

# 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析\*

杨波<sup>1</sup> 孙继松<sup>2</sup> 刘鑫华<sup>1</sup>

YANG Bo<sup>1</sup> SUN Jisong<sup>2</sup> LIU Xinhua<sup>1</sup>

1. 国家气象中心,北京,100081

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

1. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2018-04-23 收稿,2018-10-12 改回.

杨波, 孙继松, 刘鑫华. 2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析. 气象学报, 77(3):427-441

**Yang Bo, Sun Jisong, Liu Xinhua. 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(3):427-441**

**Abstract** Surface observations at minute-resolution from automatic weather stations, weather radar data from Yancheng, Huai'an, Yueyang and Jingzhou and the ECMWF ERA-Interim global high-resolution reanalysis data are used in this study. Characteristics of the circulation environment and structures of two supercells are comparatively analyzed. One supercell induced a tornado on 23 June 2016 and the other triggered a downburst on 1 June 2015. The results are as follows. (1) The two convective disasters occurred in similar circulation environments. The supercells with disastrous convective winds appeared to the east of the 850 hPa low vortex and in the warm zone to the left of the low-level jet. The distance between the center of the low vortex and the disaster area is about 600 to 700 km. In both cases, the convective available potential energy (CAPE) was higher than 2000 J/kg. However, features of the two wind disasters are different, i. e., the disaster in Funing was mainly caused by the tornado, and the accident of the "Eastern Star" on the Yangtze River was directly associated with the downburst. The relative position of maximum flash precipitation versus wind disaster is different in the two convective activities. The maximum flash heavy precipitation corresponding to the supercell center occurred on the left side of the moving direction of the tornado in Funing. The place where the ship capsized was coincident with the center of heavy precipitation during the severe convective weather. The position of the wind disaster relative to the instantaneous strong precipitation center is helpful for distinguishing downbursts from tornados caused by supercells. (2) The vertical wind shear of the environment has an important influence on the structure, development and maintenance of convective storm. The environmental vertical wind shear within 0–6 km reached  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  just before the occurrence of the tornado in Funing. The main body of the supercell tilted forward with height, corresponding to a strong inclined updraft and bounded weak echo region (BWER). However, the environmental vertical wind shear was only about  $2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  in Jianli, and the updraft of the storm cell was almost vertical. Before the tornado in Funing happened, the supercell with mesocyclone was first monitored in northwestern Jiangshu province, corresponding to the environment with strong vertical wind shear under 1.5 km and large storm relative helicity within 0–3 km. As the storm moved eastward with lower LCL (lifting condensation level), the bottom of the mesocyclone sank lower gradually, and the tornado formed finally. However, the 0–3 km relative storm helicity and 0–1.5 km vertical wind shear along the storm moving direction in Jianli were much weaker than that associated with the tornado in Funing. The bottom level of the mesocyclone in

\* 资助课题:公益性行业(气象)科研项目(GYHY201506006)、国家科技支撑计划项目(2015BAC03B04)、国家重点研发计划项目(2017YFC1502003)。

作者简介:杨波,主要从事强对流天气预报技术研究。E-mail: yangbo7625@163.com

通信作者:孙继松,主要从事天气预报技术和强对流天气机理研究。E-mail: sunjs\_0314@sina.com

the storm was not lower than 1.6 km, and the storm intensity was weak with a short duration of mesocyclone maintenance. (3) The vertical structure characteristic of environmental humidity is an important factor to distinguish different types of disastrous convective wind. During the storm activity in Jianli, observations collected at automatic weather stations show that the pressure evolution exhibited a cone-shape with rapid jumping up and dropping down while temperature kept decreasing. The pressure peak appeared four minutes earlier than the precipitation peak appeared. It was associated with strong evaporation of hydrometers when the deep dry environmental air in the mid-troposphere was entrained in the convective storm. For the disaster in Funing, the ground cold pool effect was relatively weak, corresponding to a very shallow dry layer in the middle level and a deep saturated atmosphere in the lower level of the environmental atmosphere.

**Key words** Disastrously convective wind, Supercell, Tornado, Downburst

**摘要** 采用分钟级加密自动气象站观测资料,盐城、淮安和岳阳、荆州雷达探测数据,以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)高分辨率的 ERA-Interim 全球再分析数据,对比分析了 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷灾害和 2015 年 6 月 1 日湖北监利下击暴流大风灾害的环境特征与超级单体的结构特征。结果表明:(1)两次强对流大风灾害发生在相似的低空环流背景下:风灾发生在低空急流出口区左侧的暖区内、850 hPa 低涡中心东侧 6—7 个经距的位置;环境大气的对流有效位能大于 2000 J/kg。但是风灾的类型不同,江苏阜宁大风灾害主要由超级单体龙卷造成,监利“东方之星”沉船事故主要是超级单体触发的下击暴流造成。短时强降水中心与风灾中心的相对位置不同:阜宁龙卷移动方向的左侧伴随着最强短时降水;湖北监利沉船事件发生期间,风灾中心与短时强降水中心基本重合。鉴于不同性质的对流大风位置与超级单体母体的中心位置对应关系上存在差异,通过比较地面观测的瞬时大风与瞬时强降水中心的相对位置将有助于区分强对流大风的性质。(2)环境风垂直切变强度对对流风暴结构、发展、维持有重要影响:阜宁龙卷发生时,其上空 0—6 km 风垂直切变达  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,超级单体有明显的向前倾斜结构,形成有界弱回波区;而监利强对流沉船位置 0—6 km 风垂直切变只有  $2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  左右,风暴单体中的上升气流近乎于垂直。阜宁超级单体中气旋,首先出现在 0—1.5 km 风垂直切变和 0—3 km 风暴相对螺旋度带状大值区,在向抬升凝结高度更低的环境移动过程中,其底部不断下降,形成龙卷;而在监利沉船区,中低层风切变和风暴相对螺旋度相对要弱得多,对应风暴单体中的中气旋强度、持续性较弱,中气旋底部高度维持在 1.6 km 左右。(3)环境湿度垂直结构特征不同可能是风暴单体形成不同类型灾害大风的重要环境因子。监利下击暴流造成的风灾发生时,在地面气温迅速下降过程中,气压变化呈现快速跳升又快速下降的“尖锥”形,气压峰值比降水峰值提前 4 min 出现。它与对流层中高层环境大气中较为深厚的干空气卷入对流风暴中造成水物质强烈蒸发、冷却过程有关。而阜宁风灾过程中,环境大气中层仅存在非常浅薄的干层,加之低层较为深厚的饱和大气环境,对应的地面冷池效应相对较弱。

**关键词** 大风灾害, 超级单体, 龙卷, 下击暴流

**中图法分类号** P458

## 1 引言

强对流天气是中国夏季主要的灾害性天气,包括短时强降水、雷暴大风、冰雹、龙卷等。陶诗言等(1979)和丁一汇等(1981)通过物理量的诊断分析指出,暴雨和强对流在水汽和环流特征方面存在一些差异,并指出中、上层的冷平流对强对流天气有非常重要的作用。随着观测资料的增多,特别是雷达观测资料的普及,人们发现龙卷、雷暴大风、冰雹、短时强降水等强对流天气现象很多与超级单体风暴有关。超级单体风暴概念最早由 Browning(1962)提出,后来被定义为具有中气旋特征、发展旺盛的对流单体(Browning, 1978; Moller, et al, 1994; Do-

swell III, 2001)。针对中国的超级单体风暴,中国气象工作者就其生成环境和结构特征开展了大量研究,吴芳芳等(2013)通过 72 个个例统计了江苏北部地区超级单体风暴发生的环境条件和多普勒天气雷达回波特征;吴海英等(2017)则对长生命史的超级单体结构特征与形成维持机制进行了研究;潘玉洁等(2008)、戴建华等(2012)、伍志方等(2014)对飊线系统中的超级单体环境条件与演变特征做了细致分析。龙卷一般发生在超级单体风暴中,但是超级单体发生的频数远大于龙卷,即大多数超级单体风暴并不会产生龙卷。有、无龙卷的超级单体在环境特征和结构演变上是否存在明显差异,是龙卷预报、预警面临的首要科学问题。姚叶青等(2012)在统计分

析安徽省 128 次龙卷个例后发现,发生龙卷时,环境大气的中、低层比湿,中、低层风垂直切变,风暴相对螺旋度等物理量的数值均比发生冰雹、雷雨大风时更大;郑媛媛等(2015)对 10 次台风外围云带中的龙卷过程进行统计分析发现,这类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;曾明剑等(2016)对近十年江苏梅雨期龙卷天气的环境特征进行合成分析指出,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 200—300 km 处和低空急流左后侧之间区域是龙卷易发区。俞小鼎等(2008)、郑媛媛等(2009)针对江淮地区的龙卷超级单体风暴的雷达回波结构演变特征进行过较为详细分析。上述研究表明,较高的对流有效位能和风垂直切变有利于超级单体生成,但不同环境条件可能造成超级单体结构形态有较大差异,其引发的强对流现象也不尽相同,如多数飚线超级单体伴有干冷空气侵入,而龙卷超级单体对低层风切变和抬升凝结高度要求更高。

