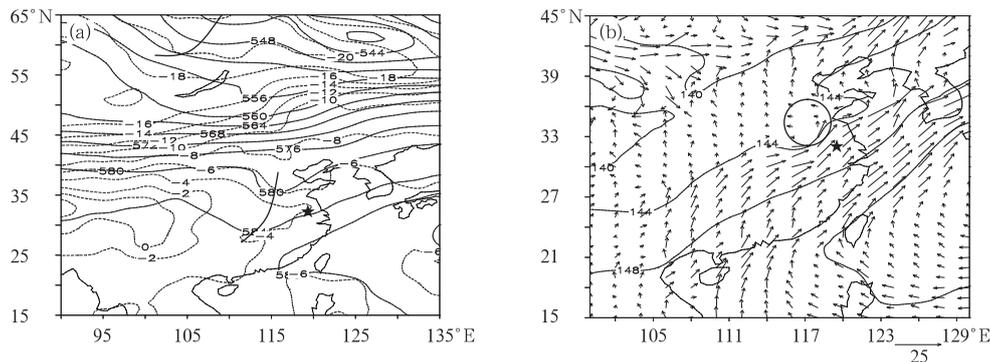


图 5 2013 年 7 月 7 日环流形势  
(a) 7 日 08 时 500 hPa 高度(实线)及温度(虚线), (b) 7 日 14 时 850 hPa 高度及风场  
(★ 表征龙卷发生地)

Fig. 5 The synoptic situation on 7 July 2013  
(a) height (solid line) and temperature (dashed line) at 500 hPa at 08:00,  
(b) height and wind field at 850 hPa at 14:00  
(★ represents tornado)

## 2.3 地面中尺度分析

### 2.3.1 地面流场演变

图 6 是利用苏皖两省约 2000 个自动气象站资料绘制的龙卷发生前后地面流场的演变。7 日 14 时(图 6a),江苏西南部及邻近的安徽境内地面流场开始呈现出明显的气旋性弯曲,偏南气流和偏东气流之间形成一条中尺度辐合线,辐合线位于雨带南侧,此时,开始有零散的对流回波在辐合线附近生成(图 8b)。15 时(图 6b),气流的气旋性曲率增大,龙卷发生地——天长附近已形成闭合的气旋性环流,雷达回波上显示(图略)移经此处的对流性回波迅速发展。16 时(图 6c),闭合环流范围逐渐扩大,风场辐合更加清晰,天长的两个乡镇出现龙卷。对流单体继续沿辐合线发展东移,1 h 后,天长下游高邮的三个乡镇也相继发生龙卷。结合雷达回波演变来看(图略),引发龙卷的对流风暴最初形成于地面辐合线附近,在地面辐合增强区,迅速发展为伴有中气旋的超级单体风暴,风暴内部存在的旋转如与环境垂直风切变的相互作用会引起其内部向上的垂直气压梯度扰动,增强对流风暴内部气流的强度和组织化,

促进对流进一步发展。

### 2.3.2 地面中尺度锋区及小尺度对流系统发展

从地面假相当位温  $\theta_{sc}$  分布及演变(图 7a 和 7b)来看,龙卷发生发展过程中,沿淮东部至江淮之间维持一条中尺度锋区。16—17 时,由于锋区北侧降水增强,雨滴降落拖曳冷空气,使北侧地面温度下降,而此时南侧暖湿气流发展,导致中尺度锋区两侧温湿差异加大,锋区增强至约  $8 \text{ K} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$ 。移经锋区附近的对流风暴发展迅速,与之相对应,在地面涡、散度场中,龙卷发生处出现了一对紧邻的几乎对称正负涡、散度中心(图 7c 和 7d),表明中尺度锋区的维持和发展产生了小尺度的局地环流,且局地扰动温度梯度(即锋区)的存在将导致垂直切变的增强(孙继松等,2008),这有利于对流风暴的产生、加强,并最终导致龙卷的产生。19 时以后,锋区明显减弱,对流风暴逐渐减弱并趋于消亡。

