

0808 号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析

蒋义芳 吴海英 沈树勤 刘安宁

(江苏省气象台, 南京 210008)

提 要: 用多普勒天气雷达、常规观测和地面加密观测资料对2008年7月29—30日发生在江苏的台风凤凰前部系列龙卷过程进行了详细分析。结果如下: 该龙卷发生在台风前部风切变区里, 低空较强的垂直风切变、极不稳定的大气层结和深厚的正涡度区, 为龙卷的发生提供了热力和动力条件。龙卷回波的反射率因子特征表现为最大反射率因子梯度位于回波的后侧, 一般都有弱回波区和后侧入流缺口相伴随。东台龙卷产生于飑线型弓形回波的顶点, 具有相对较大的反气旋性切变。高邮龙卷中低层具有弱的气旋性涡旋, 宝应龙卷回波的内部环流特征明显, 有明显的中气旋结构。在业务工作中, 强回波质心高度和垂直累积液态含水量的骤降、径向速度风场中气旋性涡旋的迅速发展是对龙卷的提前警戒很好的参考指标。

关键词: 龙卷 垂直风切变 强回波质心 中气旋

Analysis on Environmental Conditions and Doppler Radar Data for Tornado Events in Front of Typhoon Fenghuang(0808)

Jiang Yifang Wu Haiying Shen Shuqin Liu Anning

(Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract: Tornadoes occurred in front of typhoon in Jiangsu Province on 29 to 30 July, 2008. A detailed analysis of the environmental conditions, structure and evolution of tornado is made based on the Doppler weather radar data, routine upper-air and surface observations, and intensive automatic weather station observations. The main results are as follows: The tornadoes occurred in the area with high value of low level vertical wind shear. The low lifting condensation level, unstable stratification and deeper positive vorticity all these factors supplied the thermodynamic and dynamical conditions for the occurrence of tornadoes. The tornado occurred at Dongtai is associated with a mesoscale squall-line, whereas the tornadoes

occurred at Gaoyou and Baoying are associated with multi-cell convective storm. The rear part of the storm cell has a large reflectivity gradient, which is often accompanied by the weak echo structure and back-flank notch in the low level. Not all the tornadoes occurred in the storm-cell with meso-cyclone and tornado vortex signature. Some tornadoes happened in the storm-cell with weak cyclone vortex in the low level. When the altitude of strong echo center and the vertical cumulative liquid water falls suddenly and cyclone vortex develops rapidly, the tornado will occur very soon. In operational work, we shouldn't alert the occurrence of tornadoes only depending on the meso-cyclone signature and tornado vortex signature. We should also combine the other products, for example, reflectivity, average radial velocity, storm structure, etc. It is possible to greatly enhance weather radar's capability to detect the tornadoes.

Key Words: tornado vertical wind shear strong echo center meso-cyclone

引 言

龙卷是破坏力极大的小尺度灾害性天气,其产生的大风常常造成重大人员伤亡和财产损失。台风登陆时,有些会在台风前部产生龙卷。统计表明,7—9月是台风影响江苏的盛季,相应地热带气旋前龙卷也发生在这个季节里。根据23年各月统计,在热带气旋前部影响江苏境内的龙卷过程,23年中共有11次,平均约为两年一遇。热带气旋前龙卷虽然较少,但它所造成的灾害是十分严重的,甚至有的超过台风的直接影响。国内气象工作者对这类龙卷发生发展的环境特征进行了一些分析和研究,表明龙卷的发生与中尺度辐合中心活动密切相关,中层的强风和低湿以及空气的潮湿不稳定也是龙卷形成和发生的重要原因之一^[1];对台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件分析表明,龙卷一般在台风运动方向的右前象限,并且与台风强度变化等因素有关^[2]。由于资料的限制,对台风前龙卷的中小尺度环流特征研究不够深入,对龙卷回波结构的分析不是太多。随着全国多普勒天气雷达的布网,加强了对龙卷进行探测和预警的能力,因为多普勒天气雷达除了可以测量降水的回波强度(反射率