雷暴大风是中国暖季灾害性大风的另一主要类型,在缺乏直接观测记录和现场灾情调查的情形下,有些造成重大灾害的雷暴大风,特别是相对孤立的雷暴系统造成的小范围大风灾害可能存在被误认为是龙卷灾害的情况。因此,如何利用有限的观测资料识别和预警强对流天气过程中的龙卷大风和雷暴大风也是实际天气业务中面临的巨大挑战。费海燕等(2016)对 10 年的中国强雷暴大风的气候特征和环境参数进行统计分析,指出中国强雷暴大风环境参数中低层风垂直切变中等,明显低于美国大范围雷暴大风的均值,且中层存在明显的干层;王秀明等(2013)通过数值模拟指出,在深层垂直切变较弱、中低层风垂直切变较强的配置下,低层湿度成为风暴结构的决定因素,较高湿度环境下容易形成高度组织化的飚线,其中的风暴单体常常可看到中气旋;低湿度环境下更容易出现组织程度较差的一般单体和脉冲风暴。

中国江淮、江南和华南地区的暖季,由于环境水汽充盈,龙卷和雷暴大风发生时常常伴随有短时强降水,对流环境条件存在一些相似特征,在缺乏直接观测证据的情况下,判断风灾的“致灾”主体时可能

出现误判,导致灾害信息混乱。2015 年 6 月 1 日 21—22 时(北京时,下同)长江湖北监利段发生短时强降水和“疑似龙卷”的风灾事件,造成正在长江航道上运营的“东方之星”客轮翻沉,442 人遇难;事后灾害调查表明,这次大风事件主要是下击暴流造成的(郑永光等,2016b;Meng, et al,2016)。2016 年 6 月 23 日 14—15 时江苏阜宁县发生了历史罕见的 EF4 级龙卷极端天气(张小玲等,2016;郑永光等,2016a),造成 99 人死亡,846 人受伤。这两次风灾过程中都观测到明显中气旋特征的超级单体。针对这两次典型个例,本研究试图就以下两个问题展开分析:与短时强降水相伴随的这两次极端对流性风灾过程在环流特征上是否存在差异?这些差异是如何影响对流风暴结构演变进而形成不同类型的大风灾害?这些问题是超级单体风暴及其对应的不同类型大风灾害天气预报、预警的核心问题。如何从各种观测资料中快速提取信息,相互佐证,快速判断更小尺度灾害大风的性质也是本研究的目的之一。

## 2 资料和方法

采用 2016 年 6 月 23 日 14—15 时、2015 年 6 月 1 日 20—21 时风灾区附近的分钟级加密自动气象站观测资料、逐 6 min 的盐城、淮安与岳阳、荆州雷达数据,2016 年 6 月 23 日、2015 年 6 月 1 日欧洲中期天气预报中心(ECMWF)高分辨率的 ERA-Interim 全球再分析数据。

由于缺乏时、空分辨率更高的三维流场观测资料,采用双雷达风场反演技术构建中尺度流场(罗昌荣等,2012)。不同的研究表明,该方法具有较高的反演精度。罗昌荣等(2012)采用高分辨率 WRF 模式的模拟风场作为理想风场,对 2010 年 6 月 18 日的闽北大暴雨过程的反演风场进行检验,发现在 8 km 以下的水平风速的平均绝对误差在 0.6 m/s 以下,垂直风速的平均绝对误差在 0.4 m/s 以下,8 km 以上误差略大, $u$ 、 $v$  的平均绝对误差为 1—2 m/s, $w$  的平均绝对误差为 0.5—1 m/s。周海光等(2002)采用三维风暴模式模拟值作为理想风场,与双雷达反演风场开展对比分析,同样发现在 8 km 以下,水平风速的均方根误差和离差较小,相对离差小于 15% 的占 70%,随高度升高均方根误差和离

差有增大趋势。

### 3 阜宁、监利强对流灾害性大风过程的观测特征

图1为2016年6月23日14时26分盐城雷达0.5°仰角的回波强度与经过退模糊处理的径向速度。可以看到典型龙卷超级单体特征的钩状回波,钩状回波区存在旋转速度为26 m/s左右的中气旋。中气旋的演变是龙卷预警的重要指标之一(David-Jounes, et al, 2001),跟踪盐城雷达观测的中气旋发现,在龙卷生成地附近从13时28分开始监测到中

气旋,其中14时19—36分中气旋底部高度均低于1000 m,14时31分前后,水平风速切变达到 $80 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (图略)。其中14时08—54分中气旋呈现出典型的龙卷涡旋特征(TVS):龙卷涡旋特征底部高度不断下降,从850 m一直降至520 m,14时26分,径向速度可识别的最大旋转风速差达到75 m/s,位于约640 m高度上,此时龙卷发展到最强,破坏力也最大。在中气旋影响区域,阜宁县西南部长25 km、宽10 km的范围内,有5个地面自动气象站监测到瞬时风超过8级,14时29分在阜宁县新沟镇出现34.6 m/s的最大风速。

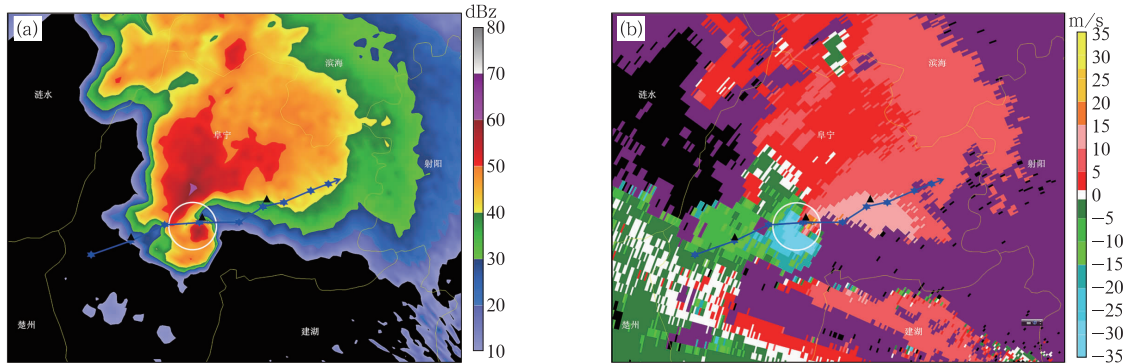


图1 2016年6月23日14时26分0.5°仰角的盐城雷达回波强度(a)与经退模糊处理的径向速度(b)  
(图中白色圆圈为中气旋位置,蓝色六角星为14时08—54分龙卷位置,蓝色线条是龙卷移动路径,箭头是龙卷移动方向,黑色三角形是区域自动气象站位置,自左向右分别是板湖镇初级中学、新沟镇农业示范园、金沙湖景区)

Fig. 1 Radar echoes at 0.5° elevation in Yancheng at 14:26 BT 23 June 2016

(a. echo intensity, b. dealiased radial velocity; the white circle indicates the location of the mesocyclone, the blue hexagons denote the tornado positions during 14:08–14:54 BT, the blue lines show the tornado moving track, the arrows indicate the tornado moving direction, the black triangles indicate automatic weather stations positions, i. e., from left to right, Banhuzhen Junior Middle School, Xingouzhen Agricultural Demonstration Garden, Jinshahu Scenic Spot)

在此次龙卷事件中,龙卷在移动过程中从3个区域自动气象站(无气压监测)附近经过(图2)。龙卷分别于14时14分左右经过板湖镇初级中学站附近,25分左右经过新沟镇农业示范园站附近,36分左右经过金沙湖景区站附近。其中板湖镇初级中学站和新沟镇农业示范园站离龙卷路径更近,而金沙湖景区站位于龙卷路径的北侧,距离相对稍远。在龙卷接近各站附近以前,3个自动站均为偏东风,且风速较小,瞬时最大风速在8 m/s以下,在龙卷经过各站附近期间,风向近似于气旋式(逆时针)快速变化:风向先后依次为东、东北、北、西北、西南,然后