## 2.4 对流风暴雷达回波特征分析

### 2.4.1 龙卷对流风暴基本反射率因子演变

7 月 7 日降水期间,根据南京多普勒雷达监测,回波的发展可分为两个阶段:第一阶段江淮强降水,

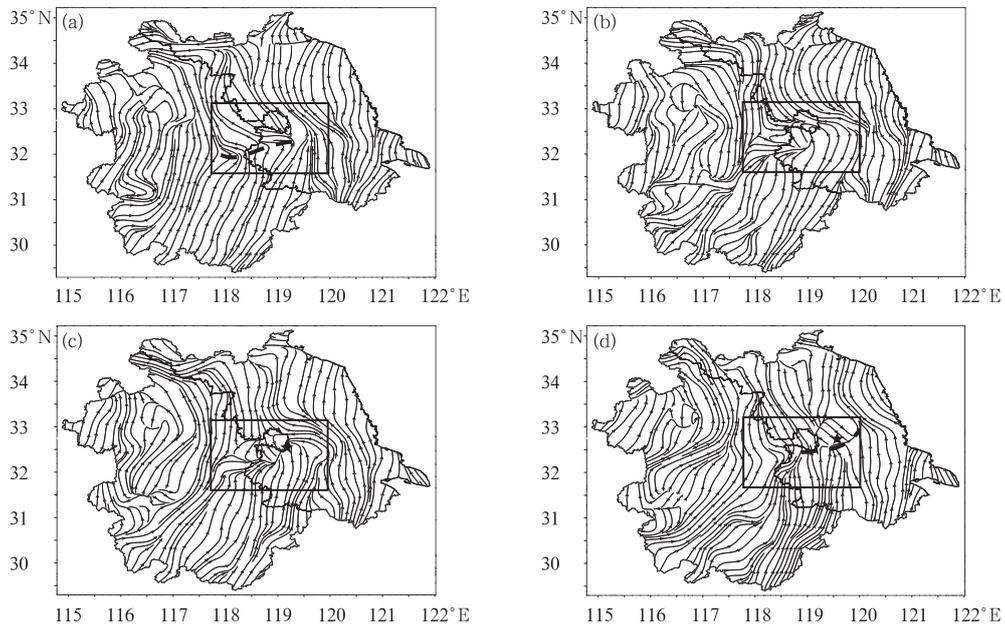


图 6 龙卷发生前后地面流场演变  
 (a) 14 时, (b) 15 时, (c) 16 时, (d) 17 时  
 (★ 表征龙卷发生地)

Fig. 6 The evolution of streamline on surface before and after the tornado event  
 (a) 14:00 BT, (b) 15:00 BT, (c) 16:00 BT, (d) 17:00 BT  
 (★ represents tornado)