因子)外,还可以测量降水粒子沿着雷达径向的速度,从而可以识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散特征。强烈龙卷多数产生于超级单体风暴,非强烈龙卷一般与非超级单体风暴(多单体风暴及飑线等)相联系,同时与边界层辐合切变线密切相关^[3-4]。0808号台风凤凰28日晚上10时(北京时,下同)在福建省福清市东瀚镇登陆后,西北偏北行,受其外围影响,29—30日江苏省沿淮、淮北和沿江西部地区出现暴雨到大暴雨,全省普遍出现了7~8级偏东大风。尤其29日夜间到30日下午东台、高邮、宝应等地区遭遇龙卷风袭击,受这次强对流影响,全省受灾人口14万多人,共造成4人死亡,58人受伤,直接经济损失8180万元。本文着重分析台风引发系列龙卷的环境背景特征,利用距龙卷发生地最近的多普勒雷达资料分析了龙卷回波结构演变特征,以揭示龙卷回波的强度特征及龙卷内部垂直结构环流特征,找出与龙卷发生密切相关的多普勒产品变化特征。

1 天气背景

1.1 大尺度环境背景

0808号台风凤凰于28日晨6时30分前后在台湾省花莲县南部沿海登陆。28日

晚上 22 时在福建省福清市东瀚镇登陆,登陆时中心附近最大风力有 12 级($33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。28 日 20 时,500hPa 高空图(图略)上,贝加尔湖的东部有一深厚的低槽正在东移,原控制江苏和山东上空的副热带高压东退减弱。“凤凰”登陆后,沿着副热带高压西侧的东南引导气流向西北偏北方向移动,同时强度明显减弱,7 月 30 日 05 时在江西余干县附近减弱为热带风暴(图 1)。高层有弱冷空气渗透下来,容易激发强对流天气的产生。

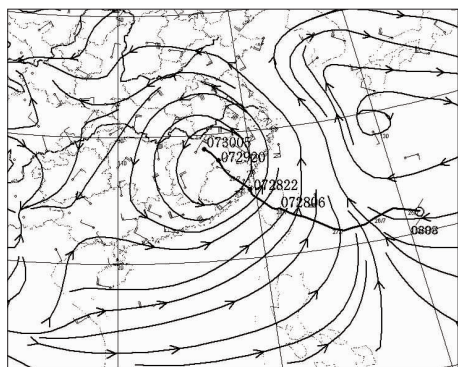


图 1 2008 年 7 月 29 日 20 时 850hPa 图
实线为台风路径

1.2 有利于龙卷发生发展的对流不稳定层结

龙卷一般产生于极端不稳定的大气层结中,是在能量不断积累和在一定条件下强烈的转化和释放的过程中产生的。27 日 20 时,台风还没有登陆台湾时,江苏受副热带高压控制,大气处于能量积累的过程。从表 1 可以看出:28 日 20 时盐城 K 指数和对流有效位能 $CAPE$ 值已经很大, K 指数在以后的几天中一直维持在 30°C 以上,而对流有效位能 $CAPE$ 值也于 30 日 08 时达最大 $2683.6\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明盐城的大气层已经处于不稳定状态。29 日 20 时左右的东台龙卷和 30 日下午高邮、宝应龙卷就是在这样不稳定大气中产生的。

表 1 盐城稳定度指数

时间	$K/^{\circ}\text{C}$	$CAPE/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
28 日 20 时	30	2373.2
29 日 08 时	31	2397.7
29 日 20 时	34	2007.4
30 日 08 时	37	2683.6
30 日 20 时	36	864.0

另外,龙卷发生时,对流参数平均抬升凝结高度只有 $977\sim 1005\text{m}$,这与 Thompson 等统计发现产生 F2 级以上强龙卷的平均抬升凝结高度低于 981m ,弱龙卷的平均抬升凝结高度为 1179m ^[4] 结论基本一致。较低抬升凝结高度表明低层相对湿度较大,下沉气流中的气块在低层大气被进一步蒸发降温的可能性较小,其具有正浮力的可能性较大,有利于强龙卷的形成。