变为很弱的西北风;当龙卷靠近各站时,风速突然增大,而后快速减弱。整个龙卷移动期间,3站的分钟雨量均不大,且历时较短,基本集中在龙卷经过的十几分钟内;在龙卷发展早期,经过板湖镇初级中学站附近(图2a),气温15 min下降1.2℃;最大瞬时风速从5 m/s增强至22 m/s左右;分钟雨强较小,最大0.8 mm;在龙卷发展最强盛时期,经过新沟镇农业示范园站附近(图2b),气温15 min下降2.7℃(随后15 min迅速回升近1.0℃);最大瞬时风速从6 m/s猛增至34 m/s;分钟雨强最大达2.6 mm,但持续时间较短。在龙卷发展中后期,在靠近金沙湖

景区站附近(图 2c)时,该站气温 15 min 内下降了 1.4℃;最大瞬时风速从 6 m/s 增强至 19 m/s。由于该站位于龙卷路径的北侧,更靠近超级单体母体,相对前两个观测站分钟雨量持续时间较长,分钟雨强达到 0.5 mm 的持续时间为 10 min。

图 3 为 2015 年 6 月 1 日 21 时 21 分岳阳雷达

0.5°仰角的回波强度与退模糊的径向速度。监利附近有一条飚线系统向东南方向移动,在飚线系统中,有多个对流单体活动,其中对流单体 A 和 B 的后侧均监测到伴随的中气旋(图 3 中白色圆圈),底高分别是 1.6 和 2.9 km,水平风切变为  $17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。径向速度(图3b)上,在对流单体 A 的

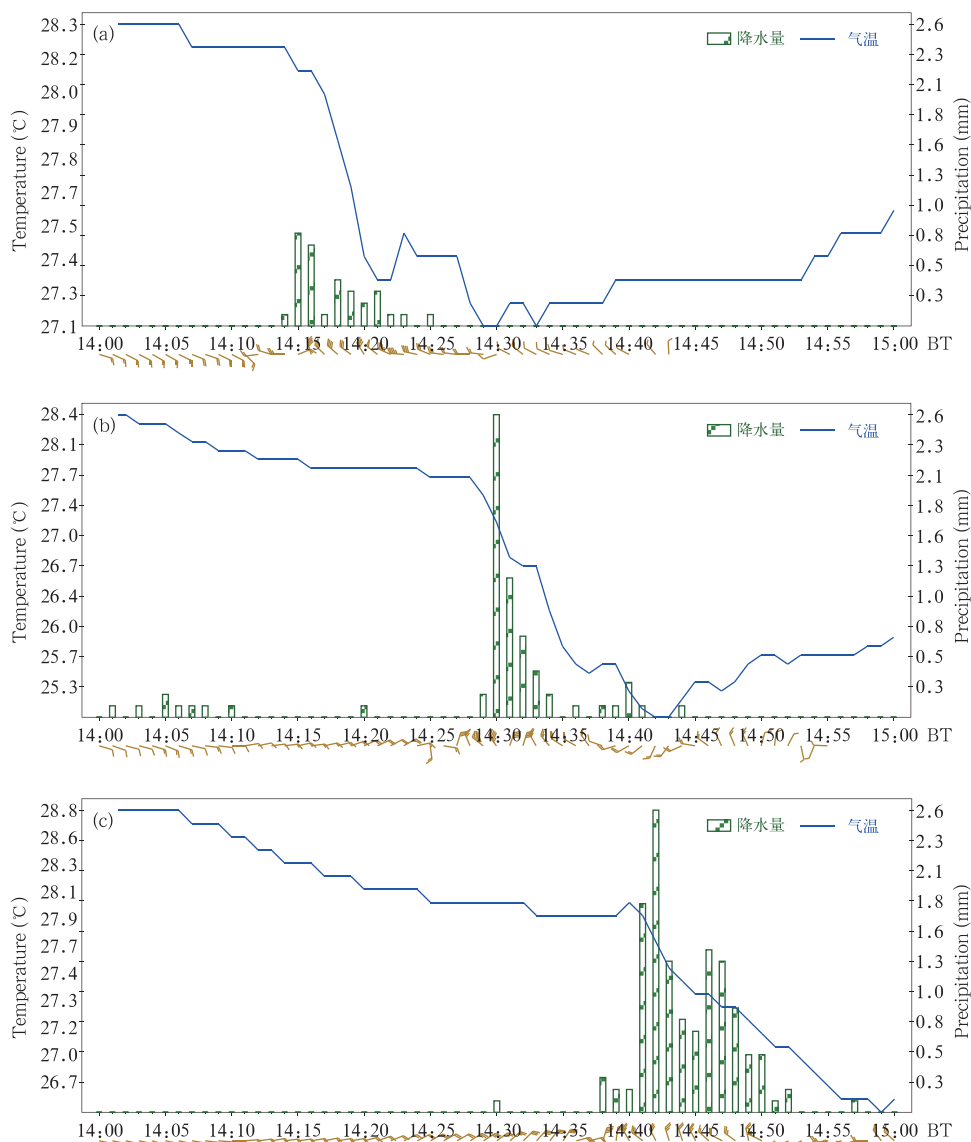


图 2 2016 年 6 月 23 日 14—15 时区域自动站气象要素逐分钟气温(蓝色实线,单位:℃)、降水量(柱状图,单位:mm)和一分钟瞬时最大风(风矢,单位:m/s)演变  
(a. 板湖镇初级中学站, b. 新沟镇农业示范园站, c. 金沙湖景区站)

Fig. 2 Time series of temperature (blue lines, unit: °C), precipitation (histograms, unit: mm) and instantaneous maximum wind (barbed arrow; unit: m/s) at 1 minute intervals during 14:00 – 15:00 BT 23 June 2016

(a. Banhuzhen Junior Middle School, b. Xingouzhen Agricultural Demonstration Garden, c. Jinshahu Scenic Spot)

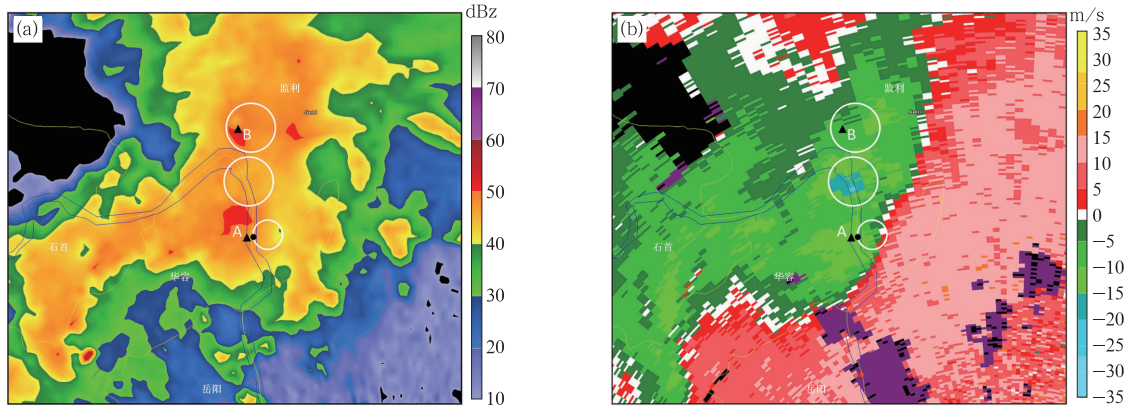


图3 2015年6月1日21时21分0.5°仰角的岳阳雷达回波强度(a)与径向速度(b)  
(黑色圆点是沉船位置,黑色三角为自动气象站位置,字母A、B分别对应两个对流单体,  
白色圆圈是主用户处理器识别的中气旋)

Fig. 3 Radar echoes at 0.5° elevation in Yueyang at 21:21 BT 1 June 2015

(a. echo intensity, b. radial velocity; the black dot shows the location of the wreck, the black triangles indicate automatic weather stations locations, the letters A and B correspond to the two convective storms, and the white circle denotes the mesocyclone identified by the Principal User Processor (PUP))

左后侧,有一极大风速核,风向指向雷达,为偏北大风,其最大径向风速达 22.5 m/s,该最大风速核于 21 时 26 分移至沉船位置(图 3 中黑色圆点);此外,飑线系统后侧还存在明显的后侧入流缺口,这是中层干空气通过后侧入流被卷入对流系统中造成较为强烈的蒸发作用形成的,低层最强的辐散下沉气流位于强雷暴单体的后部,在近地面层形成下沉大风(下击暴流),这与经典的倾斜雷暴的动力学结构一致(Doswell III, 2001)。行船记录表明,向北前进中的“东方之星”于 21 时 24 分在强风的作用下开始出现倒退现象,并于 21 时 32 分倾覆,表明船体主要是受到了极强偏北大风的影响而发生倾覆的,这与低仰角雷达径向风观测一致。