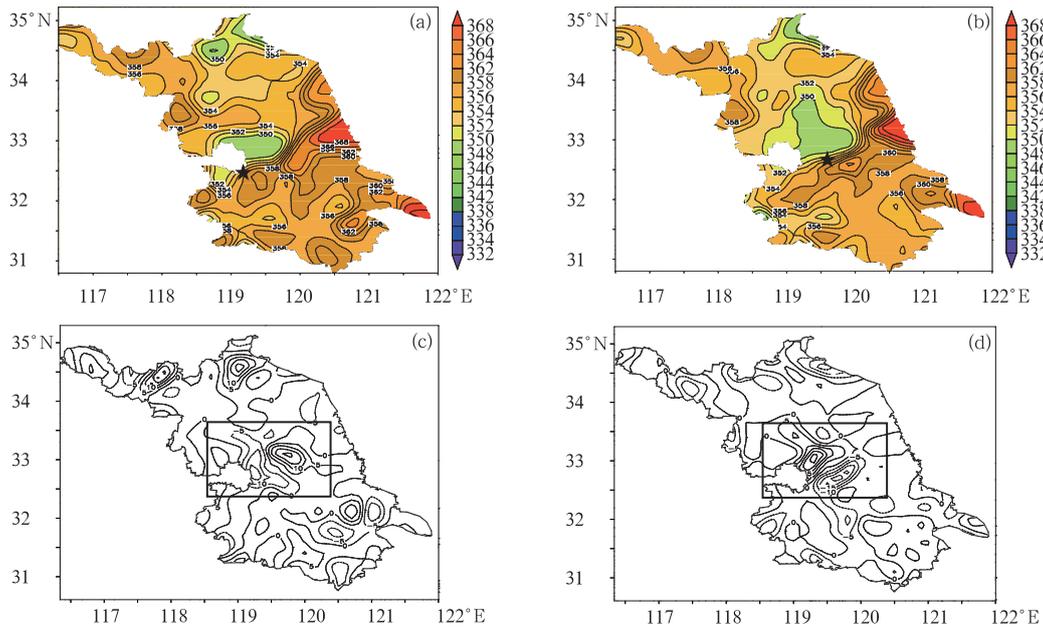


图 7 16 时(a)和 17 时(b)地面假相当位温  $\theta_{se}$  及 17 时涡度场(c)和散度场(d)  
 Fig. 7 The surface  $\theta_{se}$  (a,b), vorticity (c) and divergence (d)  
 (a) 16:00, (b) 17:00, (c) 17:00, (d) 17:00  
 (★ represents tornado)

出现在 7 日早晨至上午,降水回波为积层混合云回波(图 8a),位于安徽中部至江苏江淮之间一带,呈絮状,回波强度分布不均匀,在大片层状云降水中镶

嵌着许多零散的对流单体,发展较为旺盛的对流单体强度 48 dBz,顶高 11~12 km,东移影响江苏沿淮地区,导致这一带地区的强降水天气。之后降水回

波有所减弱;第二阶段雨带南侧孤立对流的发展,7日中午开始,安徽中南部有回波发展,并逐渐向东北方向移动,14时前后,在降水回波区南侧的滁州、南京附近开始有零散孤立的对流单体形成(图8b),此处正是地面流场中辐合线所在位置(图6a)。其中,南京北部的对流单体发展迅速,40 min后移至六合附近,对流单体已发展为超级单体风暴(图8c),速度场中伴有中气旋发展(图略),在其低层右后侧出现入流缺口和钩状结构(图8c中箭头处),从该单体垂直于入流方向的垂直剖面(图8d)可看出低层入

流处的弱回波区和位于其上的回波悬垂这一较为典型的超级单体垂直结构。另外,从反射率因子剖面还可看到,尽管15 dBz的反射率因子扩展到10 km,但45 dBz以上的强反射率因子区都在5 km以下,表明该超级单体风暴质心较低,这种低质心对流系统往往伴随强降水,事实上,自动站雨量(图略)监测到该超级单体所经之处均伴有短时强降水天气。16:00左右,超级单体东移至六合与天长交界处,产生了龙卷天气。1 h后,对流风暴移至高邮,随即在高邮的三个乡镇造成了龙卷天气。

