

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[J]. 大气科学学报, 34(6): 763-768.

Zhou Hong-wei, Wang Qun, Xia Wen-mei, et al. 2011. Ground and mesoscale analysis of a tornado and heavy rainfall and their radar echo characteristics in Yancheng [J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 763-768.

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

周宏伟¹, 王群¹, 夏文梅², 仓粟¹

(1. 江苏省盐城市气象局, 江苏 盐城 224005; 2. 江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 利用地面加密自动站和多普勒天气雷达资料, 对2006年7月3日发生在盐城的龙卷和短时强降水等强对流天气过程进行了详细分析。结果表明: 此次强对流天气发生的天气背景是江淮梅雨期暴雨形势, 即高空东移的西风槽、中低空西南急流以及强烈的对流不稳定。地面中尺度涡旋的发展、维持为强对流天气的产生提供了持续强劲的上升运动; 龙卷发生在非超级单体风暴中低层反射率因子梯度区上, 在平均径向速度图上出现了明显的小尺度涡旋特征。另外, 西太平洋副热带高压和赤道辐合带上活动的3个热带系统为短时强降水提供了超常的充沛水汽, 短时特大暴雨发生在中低空急流增强到最强并开始减弱的时段内, 与大于50 dBZ的强回波面积的变化关系密切。

关键词: 短时特大暴雨; 龙卷; 中尺度涡旋

中图分类号: P445.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2011)06-0763-06

Ground and mesoscale analysis of a tornado and heavy rainfall and their radar echo characteristics in Yancheng

ZHOU Hong-wei¹, WANG Qun¹, XIA Wen-mei², CANG Su¹

(1. Yancheng Meteorological Bureau, Yancheng 224005, China; 2. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The tornado, short-term heavy precipitation and other convective weather in Yancheng City on 3 July 2006 are analyzed based on the data of dense surface automatic meteorological stations and Doppler weather radar. Results show that the weather background of the convective weather is Changjiang-Huaihe storm weather situation of the Meiyu, including the westerly trough eastward in upper levels, southwest jet stream in low-mid levels and strong convective instability. The development and maintenance of surface mesoscale vortex cause a continued strong upward motion for the convective weather. The tornado occurs in the large reflectivity gradient region in low-mid levels of the non-supercell storm, with a marked small scale vortex feature in the average radial velocity. In addition, three tropical systems in the western Pacific subtropical high and the ITCZ provide abundant moisture for the short-term heavy rainfall. There is a close relationship between the short-term heavy rainfall (occurring in a period of the increasing to the strongest, and to the beginning of decrease for the jet stream in low-mid levels) and the strong echo area larger than 50 dBZ.

Key words: short-term heavy rain; tornado; mesoscale vortex

0 引言

龙卷是最为猛烈的对流性天气现象, 分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷两种类型(俞小鼎等,

2006)。在夏季梅雨期间, 龙卷和短时强降水等强对流天气的发生、发展具有突发性和局地性强的特征, 因而预报难度大。天气雷达是研究强对流天气的有效工具之一, 国际上为提高局地强对流天气的

短时和临近预报能力,很早就利用天气雷达来探测和分析强对流天气的结构和演变特征(Batta, 1973)。Fujita(1963)最早提出了超级单体风暴“中气旋”概念,Lemon and Doswell(1979)总结出经典超级单体的概念模型。我国气象工作者利用新一代天气雷达数据,对龙卷等强对流天气进行了大量研究(郑媛媛等,2004a,2004b;廖玉芳等,2007;周海光和郭富德,2007;杨成芳和朱君鉴,2008),发现典型的超级单体龙卷一般都发生在大的垂直风切变环境下,强烈的垂直不稳定和较低的抬升凝结高度都有利于强龙卷的发生。非超级单体龙卷可以发生在各种产生对流风暴的环境下,因此预报它们的发生更加困难。2006年7月3日傍晚前后开始,受弓形回波带影响,盐城地区自北向南出现了区域性暴雨局部大暴雨,并伴有强雷暴和8~9级雷雨阵风,其中盐城本站1 h出现了93.4 mm的短历时特大暴雨;20时(北京时,下同)左右阜宁县杨集镇以及22时10分到22时30分大丰市新丰镇的两个村遭受了龙卷袭击,造成3人死亡,18人受伤,86户388间主房、附房124间倒塌,185户552间房屋受损,损失巨大。本文利用地面自动站、多普勒雷达(CINRAD-SA型)等资料,对这次强对流天气过程进行分析,为今后此类过程的短时临近预报总结一些很有价值的经验。