由于这次风灾发生区域的地面全要素气象观测站相对稀疏,并未监测到明显的阵性大风,但是从邻近灾害地点的地面气象要素的演变特征可以推断出,附近区域发生过下击暴流。距离沉船发生地点最近的观测站(友谊机埠,图 3 中邻近沉船位置的黑色三角)是一个只有温度、降水的两要素自动气象观测站(时间分辨率为 10 min),从逐 10 min 气温和降水量(图略)可以看到,21 时 10—40 分气温急降了 3℃,雨强也从 0.9 mm/(10 min)猛增至 22 mm/(10 min),沉船发生在降水突然增强期间(21 时 24—32 分)。由沉船上游的监利站(图 3 中邻近对流单体 B 位置的黑色三角)逐分钟要素变化(图 4)

可见,21 时 00—30 分存在气压跳升陡降、风向逆转和气温陡降等现象,温度下降了 3℃并维持在低位,风向从西风转为东风,随着降水逐渐增强,气压于 21 时 07—17 分跳升了 2.4 hPa,随后于 21 时 17—29 分又快速下降了 2.1 hPa,气压峰值比降水峰值提前 4 min 出现。

发生在阜宁和监利的极端强对流风灾过程均伴随着短时强降水,由于风灾形成机制不同,风灾地点与强降水中心的相对位置亦不同。图 5a 为阜宁龙卷发生期间以 14 时 26 分龙卷涡旋特征为中心周围 100 km×100 km(定义为区域 A)范围 1 h(14—15 时)的降水分布:在此期间,最大小时降水量为 56 mm。根据盐城雷达 14 时 08—54 分连续的主用户处理器产品识别的龙卷涡旋特征(其底高均在 800 m 以下)确定的龙卷移动路径,发现龙卷移动路径在强降水区的外侧,与最大小时强降水中心约有 30 km 的距离。再仔细对比分析逐 10 min 雨强中心与龙卷的相对位置发现,在龙卷移动路径左侧(北侧)的几千米距离,伴随有瞬时雨强极大值,其强度为 15—20 mm/(10 min),即最大小时雨强中心与最大瞬时雨强中心并不重合,最大小时雨强中心主要是由于对流风暴外侧持续性降水造成的,反映的是超级单体母体的总体降水效率。此外,根据目击者报告,在龙卷移动路径的左侧(北侧)陈集镇和阜宁县发现有冰雹,离龙卷中心约 4—6 km,即冰雹位置

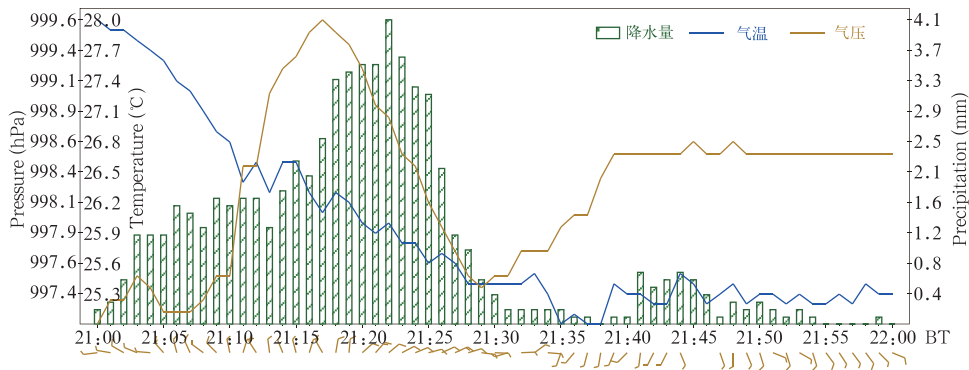


图 4 2015 年 6 月 1 日 21—22 时监利地面自动站气象要素逐分钟  
气温(蓝色实线,单位:℃)、气压(棕色实线,单位:hPa)、  
降水量(柱状图,单位:mm)和风(风矢,单位:m/s)演变

Fig. 4 Time series of temperature (blue lines, unit: °C), station pressure (brown lines, unit: hPa), precipitation (histograms, unit: mm) and wind (barbed arrow, unit: m/s) at 1 minute intervals at Jianli automatic weather station during 21:00 – 22:00 BT 1 June 2015

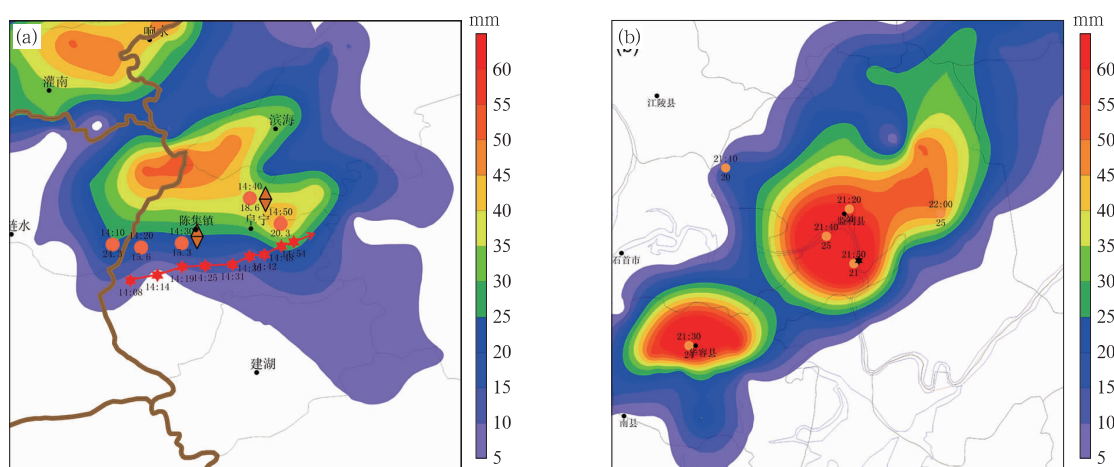


图 5 (a)2016 年 6 月 23 日 14—15 时阜宁强对流降水分布

(色阶为 1 h 降水量;红色六角星为龙卷移动位置,红实线为龙卷移动路径,箭头为移动方向,下标为时间;橙色圆为 10 min 雨强极大值,上标是时间,下标为 10 min 降水量,单位:mm;橙色菱形是目击冰雹所在位置),

(b)2015 年 6 月 1 日 21—22 时监利强对流降水分布

(色阶为 1 h 降水量;黑色六角星为沉船位置;橙色圆形为 10 min 雨强极大值,上标为时间,下标为 10 min 降水量,单位:mm)

Fig. 5 (a) Convective precipitation distribution in Fujing between 14:00 – 15:00 BT 23 June 2016

(shadings show 1 hour precipitation; red hexagons denote the tornado track; subscripts are for time; orange dots indicate 10 minute rainfall maximum and the superscripts are for time while the subscripts show 10 minute accumulative precipitation with unit of mm; orange diamonds are locations of eyewitnesses of hail);

(b) convective precipitation distribution in Jianli during 21:00 – 22:00 BT 1 June 2015

(color shadings indicate 1 hour precipitation; the black hexagons show the position of the wreck; orange dots are 10 minute rainfall maximum. The superscripts are for time, and the subscripts indicate 10 minute accumulative precipitation with unit of mm)

非常接近最大瞬时雨强中心。图 5b 是以监利沉船为中心周围  $100\text{ km} \times 100\text{ km}$  (定义为区域 B) 范围内 21—22 时的降水分布。在此期间,大风灾害附近的强降水强度远大于阜宁龙卷,最大小时降水量达到  $97\text{ mm}$ ,沉船位置正好在强降水的核心区域,逐  $10\text{ min}$  雨强也基本集中在该核心区域,其瞬时强度为  $21\text{—}25\text{ mm}/(10\text{ min})$ 。即最大小时雨强中心与最大瞬时雨强中心基本重合,最大雨强的位置随着对流系统自西北向东南方向移动。

风灾地点与强降水中心的相对位置不同,是由于不同类型大风与超级单体母体中心的相对位置决定的:阜宁龙卷形成于超级单体前侧入流缺口(即钩状回波)边沿,其最强降水回波(与瞬时降水强度相对应)位于龙卷移动方向的左侧(即北侧,图 5a);而在最大反射率的更外侧,虽然瞬时降水强度有所减弱,但是降水持续时间较长,故小时累积降水量更大,因而地面龙卷大风中心与强降水中心有  $4\text{—}6\text{ km}$  的位置偏差。在监利沉船事件中,湿下击暴流是与超级单体中强烈的下沉气流相对应的,其形成机制主要与云中强烈蒸发下沉作用和大雨滴的拖曳作用有关(Johns, et al, 1992; 王秀明等, 2013; 吴举秀等, 2017),因此,地面大风更靠近超级单体中心位置(对应雷达回波最大反射率),即更靠近强降水中心。