1.3 有利于龙卷发生发展的深厚正涡度区

图 2 为 2008 年 7 月 30 日 08 时 850hPa 涡度场的分布及盐城 850hPa 涡度随时间变化图。可以看出,27 日 20 时“凤凰”登陆台湾之前,盐城地区 850hPa 的涡度值为负数,且呈递减趋势,随着由“凤凰”减弱的热带低压西行北上,27 日 20 时至 28 日 20 时,负涡度值不再减小。28 日 20 时台风到达 24.9°N 、 119.7°E ,之后,对流层中低层的涡度呈上升趋势,29 日 20 时涡度值为正,而从垂直速度场的分布来看,正涡度区与上升运动区(图略)相配合的。当小尺度的对流风暴在对流层低层被激发出后,移近正涡度区时,对流风暴的气旋性涡度进一步发展,同时,上升运动的不均匀分布,会使沿风暴入流方向的水平涡度并入风暴的上升气流中扭转成垂直涡度,最终产生强烈的低层旋转导致龙卷涡旋的产生,而对流层低层的水平涡度场越强,在上升气流中转换成的垂直涡度也越强,从而有利于龙卷天气的出现^[5-6]。因此,较为深厚的正涡度区的存在是这次龙卷涡旋生成

发展的一个重要背景条件。

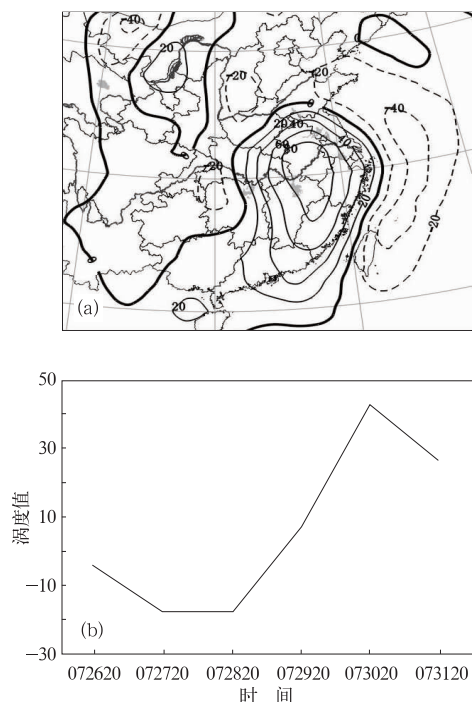


图2 (a) 2008年7月30日08时850hPa
涡度场的分布(单位: 10^{-6}s^{-1});(b) 7月26日
20时至31日20时盐城850hPa 涡度变化
(单位: 10^{-6}s^{-1})

1.4 有利于龙卷发生发展的中低层较强垂直风切变

7月29日20时,对流层低层,“凤凰”东北象限与副热带高压之间有一大风速区,江苏淮河以南处于这样的南北向的风速大值区中,850hPa 风速值大于 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图1)。此时自动站观测资料表明,在龙卷天气出现前,龙卷的发生地高邮、宝应、东台地区却一直处于地面弱风区中,平均风速在 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,这样,该地区中低空就形成了较强的垂直风切变,从而有利于气旋性龙卷产生。

另外,从雷达径向速度剖面图(图略)也可以看出,2km 以下基本是离开雷达的正速度区,2km 以上为指向雷达的负速度区,表

明中低层存在风向的垂直切变。风廓线产品上,近地层风向为东东南,随着高度的增加,风向发生顺转,2km 以上风向为南东南,且风速随高度先增加后减少,最大切变高度发生在 $0.3\sim 1.8\text{km}$,风速由 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,切变值为 $10.8\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 。29日晚到30日发生的龙卷正好位于较强的垂直风切变区。

可见,由于水平风切变可产生气旋式涡旋,辐合产生上升速度区,当气旋式涡旋区与辐合上升速度区遇到已存在的涡旋时,涡旋由于拉伸而加速旋转,从而形成龙卷。龙卷的产生与较强的中低层垂直风切变密切相关,强的风垂直切变是龙卷产生的必要条件。

2 多普勒天气雷达资料分析

在受台风系统影响下出现的风灾,有的是由台风本身引起的,有的是由于雷雨大风、龙卷等中小尺度强对流系统引起的,分析多普勒雷达资料可以分辨出造成风灾的系统。29—30日在东台、高邮、宝应引起的风灾,据灾情和目击证实是由龙卷引起的。下面具体分析各个龙卷回波的演变特征。

2.1 产生东台龙卷的对流风暴回波特征

2.1.1 飚线型弓形回波和后侧入流缺口的形成

自7月28日夜里开始,江苏省东南部首先受“凤凰”外围云系影响产生弱的降水,随着台风的北上,降水范围不断扩大,同时在回波的北端边缘,不断有对流性降水回波生成。29日傍晚,沿江一带层状云降水回波内部有对流性降水回波生成,强度为 $45\sim 55\text{dBz}$ 的强回波中心位于靖江、张家港,此时强回波的东部为无回波区,对应着副高边缘。之后,强回波顺着台风引导气流向西北方向移动并发展,表现为强回波面积不断扩大。29日20