1 天气形势背景

7月3日天气图上(图1),500 hPa河套东部有西槽东移,副高脊线在 21°N 附近;700 hPa和850 hPa上盐城处在副高边缘西南暖湿急流(16~20 m/s)中,黄淮之间存在暖式切变;20时地面图上,淮北地区有闭合低压发展,地面切变线自西北向东南影响江苏省。7月3日20时江苏射阳探空资料显示:CAPE(convective available potential energy,对流有效位能)达2871.9 J/kg,表明有强不稳定,抬升凝结高度在968 hPa附近(500~600 m高空), 0°C 层高度在600 hPa附近。射阳20时的风廓线(略)显示低层为南风,随着高度的增加,风向呈顺时针旋转而逐渐变为偏西风,垂直风切变在0~6 km约为14 m/s,在0~1.5 km约为6 m/s,低层的垂直风切变并不大。由此分析,此次强对流天气过程发生在江淮梅雨期暴雨的天气背景下,高空处在槽前,受深厚西南风控制,低空暖湿急流活跃。研究表明:在由暖湿气流输送引起的对流不稳定区等天气尺度环境下,出现在500 hPa槽前的“湿”对流风暴,其伴随的

天气现象主要是强雷雨(陆汉城,2000),7月3日盐城地区的短时强降雨正是发生在这样的环境背景下。文中的非超级单体龙卷发生在较小的低层垂直风切变环境下,大的CAPE以及低的抬升凝结高度都是非超级单体龙卷发生的有利条件。

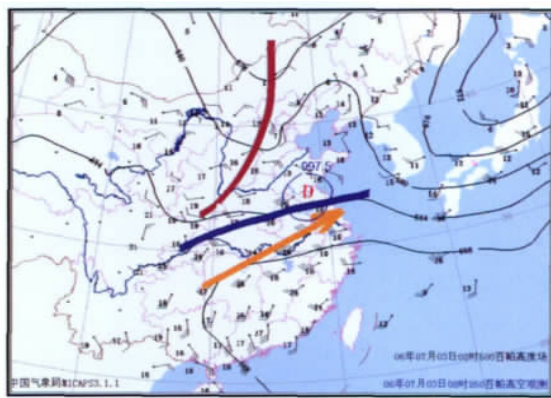


图1 7月3日08时500 hPa高度场和850 hPa风场(棕色粗线为高空低槽、蓝色粗线为地面准静止锋、黄色箭头为700 hPa急流轴)

Fig. 1 The 500 hPa height field and 850 hPa wind field at 08:00 BST 3 July (thick brown line is the upper trough, thick blue line is the quasi-stationary front at surface, and the yellow arrow is the jet axis at 700 hPa)

2 地面中尺度风场

利用地面自动气象观测站10 min一次的风场资料进行地面中尺度分析,发现强对流天气发生时一般都有中尺度辐合系统相配合,为强对流天气的发生发展提供了强劲的上升运动。

图2为7月3日17—22时的地面流场。17时在新沂附近有中尺度涡旋I影响,直径大约为200 km,新沂过去1 h降水量为17.0 mm;18时,涡旋I东移到东海一带,沭阳附近又产生新的中尺度涡旋II,直径大约为300 km,在涡旋I的影响下东海过去1 h降水量为19.4 mm,沭阳在中尺度涡旋II的影响下1 h降水量为35.7 mm;19时,涡旋I继续东移到灌云一带,涡旋II在东移过程中分解为2个小涡旋,中心分别位于灌南和泗阳,三地过去1 h降水量分别为43.1、36.6和21.5 mm;之后涡旋I基本停滞在连云港一带并开始加强,涡旋II东移至滨海、阜宁并加强,在涡旋II的影响下,19:30—20:30阜宁和滨海的1 h降水量分别为64.6和30.0 mm,阜宁站出现了21.3 m/s的西南强风,20时01分阜宁杨集的龙卷风天气正是涡旋东移影响过程中发生