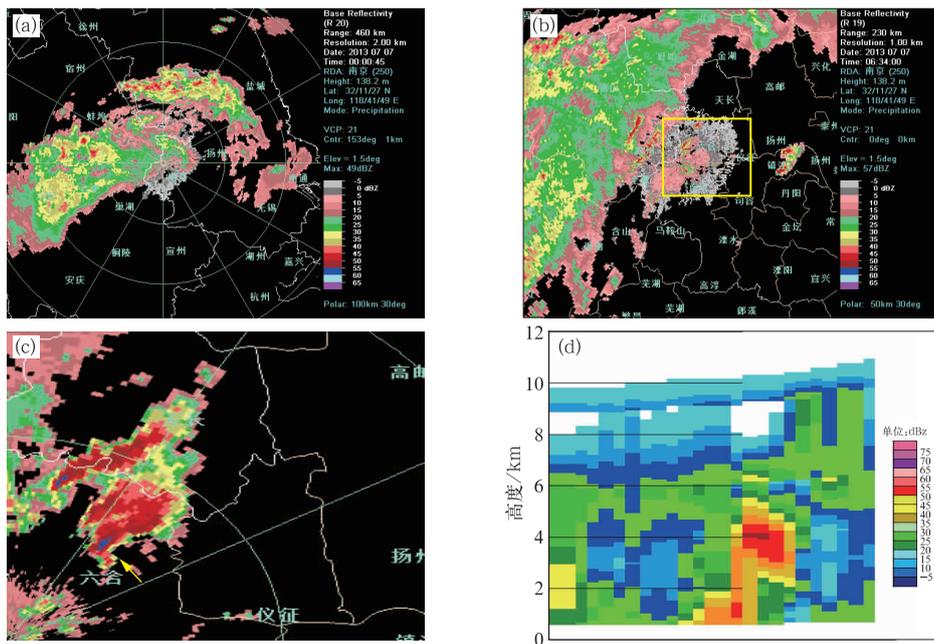


图8 基本反射率因子演变(1.5°仰角)

(a) 08:00时(460 km), (b) 14:34时(230 km), (c) 15:10时(230 km), (d) 反射率因子垂直剖面

Fig. 8 The variation of base reflectivity (1.5° elevation)

(a) 08:00 BT (460 km), (b) 14:34 BT (230 km), (c) 15:10 BT (230 km), (d) vertical profile of base reflectivity

#### 2.4.2 对流风暴内风场结构及中气旋的发展

对流风暴东移过程中逐渐发展,于7日16:00前后,17:00前后分别在天长秦栏镇、仁和集镇及高邮的三个乡镇产生了龙卷天气。从这两个时刻对流风暴的不同仰角基本反射率因子及速度场的结构特征可以看出,15:52,移至天长附近的对流风暴,低层沿入流一侧有入流缺口(图9a<sub>1</sub>~9a<sub>3</sub>),对应于入流缺口附近反射率因子的梯度大值区,速度场上可探测到具有一定伸展厚度的垂直于径向的紧邻正负速度对-中气旋(图9b<sub>1</sub>~9b<sub>3</sub>),此时,中气旋的速度切变增至 $44 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,这表明对流风暴内部风场中小尺度涡旋旋转增强,并导致了龙卷。1 h后,对流风暴移至高邮附近,风暴低层右后侧可见钩状结构

(图9a<sub>4</sub>~9a<sub>6</sub>),钩状回波前侧的入流缺口清晰,入流缺口之上是强反射率因子区。与钩状回波对应的是速度场中一对呈强烈气旋性旋转的速度对,被识别为中气旋和TVS(图9b<sub>4</sub>~9b<sub>6</sub>),此处也发生了龙卷天气。

#### 2.4.3 中气旋特征分析

此次系列龙卷过程是由同一个超级单体风暴产生的。图10a显示了超级单体风暴形成发展过程中内部风场中所伴随中气旋的移动路径。15:16,位于六合北部超级单体内部开始出现具有气旋性旋转的正负速度对,被识别为中气旋,最大切变值为 $24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (图10b),所在高度为3.1 km(图10c),中气旋底高2.1 km(图略),顶高伸展至6.3 km(图