时,逐渐形成西—北东南向的有组织的对流回波带,根据自动站资料,19—20时,如皋、海安气压升高1hPa,温度下降4℃,风力加大。因此这是一条 β 中尺度飚线(图3,见彩页)。29日20时,飚线上最强回波中心位于海安、东台附近,强度58dBz、最大回波顶高11~12km,垂直累积液态含水量28~33kg $\cdot$ m $^{-2}$ 。注意到:该飚线的走向与中低层大风速轴位置及地面风速切变位置相吻合。

从0.5°仰角的反射率因子图(图4,见彩页)上可以看出,19:38在飚线中段海安境内强回波单体的后侧有明显的弱回波区域,形成后侧入流槽口,表明存在强的下沉后侧入流急流,它向下沉气流提供干燥的和高动量的空气,通过垂直动量交换,增加地面附近出流的强度。强烈的下沉气流及其导致的强烈地面冷池对弓形回波的初始发展至关重要^[7-9]。19:44强回波呈弓状,形成飚线型弓形回波,只是该弓形回波的尺度不大,长度只有30km,根据Fujita等的研究,弓形回波后面“弱回波通道”的出现或许意味着下击暴流风和可能的下击暴流导致的龙卷^[2]。19:56弓状回波的顶点到达东台溱东镇,龙卷发生在弓形的顶点处,据灾情报道,20时左右东台溱东镇发生龙卷风,农作物大豆、玉米等受灾350hm 2 ,厂房倒损120间,居民房屋倒损近70间,直接经济损失为255万元左右。

2.1.2 径向速度回波特征

龙卷是对流云内产生的破坏力极大的小尺度系统,多普勒雷达的径向速度场为研究龙卷发生时中小尺度环流场提供了依据。

从18时30分开始,各个仰角径向速度图上强对流回波区对应大片负速度区中小值区,这表明在强回波所在地存在有利于回波发展的辐合流场。20时03分(图5,见彩页),飚线上强对流回波轴对应的速度值为3~8m $\cdot$ s $^{-1}$,西侧为反气旋性环流,东侧为气旋性环流,弓形回波顶点所在处反气旋切变

相对最大,直径6km内最大速度差为10m $\cdot$ s $^{-1}$ 。切变值 $(|V_{\max}-V_{\min}|/D, D$ 为最大负速度和最小负速度中心之间的距离)为 $1.66\times10^{-3}\cdot$ s $^{-1}$ 。在整个回波发展过程中,雷达始终没有探测到中气旋,根据灾情出现的时间和地点,本文认为,灾情报道的溱东镇龙卷可能是由于如此相对较大的反气旋产生的下沉气流与后侧入流辐合产生旋转性的上升气流,从而诱发龙卷的产生,造成地面极大的风灾。

2.2 产生高邮和宝应龙卷的对流风暴回波特征

2.2.1 反射率因子演变特征

7月30日随着副热带高压进一步东退和热带风暴的北上,降水回波范围向东向北扩展,整个降水基本覆盖盐城雷达观测范围,降水区内镶嵌着对流性降水回波。14时32分,在兴化、泰州与高邮的交界处,有对流性单体回波A新生(图6,见彩页)。当小尺度的对流风暴在对流层低层被激发出后,移近正涡度区时,对流风暴的气旋性涡度会得到进一步发展。之后该回波不断发展,强回波范围不断扩大,15时02分左右强回波分布呈西北—东南走向,最强回波中心到达高邮的东北部,强度58dBz,高度8km,最大强度梯度位于单体的后侧,15时15分大于35dBz的回波组成弓状,且在最早发展的单体A后部有弱回波区域,15时21分弱回波区域进一步扩大,此时,洋汉村出现了龙卷,持续时间15分钟,导致九天服装厂厂房和部分村民屋顶掀塌,造成4人死亡,8人重伤,32人轻伤。

与此同时,在兴化南部边境内又有一个新的对流单体回波B生成,该单体发展情况与导致高邮龙卷的风暴类似,只是在发展过程中,边界结构更清晰,单体后侧反射率因子梯度更大,为5dBz $\cdot$ km $^{-1}$,回波发展更激