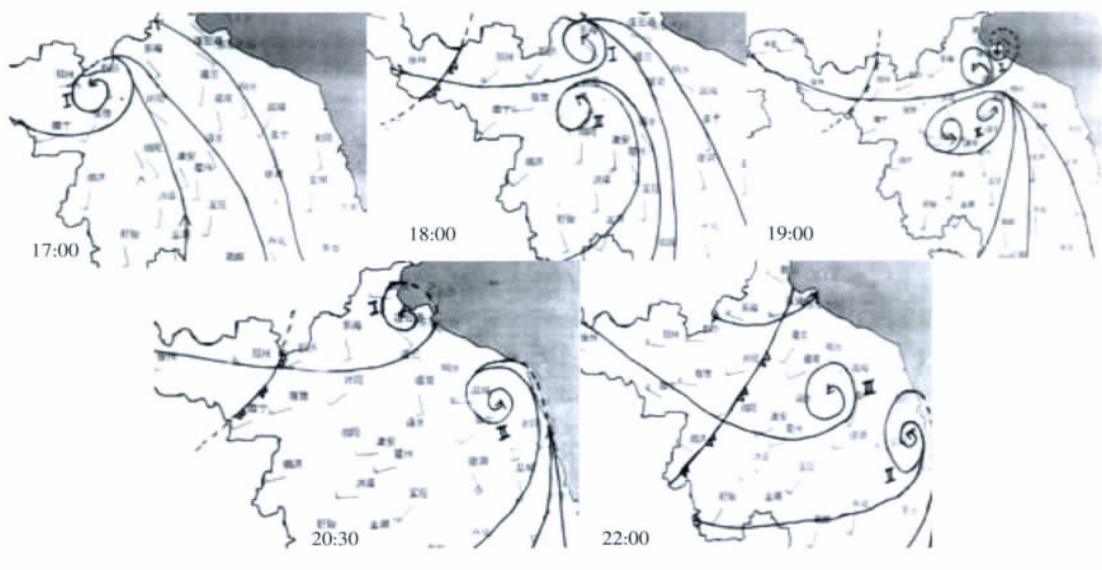


图2 7月3日17:00、18:00、19:00、20:30和22:00的地面流场中尺度分析

Fig. 2 Mesoscale analysis of surface flow fields at 17:00, 18:00, 19:00, 20:30, and 22:00 BST 3 July

的;在22时地面流场上可看到涡旋Ⅱ东移南压到盐城并继续加强,涡旋将大量的西南暖湿空气卷入,上游地区的西南风速为8~12 m/s,水汽在盐城一带形成辐合,使得局地气旋涡度加强,导致盐城21—22时的1 h降水量达93.4 mm,这种超强降水是很罕见的,在涡旋的影响下盐都站还产生了18 m/s的西北大风。从地面流场上还可清晰地看到一条切变线自西北向东南方向移动,中尺度涡旋都产生在地面锋区暖区一侧,地面中尺度涡旋的发展、合并和扩散维持了多股持续强劲的上升气流,为槽前“湿”对流风暴的产生提供了良好的动力条件。

3 雷达回波分析

3.1 龙卷特征分析

3日下午盐城雷达测站西北100 km以外有大片降水回波向测站方向移动,回波以层状为主,夹有40~45 dBZ的积状回波块,在其偏东移动的方向上不断有较强回波生成并入,逐渐在层状回波中形成了一条典型的弓形回波。17:21的径向速度图(图3a)上显示:靠近雷达的低层零速度线呈“S”型,有暖平流;远离雷达的西北部零速度线呈现锋面特征,说明高层有冷平流;下暖上冷的结构有利于深对流的发生、发展。“牛眼”结构说明盐城上空有中空西南急流,入流中心速度达到24 m/s,出流中心速度为17 m/s。

弓形回波是一种对流性回波的中尺度结构,它常常引起毁灭性强风和非超级单体风暴龙卷。

19:55在阜宁杨集上游附近出现了小尺度涡旋(气旋式)特征,负速度中心较明显,正速度中心范围很小,仅以像素显示。20:01(图3b)涡旋移到杨集,正负中心都比较清楚,0.5°仰角上(800 m高度)的转动速度(正负中心速度绝对值之和的二分之一)为15 m/s,一个体扫后涡旋加强,0.5°仰角上的转动速度为22 m/s,下一个体扫涡旋开始减弱并继续东移,20:19涡旋完全消失,前后维持了近25 min。杨集龙卷正是发生在该涡旋发展最强的时候,对比4个仰角的反射率因子强度发现,该区域是反射率因子梯度较大的地方,0.5°仰角的反射率因子呈现出较弱的前侧V型槽口,从前侧V型槽口向上,反射率因子向入流一侧倾斜,表明了低层的弱回波区和中层的悬垂结构,对应的反射率因子剖面(图3c)能清楚地反映出这一特征。20:01的雷达60号产品(中气旋产品)指示有中气旋在杨集附近,之后两个体扫内均有中气旋指示,同时20:13在杨集附近有TVS(龙卷涡旋特征)指示。