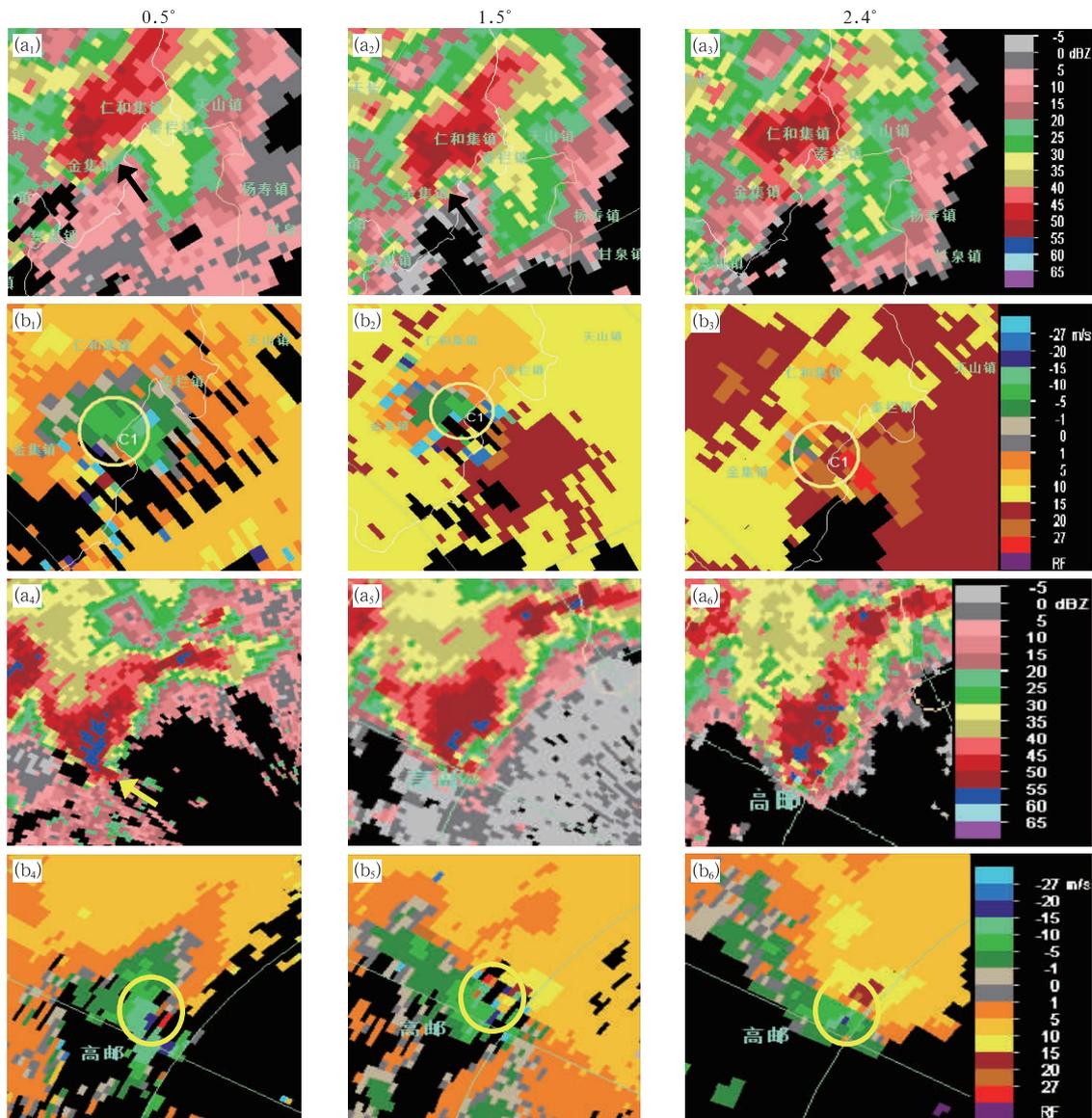


图 9 2013 年 7 月 7 日 15:52(a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>, b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>)和 16:55(a<sub>4</sub>~a<sub>6</sub>, b<sub>4</sub>~b<sub>6</sub>)  
基本反射率因子(a<sub>1</sub>~a<sub>6</sub>)及速度图(b<sub>1</sub>~b<sub>6</sub>)

Fig. 9 The base reflectivity (a<sub>1</sub>~a<sub>6</sub>) and velocity (b<sub>1</sub>~b<sub>6</sub>)  
at 15:52 BT (a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>, b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>) and 16:55 BT (a<sub>4</sub>~a<sub>6</sub>, b<sub>4</sub>~b<sub>6</sub>) 7 July 2013

略), 蕴含在超级单体内的中气旋快速向东北方向移动, 之后的两个体扫中, 中气旋的旋转强度变化较小, 甚至略微减弱, 15:34, 切变值增至  $34 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 底高有所下降, 雷达首次识别为 TVS, 但之后中气旋切变值又呈现出波状下降趋势, 切变值维持在  $20 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  附近, 15:58, 切变值突然从  $18 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  迅速增至  $44 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 随即, 在天长的两个乡镇出现龙卷。之后, 继续向东北方向移动, 中气旋强度有所减弱, 切变值维持在  $30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  附近, 1 h 后, 移至高邮附近, 中气旋切变值再次出现跃增, 由前一个体扫的  $27 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  增至  $43 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 结合