#### 4 超级单体的流场结构特征对比

图 6a 为 2016 年 6 月 23 日 14 时 20 分地面风场,在阜宁县南部有一个明显的辐合区,其范围约  $10\text{ km}$ ,龙卷正是在该辐合区内自西向东移动。图 6b 采用盐城、淮安两部雷达(两者距离约  $110\text{ km}$ )探测资料进行三维拼图实现的回波拼图和退模糊后速度场的反演(罗昌荣等, 2012)。可见 14 时 26 分在阜宁县中部有明显的钩状回波特征,  $2\text{ km}$  高度上,存在大于  $15\text{ m/s}$  的东南气流指向钩状回波缺口区;钩状回波顶端和后侧,分别存在大于  $20\text{ m/s}$  的南风气流和西风气流的,即在钩状回波的缺口区存在极强的水平辐合运动,其散度达到  $-130 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,龙卷正位于辐合的中心。从单站雷达经过龙卷涡旋特征中心所做的回波剖面(图略)可以看到,对流风暴顶高达  $15\text{ km}$ ,  $60\text{ dBz}$  的回波高度约  $10\text{ km}$ ,对流

活动非常旺盛。由于  $0\text{—}6\text{ km}$  环境风垂直切变较大(图 9a),对流随高度向前倾斜并形成有界弱回波区(BWER),呈现出典型超级单体结构。图 6c 和 d 为 14 时 26 分分别沿  $33.71^\circ\text{N}$  (经过龙卷涡旋特征中心)和  $119.73^\circ\text{E}$  所做的东西向(近似风暴单体的移动方向)和南北向剖面。东西方向上,在超级单体缺口区后侧存在一个宽约  $5\text{ km}$ ,高约  $10\text{ km}$  的倾斜垂直环流圈,中、低层存在强烈的辐合,  $5\text{ km}$  辐合中心强度达到  $-180 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,辐散中心则对应回波悬垂区的下沉支,高度较高,约在  $10\text{ km}$ ,强度达到  $210 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。在南北向的垂直环流圈的尺度相对较小(图 6d),回波缺口对应的弱回波区是一支非常狭窄的强上升气流,其北侧  $3\text{—}4\text{ km}$  的位置对应下沉气流,环流中心位于  $5\text{ km}$  高度;其北侧  $10\text{ km}$  宽度内对应着  $50\text{—}60\text{ dBz}$  的强降水回波,高度逐渐下降,强回波中心越低,地面有效降水强度越大。龙卷发生在狭窄的上升气流中,而最大的瞬时降水强度与雷达最大反射率对应,这与阜宁龙卷移动路径左(北)侧的  $10\text{ km}$  范围内总是伴随最大瞬时雨强的观测记录一致。上述分析表明,建立在业务观测雷达分辨率基础上的流场反演技术,能够较为清晰地揭示超级单体系统的三维流场特征,但是描述龙卷这类更小尺度系统的精细结构特征可能需要更高分辨率的观测手段和技术。

图 7 为基于岳阳、荆州两部雷达(距离约  $148\text{ km}$ )探测资料所做的 2015 年 6 月 1 日监利沉船事件对应的回波拼图和退模糊后速度场的反演。21 时 20 分(图 7a),湖北南部至湖南北部有一沿西北—东南走向的飚线,此时监利沉船区位于一个超级单体的前侧,从  $2\text{ km}$  高度风场上可以看到,沉船区前侧存在明显的西南风和西北风辐合,最大西南风的风速超过  $40\text{ m/s}$ ,辐合强度达  $-80 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,在对流单体的北侧存在一个水平辐散中心,离沉船位置大约  $4\text{ km}$ 。从 21 时 26 分穿过沉船位置( $29.72^\circ\text{N}, 112.92^\circ\text{E}$ )的南北向剖面(图 7b)可以看到,它与龙卷超级单体在流场结构上存在显著区别:超过  $50\text{ dBz}$  的回波高度比龙卷超级单体低,约  $7\text{ km}$ ,入流一侧存在高度较低的下沉结构;与低空强烈的西南风入流对应,在对流单体的南侧是一支近乎于垂直的深厚上升气流,对流单体的后侧(北侧)对应着强烈的、向下散开的下沉气流(红色虚线对应的三角形区域),这与图 7a 中  $2\text{ km}$  高度上,雷



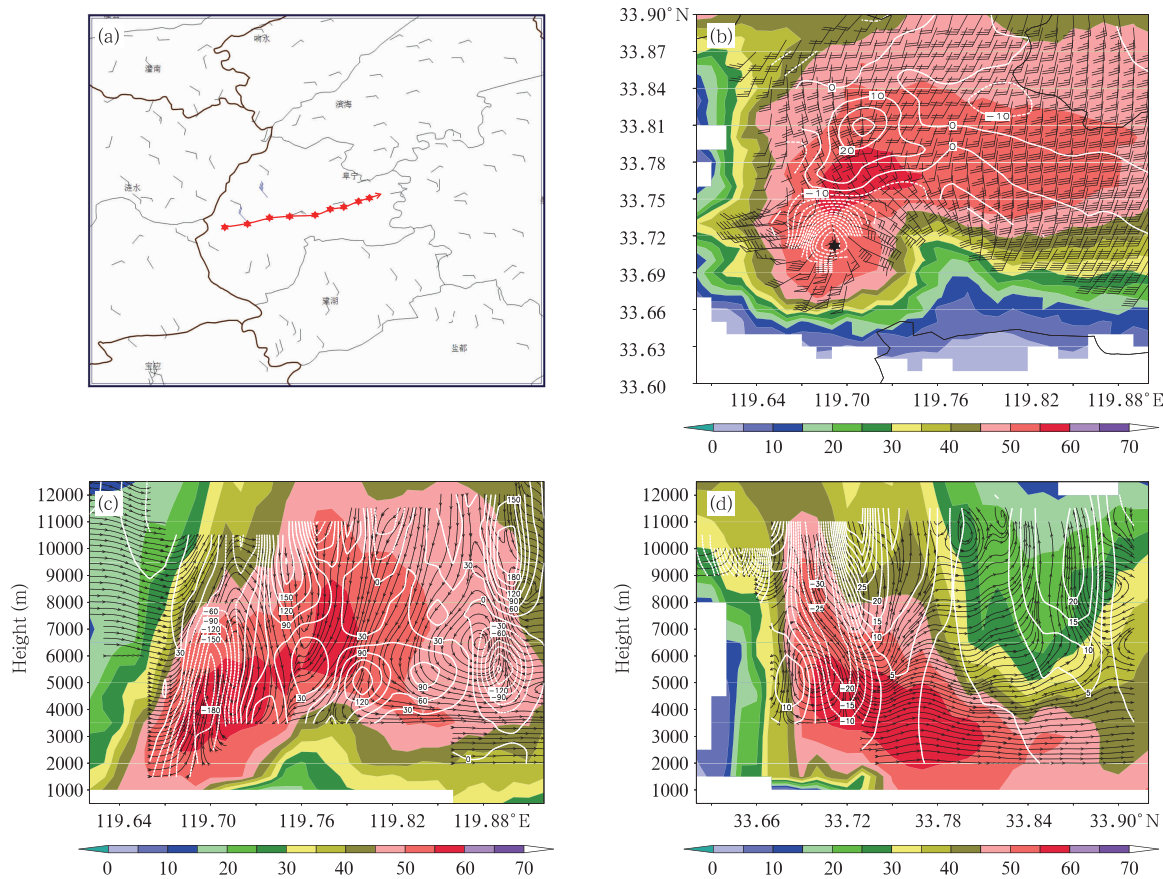


图6 2016年6月23日(a)14时20分地面风场(红色六角星为龙卷位置,红色线条为龙卷移动路径,箭头为移动方向),(b)14时26分盐城、淮安雷达拼图与速度反演场(2 km高度上回波(色阶,单位:dBz,黑色六角星为龙卷位置)、散度(白线,单位: $10^{-3} s^{-1}$ )和风矢量(单位:m/s)),(c)沿33.71°N东西向回波(色阶)、流场与散度剖面;(d)沿119.73°E南北向回波(色阶)、流场剖面和垂直速度(白线,单位:m/s)

Fig.6 (a) Surface wind field at 14:20 BT 23 June 2016 (red hexagons are for the tornado positions, red lines show the tornado moving track, arrows indicate the tornado moving direction); (b) - (d) radar mosaic and retrieved velocity fields at Yancheng and Huaian at 14:26 BT 23 June 2016 (b. echo at 2 km height (unit: dBz) and wind (unit: m/s) and divergence(white lines, unit:  $10^{-3} s^{-1}$ ); c. cross section along 33.71°N of east-west direction echoes and flow field and divergence (white lines, unit:  $10^{-3} S^{-1}$ ); d. cross section of echo and flow field and vertical velocity (white lines, unit: m/s) in the south-north direction along 119.73°E)

暴北侧的水平辐散气流一致。

### 5 超级单体环境特征对比

风暴系统的发展维持、形态演变以及对流天气现象,与环境层结状态和风垂直切变关系密切 (Johns, et al, 1987;王秀明等,2012;陈涛等,2012;孙继松等,2012;郑永光等,2017),它们是预判对流天气现象的重要参考因素。2016年6月23日江苏阜宁龙卷超级单体与2015年6月1日湖北监利下

击暴流超级单体所表现出来的差异是否与不同的环境特征有关?或者说,环境条件在多大程度上影响着单体结构演变和对流特征?