烈。16时03分,在图中黑色的圆圈位置可以清晰看出一个明显的入流回波缺口,并且连续两个体扫发出中气旋报警,16时22分单体B到达宝应县境内广洋湖镇,此时,最大回波顶高达14km,垂直累积液态水含量VIL达 $33\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,雷达探测到龙卷涡旋特征,龙卷风很快爆发。由于大气层积的不稳定和强烈的垂直运动以及台风提供充足水汽几个因素的共同作用,金湖到兴化之间不断有多个对流性回波生成、合并、发展,强回波于18时42分彻底离开宝应境内。这是由于30日20时以后,盐城的CAPE值和中低层涡度值开始减小,有利于强对流天气产生的环境条件被破坏。产生宝应龙卷的风暴是一个典型超级单体风暴——具有后侧入流缺口和中气旋特征。

2.2.2 平均径向速度场特征

对龙卷的探测和预警,多普勒雷达提供了两个产品——中气旋和龙卷涡旋特征,研究发现,并不是每次龙卷都能探测到中气旋和龙卷涡旋特征。但从平均径向速度场上可以发现与之相联的气旋性切变情况。

15时09分反射率因子图上出现弱回波区,1.5°仰角径向速度图上对应弱回波区的位置(对应高度2km)存在小尺度的气旋性涡旋,直径4km内最大速度差为 $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,切变值($|V_{\max}-V_{\min}|/D$)为 $4.8\times10^{-3}\text{s}^{-1}$,3.4°仰角(对应高度4km)在 $-7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 负速度区中出现 $-24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的负值中心,对应风速的辐散。这种低层存在气旋性涡旋、高层为辐散的环流结构在15时21分(图7,见彩页)达到最强时(此时,低层切变为 $14\times10^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)产生了龙卷,给人民的经济财产带来了很大的损失。对这个龙卷,雷达中气旋和龙卷涡旋特征产品都没有报警。这给我们启示,美国制定的中气旋和龙卷涡旋特征阈值应结合地方情况作些调整。

对宝应龙卷,多普勒雷达在16:03、

16:09两个体扫识别出了中气旋特征,16:22识别出龙卷涡旋特征。根据WSR-88D布网以后大量的研究数据表明,几乎所有中气旋都会产生一些强天气,但大约只有20%左右的中气旋产生龙卷^[2],如果同时探测到中气旋和龙卷涡旋特征,一般来说龙卷发生的可能性极大。我们知道,中小尺度系统虽然生命期较短,但其形成和发展总有一个演变过程,我们可以从各层的径向速度风场结构的变化提前探测和预警龙卷的发生。

图8为产生宝应龙卷的风暴单体内部气旋性环流的速度差(正速度中心值与负速度中心值之差的绝对值 $|V_{\max}-V_{\min}|$)随时间演变曲线,在15:33,0.5°仰角的径向速度图(图略)上与强回波中心对应的地方,相邻方位上存在正速度中心与负速度中心,其速度差为 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时,小尺度的气旋性环流只在低层存在。在后面几个体扫中,低仰角的气旋切变值加大,同时较高仰角也相继出现增强气旋性切变,切变强度随高度递减。随着强回波质心高度持续下降,气旋性环流向上伸展加强,到16:09,2.7km高度以下正负中心速度差达最大(0.5°: $36\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,1.5°: $29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,2.4°: $24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。当各层气旋性切变强度同时开始减弱时,意味着有利于龙卷的产生和维持的环流条件的崩溃。据报道,16时20分左右宝应县境内广洋湖镇爆发龙卷风。由此可见,龙卷的发生伴随着中低层的气旋性切变,当切变强度开始减弱时,意味着龙卷的爆发,为此,我们可以根据气旋