2.3.2 节分析可知, 受降水影响, 此前龙卷发生地附近地面锋区明显增强, 有利于锋区附近中小尺度对流系统发展, 改变地面风场分布, 促进局地涡散度的集中和发展, 与此时雷达探测的中气旋切变跃增相对应, 地面上龙卷发生地附近亦出现了强烈发展的小尺度的气旋性涡度中心, 导致高邮东北部的三个乡镇发生龙卷。从中气旋最大切变所在高度的演变来看(图 10c), 伴随在超级单体风暴中的中气旋最强旋转首先在中层开始, 然后向上和向下发展, 其生命史大部分时段最强旋转集中在 1~2 km 较低层次中。尽管超级单体风暴中伴有多个中气旋的发

展,但导致龙卷的中气旋维持最久,从形成至消亡近 2 个多小时,且该中气旋提前于龙卷发生约 40 min 出现,有较长的临近预警时效。研究表明(叶家东等,1993),旋转风暴比非旋转风暴系统经受的扩散效应和耗散效应小,且能量转换更为有效,有利于其生命史的维持。因此最初形成于降水区南侧的孤立超级单体风暴生命史维持 3~4 h 之久,最终产生了一系列龙卷天气。



在潮湿不稳定环境中,中气旋传播发展期间其强度并未呈现单一的持续发展特征,而是以一种波动的跳跃性方式发展,这可能与小尺度对流系统发展过程中所伴随的能量蓄积和释放(如第一次龙卷发生后切变值减弱)以及对流风暴所处的局地热动力环境的变化有关,如中气旋切变值的第二次跃增。但因环境场分析资料所限无法更细致地解释中气旋发展过程中所处的环境变化。

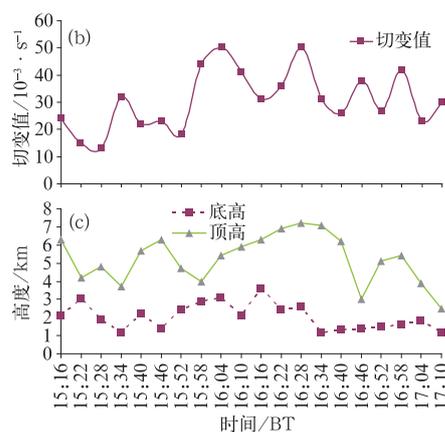


图 10 中气旋路径(a),最大切变值演变(b)及最大切变值所在高度(c)

Fig. 10 The route of mesocyclone (a), maximum value of mesocyclone shear (b), and height of the mesocyclone maximum value (c)

### 3 结论与讨论

通过对 10 例江苏梅雨期龙卷天气对应环境场资料的合成分析和特征对流参数的归纳提炼,并对 2013 年 7 月 7 日发生在天长——高邮一带的典型梅雨期龙卷个例对应风暴的形成和结构特征演变分析,得到如下结论:

(1)江淮梅雨期间,地面中尺度气旋的右侧附近(100 km)、对流层低层中尺度低涡右下方约 200~300 km 处和低空急流左后侧之间区域是发生龙卷的重点关注区间。

(2)梅雨期大气环流背景为龙卷发生提供了潮湿不稳定环境条件,龙卷发生前伴随有低层气旋性涡度的强烈发展,边界层内强的垂直风切变是龙卷风暴内气旋涡度迅速增强的重要条件之一,而对流层低层辐合将有利于初始对流的触发。

(3)对流参数定量分析进一步表明,龙卷生成发展所依赖的环境水汽、不稳定层结、气旋性涡度发展和辐合抬升等条件阈值远超气候平均状态,也异于冰雹、雷暴大风等其他强对流天气,特别是对流层低

层充沛的水汽和较强的垂直风切变条件对于龙卷而言至关重要,但与冰雹、雷暴大风相比较,此类龙卷对对流不稳定能量蓄积条件要求较低。文中所提炼的对流参数特征值及与气候平均值的差异性为龙卷天气的短期预报提供了参考依据。