2016年6月23日江苏阜宁龙卷灾害和2015年6月1日湖北监利长江沉船灾害发生在非常相似的低空环流背景下,大风灾害均发生在850 hPa低涡的东侧,距离低涡中心6—7个经距,位于低空急流出口区的左侧暖区内(图8a、8b)。

一般认为,有利于超级单体风暴的环境条件需

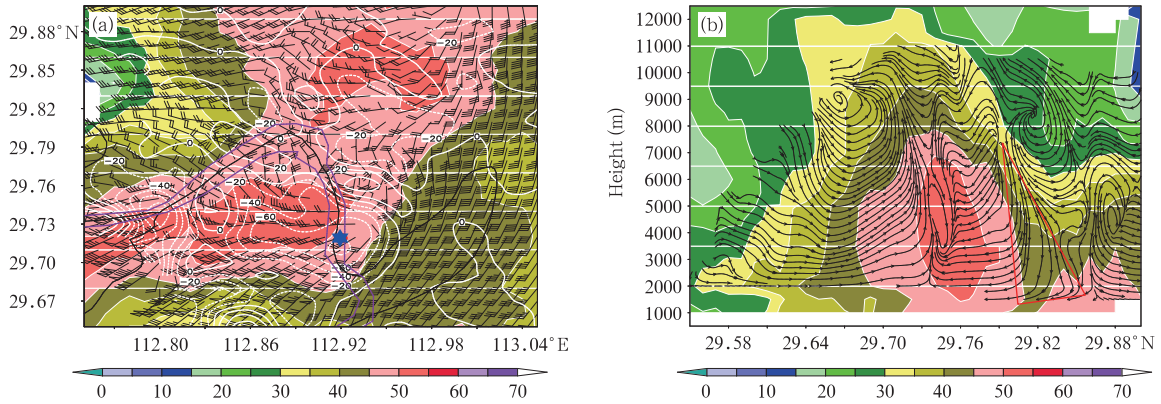


图7 2015年6月1日岳阳、荆州雷达组合拼图

(a. 21时20分2 km高度上回波(色阶,单位:dBz)、流场和散度(白线,单位: $10^{-3} s^{-1}$ ), 蓝色六角星为沉船位置;b. 21时26分雷达拼图沿112.92°E南北剖面)

Fig. 7 Radar mosaic at Yueyang and Jingzhou

(a. Echoes (shaded, unit: dBz) and flow field and divergence (white lines, unit:  $10^{-3} s^{-1}$ ) at 2 km height at 21:20 BT 1 June 2015. The blue hexagon shows the location of the wreck;  
b. cross section along 112.92°E of radar echo at 21:26 BT 1 June 2015)

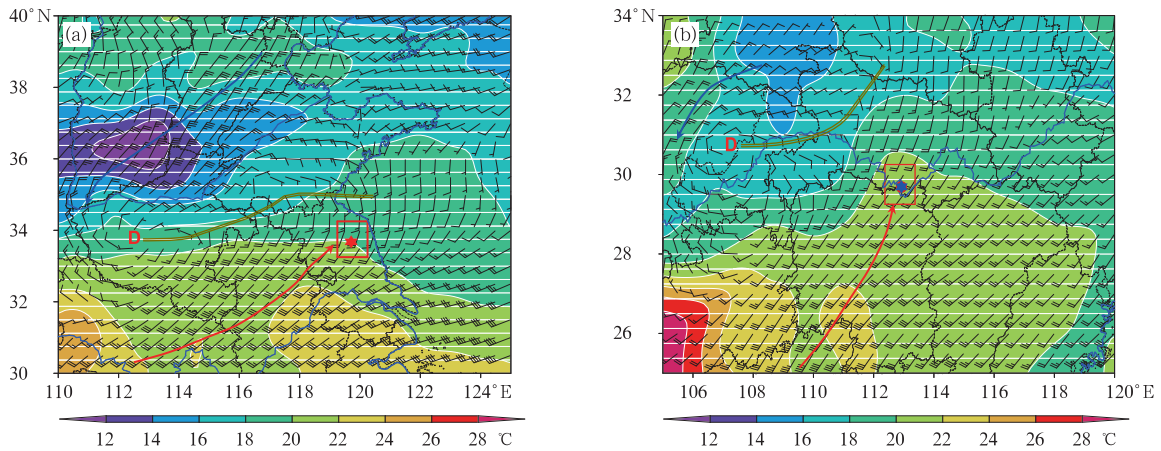


图8 850 hPa 温度(色阶)和风电

(a. 2016年6月23日14时,红色矩形为区域A,红色六角星为14时26分龙卷位置,D是低涡中心, 红线是南风急流,蓝线是北风急流,灰色双实线是风切变;b. 2015年6月1日20时, 红色矩形为区域B,蓝色六角星为沉船位置,其他说明同图a)

Fig. 8 (a) 850 hPa temperature (shaded) and wind field at 14:00 BT 23 June 2016

(the red rectangle indicates region A, the red hexagon shows the tornado position at 14:26 BT,

D is the center of the low vortex, the red line indicates the southerly wind jet, the blue line indicates the northerly wind jet, and the gray double line shows the wind shear);

(b) 850 hPa temperature (shaded) and wind field at 20:00 BT 1 June 2015

(the red rectangle indicates region B, the blue hexagon denotes the wreck position, other symbols are the same as in (a))

要有较大的对流有效位能和0—6 km内强的风垂直切变(Brooks, et al, 2003; 俞小鼎等, 2006, 2008)。对比风灾发生区域0—6 km环境风垂直切

变可以看到,龙卷发生位置上空的矢量风垂直切变为 $4 \times 10^{-3} s^{-1}$ (图9a),而监利沉船区仅有 $2.3 \times 10^{-3} s^{-1}$ (图9b)。强的风垂直切变有利于风暴单体

垂直结构发生倾斜,形成悬垂结构(有界弱回波结构),这是超级单体发展维持的重要条件之一。从中气旋的监测来看,阜宁强对流过程的中气旋持续时间更长,单体的组织化程度也更高,这也证实了环境风垂直切变对对流风暴结构、发展、维持的影响。但针对超级单体中的龙卷,不仅需要有利于超级单体风暴的环境条件,更需要有较低的抬升凝结高度与较强的低层风垂直切变,因为低空风垂直切变在对流垂直运动作用下可以将低层水平涡度转化为垂直涡度,而较低的抬升凝结高度有利于涡旋触地形成龙卷(Craven, et al, 2004; Grams, et al, 2012)。

2016年6月23日14时,0—1.5 km的风垂直切变在安徽北部—苏北西部存在一个纬向分布的大值区,与0—3 km的风暴相对螺旋度的分布基本一致,中心极大值分别为  $7.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $300 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (图9c)。追踪雷达监视产品中的中气旋可以发现(图略),超级单体首先出现在苏北西部0—1.5 km高度较强的风垂直切变区,该区域存在一个  $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的次极值中心,在环境风的引导下,超级单体向东北方向移动,即由抬升凝结高度相对较高(400—500 m)区域快速移向低值区(200 m)。随着超级单体不断向东移动,中气旋底部不断下移并出