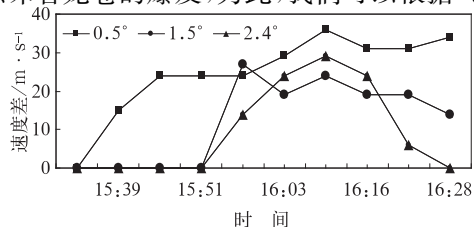


图8 2008年7月30日0.5°、1.5°、2.4°仰角的风暴单体内气旋性环流的速度差

性切变强度的变化来预警龙卷的发生。

2.2.3 垂直结构特征

风暴单体的强度与风暴伸展的高度密切相关,伸展越高,风暴越强^[6-7]。图9给出了产生宝应龙卷的风暴单体大于45dBz强回波顶高及最强回波质心高度随时间演变。可以看出,风暴单体发展初期,上升气流占主导地位,回波发展迅速,降水粒子被强大的上升气流带到空中,使得强回波顶高跃增,最大反射率因子值位于中空,低层具有弱回波区的结构。15:39 大于45dBz强回波顶高从5km增到最高点7.5km,最强回波质心高度也由2.1km抬升到4.5km,此时上升气流达到强盛。随后强回波质心高度开始下降,垂直累积液态水含量急剧减少,强回波中心下沉气流形成,并与地面由于辐合抬升产生的上升气流首先在低层形成垂直伸展的气旋性环流,这与Davies-Jones,1986提出的龙卷气流结构^[2]相符合,这种环流的变化可以从沿着雷达径向对强风暴中心作速度垂直剖面(图10,见彩页)得以佐证。15:39边界层有弱的辐合,中高层存在弱的风速辐散,一个体扫后,辐合层迅速向上伸展到3km高度。龙卷发生时,强回波高度下降到低谷,垂直累积液态水含量也急剧下降。这次风暴从强回波质心高度开始下降到龙卷爆发有20分钟的时间。可见,强回波质心高度和垂直累积液态含水量开始下降在对龙卷的预警中是很好的参考指标,具有一定的提前量。

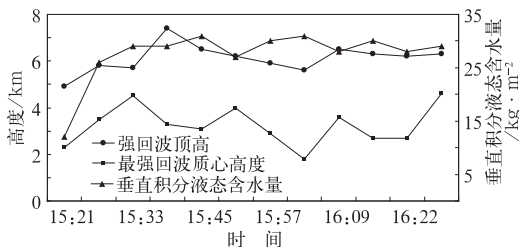


图9 2008年7月30日风暴单体大于45dBz强回波顶高及最强回波质心高度随时间演变曲线

从以上台前系列龙卷的雷达回波的分析可以看出,发生在不同时间、不同地点的龙卷都具有各自的回波特点,东台龙卷产生于飑线上的对流单体风暴,且发生在风暴单体演变成的弓形回波的顶点,具有相对较大的反气旋性切变。高邮龙卷中低层具有弱的气旋性涡旋,宝应龙卷回波的内部环流特征明显,有明显的中气旋结构。但它们都有共同特点:所有龙卷都产生于强对流风暴单体中,龙卷回波的强度都在50dBz以上,最大反射率因子梯度位于回波的后侧,龙卷回波一般都伴随着弱回波区和后侧入流缺口。

不是每个龙卷风暴中都有中气旋的存在,低层具有弱气旋性涡旋的风暴有时也能产生龙卷。回波垂直结构中强回波质心的高度和垂直累积液态水含量的下降、径向速度风场中气旋性涡旋的迅速发展是对龙卷提前预警的很好指标。

3 结论

(1) 这次系列龙卷是在北方高层冷槽东移,副热带高压东撤,台风凤凰西北移动的过程中产生的,低空较强的垂直风切变、极不稳定大气层结和深厚的正涡度区的存在,为系列龙卷涡旋生成发展提供了热力和动力条件。

(2) 龙卷产生于飑线、超级单体风暴和多单体风暴等中小尺度系统中,龙卷回波的反射率因子特征表现为强度强,最大反射率因子梯度位于回波的后侧,一般都有弱回波区和后侧入流缺口相伴随。东台龙卷产生于飑线型弓形回波的顶点,具有相对较大的反气旋性切变。高邮龙卷中低层具有弱的气旋性涡旋,宝应龙卷回波的内部环流特征明显,有明显的中气旋结构。研究表明,气旋性切变越强,发展为中气旋的可能性越大。不是每个龙卷风暴中都有中气旋的存在,有的低层具有弱气旋性涡旋的风暴也能产生龙卷。