(4)通过梅雨期强降水过程中伴随系列龙卷事件典型个例分析发现,引发龙卷的对流风暴起源于地面辐合线附近,地面辐合及中尺度锋区的增强,有利于对流风暴的快速形成发展。系列龙卷是由一个生命期较长对流风暴产生的,具有典型超级单体特征:伴有持续的中气旋特征;强的反射率因子核心,低层清晰的钩状结构;垂直结构上,具有弱回波区和回波悬垂结构。中气旋相关参数的演变对龙卷的临近预警有较高的参考价值,当中气旋底高较低且中气旋切变值明显增强时,龙卷天气发生的可能性较大。

本文开展的两部分工作,实际上是通过龙卷环境特征的诊断分析试图寻求梅雨期龙卷的短期预报指标和短临监测、预警判据。尽管通过分析对产生龙卷的环境条件和监测信息利用方面都有了进一步的认识和体会,但针对龙卷这一小概率、小尺度、

突发性较强的天气事件,环境场的分析和对流参数特征值的提炼,仅是提供了龙卷发生的潜在可能性,用以引起预报员的高度重视和关注,在此情况下,可再充分利用现代探测系统提供的多源、高时空分辨率资料及总结提炼的特征信息、识别判据等,及时捕获龙卷天气发生的前兆信息,开展有效跟踪、及时预警。

## 参考文献

- 樊李苗,俞小鼎. 2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 32(1): 156-165.
- 范雯杰,俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 41(7): 793-805.
- 郝莹,姚叶青,陈焱,等. 2007. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究. 气象, 33(1): 51-56.
- 蒋汝庚. 1997. 龙卷型强风暴-1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析. 应用气象学报, 18(4): 492-497.
- 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.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 3-253.
- 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 2009. 070703天超长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 35(10): 32-39.
- 雷蕾,孙继松,王国荣,等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 74(4): 752-765.
- 雷蕾,孙继松,魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象, 37(2): 136-141.
- 李耀东,刘健文,高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 62(4): 401-409.
- 庞古乾,伍志方,叶爱芬,等. 2012. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究. 热带气象学报, 28(4): 564-568.
- 沈树勤. 1996. 龙卷形成原因初探. 南京大学学报, 32(灾害专辑): 235-240.
- 孙继松,戴建华,何立富,等. 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册. 北京: 气象出版社, 282: 18-20.
- 孙继松,陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. 气象, 38(2): 164-173.
- 孙继松,杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的中尺度暴雨. 大气科学, 32(6): 1352-1364.
- 孙晶,楼小凤,胡志晋,等. 2007. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究. 大气科学, 31(1): 1-18.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225.
- 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.
- 吴国雄,蔡雅萍. 1997. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展. 大气科学, 21(3): 273-281.
- 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 53(4): 387-4043.
- 吴海英,沈树勤,蒋义芳,等. 2009. 龙卷诱发原因的实例分析. 气象科学, 29(3): 335-341.
- 王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象, 38(12): 1473-1481.
- 叶家东,范蓓芬,程麟生. 1993. 风暴和云动力学. 北京: 气象出版社, 944: 564-567.
- 姚秀萍,于玉斌,赵兵科. 2005. 梅雨锋云系的结构特征及其成因分析. 高原气象, 24(6): 1002-1011.
- 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.
- 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. 北京: 气象出版社, 1-314.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 2006b. 安徽一次强烈龙卷过程的多普勒天气雷达研究. 高原气象, 25(5): 914-921.
- 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.
- 曾明剑,王桂臣,吴海英,等. 2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究. 气象学报, 73(5): 868-882.
- 章国材. 2011. 强对流天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 337: 68-70.
- 张晰莹,吴迎旭,张礼宝. 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.
- 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.
- 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.
- 周宏伟,王群,夏文梅,等. 2011. 盐城一次龙卷短时强降水的地面中尺度分析和雷达回波特征. 大气科学学报, 34(6): 763-768.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar. Mon Wea Rev, 106: 29-38.
- Doswell C A. 2001. Severe Convective storms: An overview. Merteor Monogr, 50: 1-26.
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downburst in the context of general planetary scales. Mon Wea Rev, 38: 1511-1534.
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale meteorology in midlatitudes. USA: Wiley-Blackwell, 21-23.