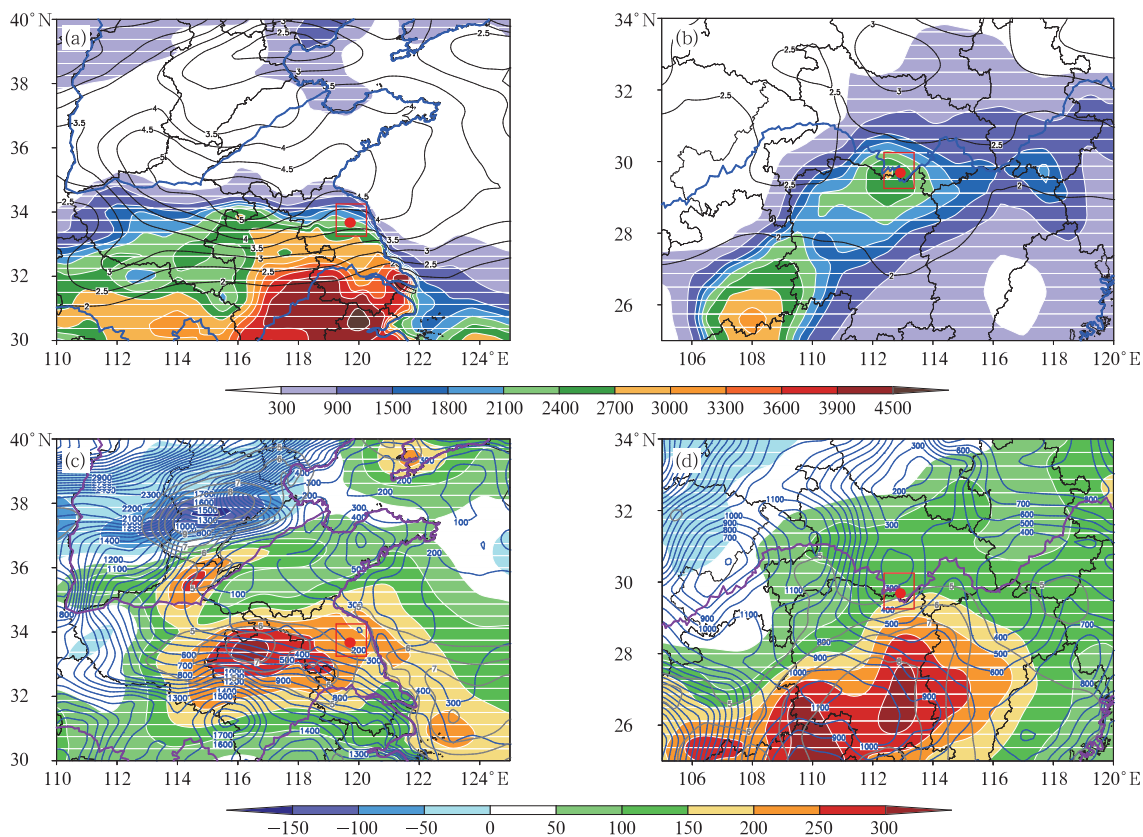


图9 (a,b) 对流有效位能(色阶,单位:J/kg)和0—6 km风垂直切变(黑实线,单位: $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), (c,d) 0—3 km 风暴相对螺旋度(色阶,单位: $\text{m}^2/\text{s}^2$ )、抬升凝结高度(蓝实线,单位:m)与0—1.5 km 风垂直切变(灰实线,单位: $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ); (a,c) 2016年6月23日14时(红色矩形为区域A,红色原点为龙卷发生位置), (b,d) 2015年6月1日20时(红色矩形为区域B,红色原点为沉船位置)

Fig. 9 (a) and (b) Convective effective potential (shadings, unit: J/kg) and 0–6 km vertical wind shear (black solid lines, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), (c) and (d) 0–3 km storm relative helicity (shadings, unit:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ), lifting condensation level (blue solid lines, unit: m) and 0–1.5 km vertical wind shear (gray solid lines, unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), (a) and (c) 14:00 BT 23 June 2016 (the red rectangle indicates region A, the red dot shows the tornado position), (b) and (d) 20:00 BT 1 June 2015 (the red rectangle indicates region B, the red dot shows the wreck position)

现龙卷涡旋特征。

监利强对流过程中, 0—1.5 km 风垂直切变和 0—3 km 的风暴相对螺旋度比阜宁龙卷区弱, 分别为  $4.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$  左右; 抬升凝结高度比阜宁龙卷区略高, 约为 300—400 m (图 9d)。雷达监测图上, 伴随超级对流单体的中气旋, 底高维持在 1.6 km 左右。风暴系统位于 0—6 和 0—1.5 km 风垂直切变相对较弱, 可能是不利于中气旋发展为龙卷涡旋特征的重要原因之一; 相对较高的抬升凝结高度可能是未形成触地中气旋的重要环境因素, 这也从“反例”角度证实了 Craven 等 (2004) 和 Grams 等 (2012) 的观点: 较低的抬升凝结高度有利于涡旋触地形成龙卷。

图 10a、b 分别对应 2016 年 6 月 23 日 14 时区域 A、2015 年 6 月 1 日 20 时区域 B (对应图 9 中的红色区域) 的平均  $T\text{-ln}p$  图。可见两次不同类型强

对流灾害大风过程中, 区域环境均有较高的对流有效位能 (区域平均值分别为 2296 和 2091 J/kg); 但在湿度的垂直结构上有较大的差异: 监利强对流过程期间, 对流层中高层干层深厚, 5—10 km 高度层内的温度露点差达 5—8°C。环境干空气卷入对流系统中将导致云中水物质强烈蒸发冷却, 在负浮力作用下, 产生强烈的下沉气流 (Markowski, et al, 2010), 下击暴流导致地面出现灾害性辐散大风。而阜宁强对流过程中, 仅中层存在非常浅薄的干层, 云中弱的蒸发冷却, 加之较为深厚的低层饱和环境大气, 保证了近地面层出流与环境空气形成的温差较弱 (相对弱的冷池效应), 有利于龙卷的发展 (Dorrell III, et al, 2003)。湿度垂直结构的不同可能是阜宁、监利对流方式向不同的方向发展的另一个重要原因。

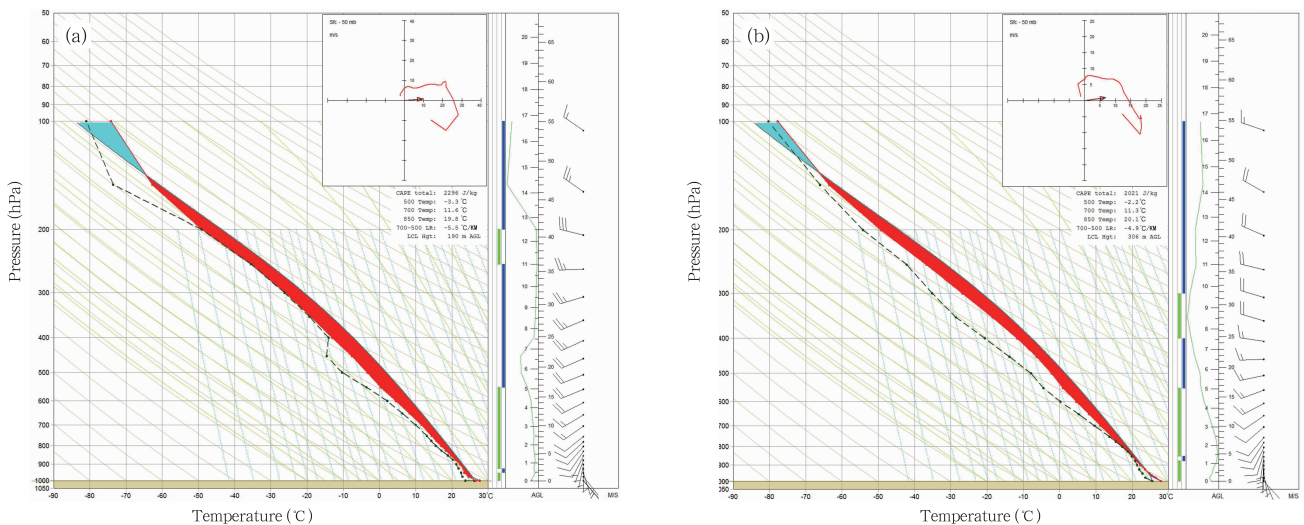


图 10 2016 年 6 月 23 日 14 时区域 A(a) 和 2015 年 6 月 1 日 20 时区域 B(b) 的合成探空

Fig. 10 Synthetic sounding over region A at 14:00 BT 23 June 2016 (a) and over region B at 20:00 BT 1 June 2015 (b)

## 6 结论

采用分钟级加密自动气象站观测资料和盐城、淮安与岳阳、荆州雷达数据, 以及 ECMWF 高分辨率的 ERA-Interim 全球再分析数据, 对比分析了 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷灾害和 2015 年 6 月 1 日湖北监利下击暴流大风灾害的环境特征和超级单体的结构特征。结果表明:

(1) 尽管这两次强对流大风灾害发生在非常相似的低空环流背景下: 大风灾害均发生在 850 hPa 低涡的东侧, 距离低涡中心 6—7 个经距, 位于低空急流出口区左侧的暖区, 环境大气的对流有效位能差别也很小 (100 km × 100 km 范围内的平均值分别为 2296 和 2091 J/kg), 但是, 阜宁大风灾害主要是尺度更小的龙卷而非超级单体母体直接造成的, 而监利“东方之星”长江沉船事故主要是超级单体触发