(3) 强回波质心高度和垂直累积液态水含量的骤降,径向速度风场中气旋性涡旋的迅速发展是对龙卷提前警戒的很好指标。

(4) 在业务工作中,使用雷达产品时不能只根据中气旋和龙卷涡旋特征两个产品来对龙卷加强警戒,而应结合反射率因子产品、平均径向速度产品、风暴结构产品进行综合分析。

参考文献

- [1] 徐继业,姚祖庆. 登陆热带气旋引发的龙卷过程之个例分析[J]. 气象,2001,27(7):27-29.
- [2] 沈树勤. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析[J]. 气象,1990,16(1):11-15.
- [3] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:130-145.
- [4] Thompson R L, Edwards R, Hart J A. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity sounding[C]// Preprints 21st Conf on Severe Local Storm. San Antonio: Amer Meteor Soc, 2000, 595-598.
- [5] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,2006,25(5):915-923.
- [6] Lemon L R, C A Doswell III. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis[J]. Mon Wea Rev, 1979, 107: 1184-1197.
- [7] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(3): 370-375.
- [8] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001: 396-397.
- [9] 唐小新,廖玉芳. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象,2007,33(8):23-28.

蒋义芳等：0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和
雷达回波分析

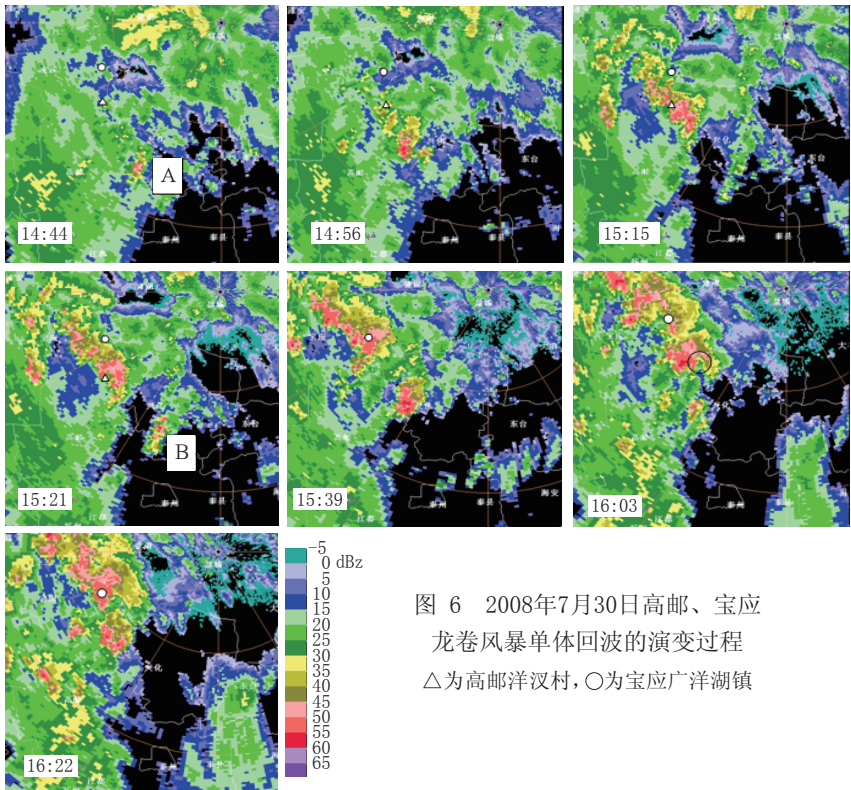


图 6 2008年7月30日高邮、宝应
龙卷风暴单体回波的演变过程
△为高邮洋汉村,○为宝应广洋湖镇

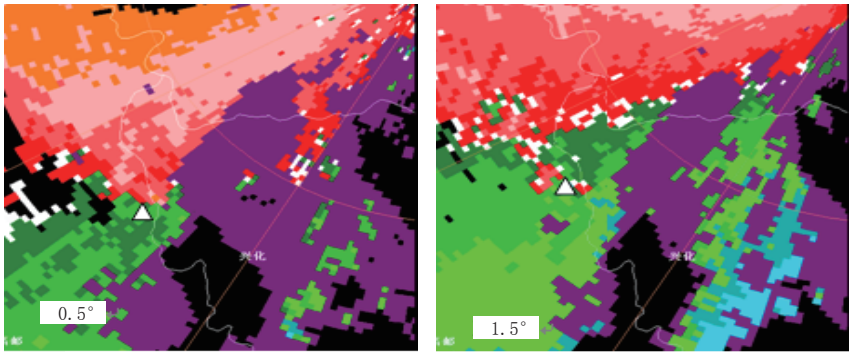


图 7 2008年7月30日15时21分不同仰角的径向速度图
△为龙卷发生地高邮洋汉村

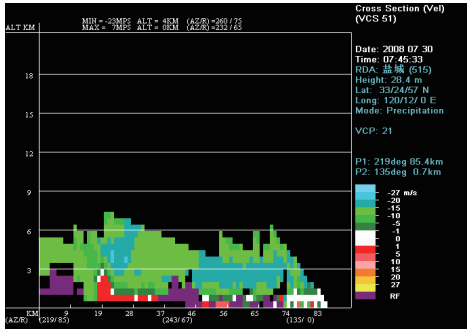


图 10 2008年7月30日15时45分
风暴的径向速度剖面图

蒋义芳等：0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和 雷达回波分析

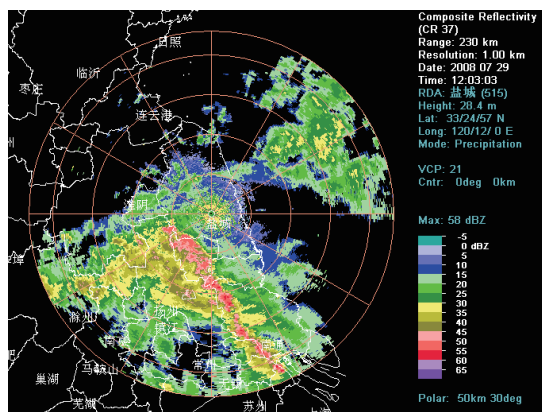


图 3 2008年7月29日20:03盐城雷达站观测的组合反射率因子图

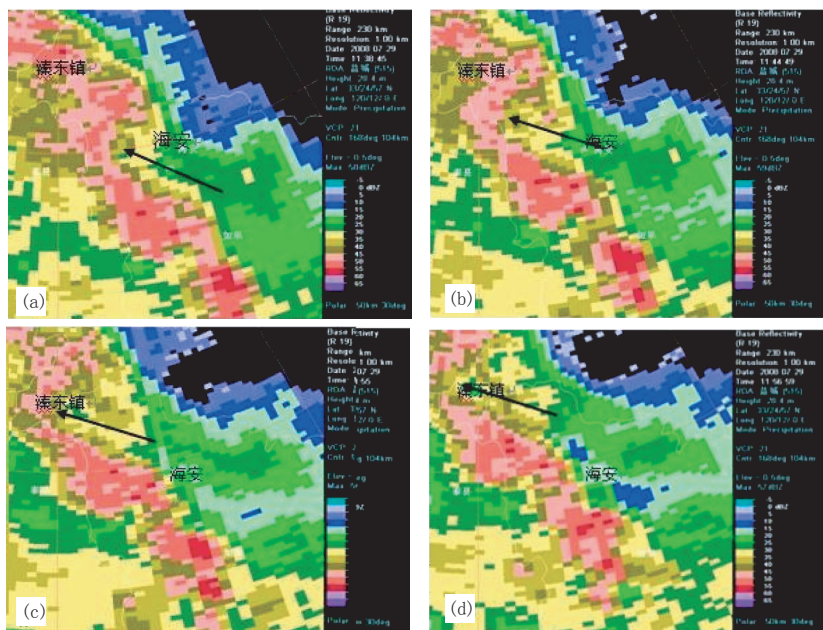


图 4 2007年7月29日0.5°仰角的反射率因子图
a. 19:38, b. 19:44, c. 19:50, d. 19:56;图中箭头表示后侧入流

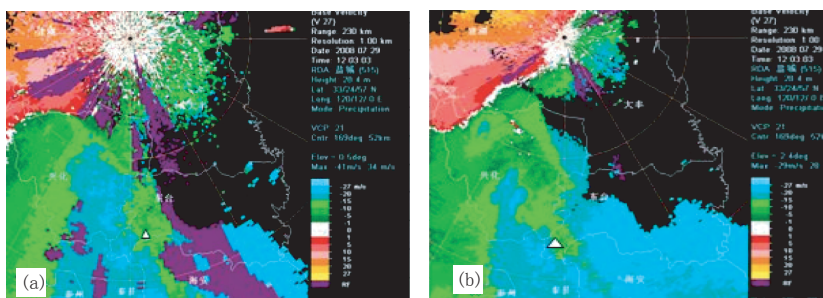


图 5 2008年7月29日20时03分盐城雷达站不同仰角的径向速度图
a. 0.5°, b. 2.4°;图中△为东台溱东镇的位置