的下击暴流造成的。阜宁龙卷位于强降水边缘,在龙卷移动方向的左侧伴随着最大瞬时强降水。监利强对流天气过程中,沉船位于强降水的中心区域。在缺乏现场调查直接证据的情形下,鉴于不同性质对流大风的位置与超级单体母体的中心位置对应关系上存在差异,通过比较地面观测的瞬时大风与瞬时强降水中心的相对位置可能有助于区分超级单体引发的强对流大风的性质。

(2) 环境风垂直切变对对流风暴结构、发展、维持具有重要影响:阜宁龙卷发生的上空 0—6 km 风垂直切变达到  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 超级单体结构出现了随高度向前倾斜——对应于强烈的倾斜上升气流,并形成有界弱回波区;而监利强对流位置 0—6 km 风垂直切变只有  $2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  左右,风暴单体中的上升气流近乎于垂直。从低层来看,阜宁强对流风暴中的中气旋,首先出现在 0—1.5 km 风垂直切变和 0—3 km 风暴相对螺旋度带状大值区,当风暴单体逐渐向抬升凝结高度更低的区域移动时,中气旋底部不断下降,形成龙卷。而在监利沉船区,0—1.5 km 风垂直切变和 0—3 km 风暴相对螺旋度,相对于阜宁龙卷风暴区要弱得多,对应的中气旋的强度、持续性弱得多,底部高度维持在 1.6 km 左右。

(3) 环境湿度垂直结构特征的不同是超级风暴单体形成不同类型灾害大风的重要因子。下击暴流造成的风灾,对流层中高层存在较为深厚的干层,干空气卷入对流风暴中造成水物质强烈蒸发,产生较大负浮力,对应于地面要素可以看到,在气温迅速下降过程中,气压存在突升陡降过程:监利风灾过程中,气压在 10 min 跳升了 2.4 hPa,随后的 12 min 又快速下降了 2.1 hPa,气压峰值甚至比降水峰值提前 4 min 出现。而阜宁风灾过程中,从双雷达反演的风暴流场结构可以看到,下沉运动主要在中高层,而云中 3 km 之下下沉气流明显弱于下击暴流,这与环境大气中层仅存在非常浅薄的干层,加之低层较为深厚的饱和大气环境有关,形成的近地面层的冷池效应相对较弱。

致 谢:感谢罗昌荣研究员提供双雷达反演技术支持;感谢王嘯华高级工程师提供分钟级加密自动气象站观测数据。

## 参考文献

- 陈涛, 张芳华, 宗志平. 2012. 一次南方春季强对流过程中影响对流发展的环境场特征分析. 高原气象, 31(4): 1019-1031.
- Chen T, Zhang F H, Zong Z P. 2012. Analysis on environment field characteristic of influencing convection system during a severe convective process in southern China in Spring. Plateau Meteor, 31(4): 1019-1031 (in Chinese)
- 戴建华, 陶岚, 丁杨等. 2012. 一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of squall line. Acta Meteor Sinica, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 丁一汇, 章名立, 李鸿洲等. 1981. 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析. 大气科学, 5(4): 388-397. Ding Y H, Zhang M L, Li H Z, et al. 1981. A comparative study on the occurrence conditions of heavy rainfall and severe convective weather. Chinese J Atmos Sci, 5(4): 388-397 (in Chinese)
- 费海燕, 王秀明, 周小刚等. 2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析. 气象, 42(12): 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al. 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521 (in Chinese)
- 罗昌荣, 池艳珍, 周海光. 2012. 双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究. 大气科学, 36(2): 247-258. Luo C R, Chi Y Z, Zhou H G. 2012. Characteristics of 3-D wind structure of typhoon outer intensive banded echo using dual-Doppler weather radar data. Chinese J Atmos Sci, 36(2): 247-258 (in Chinese)
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4): 621-636. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N. 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line. Acta Meteor Sinica, 66(4): 621-636 (in Chinese)
- 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. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with server convective weather analysis and forecast. Meteor Mon, 38(2): 164-173 (in Chinese)
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学, 3(3): 227-238. Tao S Y, Ding Y H, Zhou X P. 1979. The present status of the research on rainstorm and severe convective weathers in China. Chinese J Atmos Sci, 3(3): 227-238 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚等. 2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析. 高原气象, 31(2): 504-514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al. 2012. Study on the formation and evolution of “6.3” damage wind. Plateau Meteor, 31(2): 504-514 (in Chinese)

- 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. 气象学报, 71(5): 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures. Acta Meteor Sinica, 71(5): 839-852 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚等. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu. Acta Meteor Sinica, 71(2): 209-227 (in Chinese)
- 吴海英, 陈海山, 刘梅等. 2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制. 气象, 43(2): 141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al. 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle. Meteor Mon, 43(2): 141-150 (in Chinese)
- 吴举秀, 周青, 杨传凤等. 2017. 2015年7月14日阵风锋及锋后大风多普勒天气雷达产品特征分析. 高原气象, 36(4): 1082-1090. Wu J X, Zhou Q, Yang C F, et al. 2017. Analysis on the weather radar products characteristics of the gust front and the wind after the gust front on 14 July 2015. Plateau Meteor, 36(4): 1082-1090 (in Chinese)
- 伍志方, 庞古乾, 贺汉青等. 2014. 2012年4月广东左移和飑线内超级单体的环境条件和结构对比分析. 气象, 40(6): 655-667. Wu Z F, Pang G Q, He H Q, et al. 2014. Comparative analysis of environmental conditions and structural features for the left moving supercell and the supercell in squall line in April 2012 Guangdong. Meteor Mon, 40(6): 655-667 (in Chinese)
- 姚叶青, 郝莹, 张义军等. 2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警. 高原气象, 31(6): 1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al. 2017. Synoptic situation and pre-warning of Ahhui Tornado. Plateau Meteor, 31(6): 1721-1730 (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. 高原气象, 25(5): 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. Plateau Meteor, 25(5): 914-924 (in Chinese)
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳. 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): 508-521. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm. Chinese J Atmos Sci, 32(3): 508-521 (in Chinese)
- 曾明剑, 吴海英, 王晓峰等. 2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 42(3): 280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al. 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period. Meteor Mon, 42(3): 280-293 (in Chinese)
- 张小玲, 杨波, 朱文剑等. 2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al. 2016. Analysis of the EF4 Tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016. Meteor Mon, 42(11): 1304-1314 (in Chinese)
- 郑永光, 朱文剑, 姚聘等. 2016a. 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. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. 2016a. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 Tornado in Funing County, Jiangsu Province. Meteor Mon, 42(11): 1289-1303 (in Chinese)
- 郑永光, 田付友, 孟智勇等. 2016b. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016b. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship "Dongfangzhixing". Meteor Mon, 42(1): 1-13 (in Chinese)
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 2017. 强对流天气预报的一些基本问题. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting. Meteor Mon, 43(6): 641-652 (in Chinese)
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翔等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 28(3): 617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al. 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm. Plateau Meteor, 28(3): 617-625 (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. 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. Meteor Mon, 41(8): 942-952 (in Chinese)
- 周海光, 张沛源. 2002. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. 气象学报, 60(5): 585-593. Zhou H G, Zhang P Y. 2002. A new technique of recovering three-dimensional wind fields from simulated dual-Doppler radar data in the Cartesian space. Acta Meteor Sinica, 60(5): 585-593 (in Chinese)
- Brooks H E, Lee J M, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Atmos Res, 67-68: 73-94
- Browning K A, Ludlam F H. 1962. Airflow in convective storms. Quart J Roy Meteor Soc, 88(376): 117-135
- Browning K A. 1978. The structure and mechanisms of hailstorms // Foote G B, Knight C A. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression. Boston, MA: American Meteorological Society, 38: 1-36
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection // The

- Proceedings of the 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio, Texas: American Meteorological Society, 643-646
- David-Joues R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 167-221
- Doswell III C A. 2001. Severe convective storms-An Overview//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 1-26
- Doswell III C A, Evans J S. 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. Atmos Res, 67-68: 117-133
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Wea Forecasting, 27(1): 106-123
- Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting. Wea Forecasting, 7(4): 588-612
- Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: Widespread convectively induced windstorms. Wea Forecasting, 1987, 2(1): 32-49
- Markowski P M, Richardson Y P. 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 245-260
- Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, et al. 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Sci Bull, 61(4): 330-337
- Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. Wea Forecasting, 9(3): 327-347