大丰龙卷的径向速度(图4a—c)具有明显的小尺度涡旋特征,分析可知,小尺度涡旋开始产生在1.5°仰角上,转动速度为15 m/s,1个体扫后向东南方向移动约5 km后进入大丰境内,1.5°仰角转动速度增强到17 m/s,之后维持该强度向偏东方向移动2 km,22:16涡旋向东北方向移动4 km并向上向下发展(4个仰角上的转动速度分别为12、20、17.5和17 m/s),再经过1个体扫后小尺度涡旋发展到最强(4个仰角上的转动速度分别为20、17、20和17.5

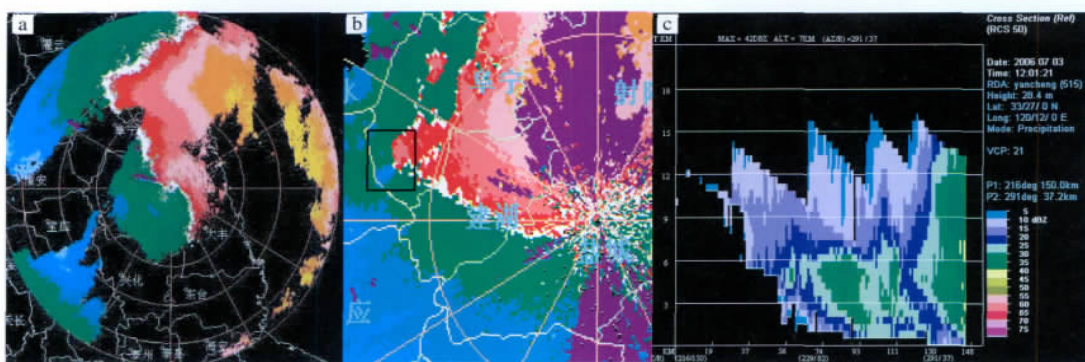


图 3 多普勒雷达观测的 17:21 径向速度特征(a; 3.4° 仰角)、20:01 中气旋速度特征(b; 0.5° 仰角) 和 20:01 反射率因子剖面(c)

Fig. 3 (a) Radial velocity characteristics (elevation: 3.4°) at 17:21 BST, (b) velocity characteristics of mesocyclone (elevation: 0.5°) at 20:01 BST, and (c) reflectivity factor profile at 20:01 BST observed by Doppler radar

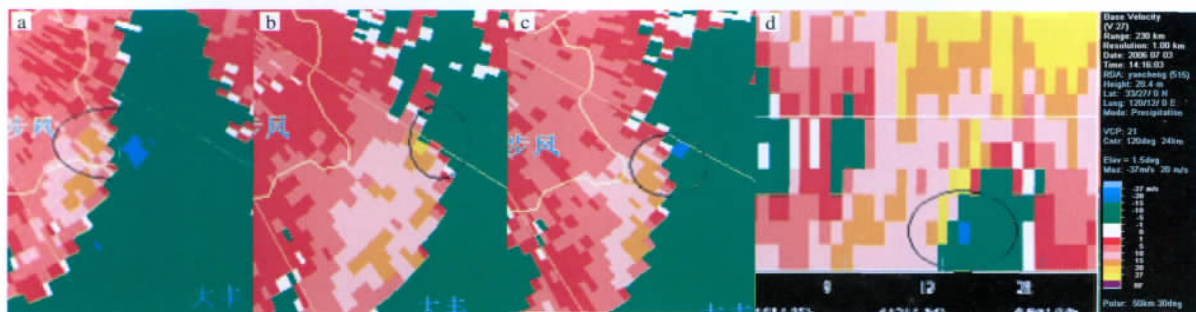


图 4 大丰龙卷 1.5° 仰角的径向速度演变(a. 22:09; b. 22:16; c. 22:22) 以及通过 22:22 的 1.5° 仰角小尺度涡旋正负速度中心的速度垂直剖面(d; 负速度表示向着纸面的方向, 正速度表示离开纸面的方向)

Fig. 4 Doppler radar radial velocity (elevation: 1.5°) of the tornado in Dafeng at (a) 22:09 BST, (b) 22:16 BST, (c) 22:22 BST, and (d) the vertical profile of radial velocity at 22:22 BST (the negative velocity indicates the direction toward the paper surface (towards the radar), and the positive away from the paper surface)

m/s), 之后除 1.5° 仰角维持, 其他各层均减弱, 22:33 小尺度涡旋完全消失。图 4d 为通过 22:22 的 1.5° 仰角小尺度涡旋正负速度中心做垂直于雷达径向的速度垂直剖面(图中负速度区为向着纸面的方向, 正速度区为离开纸面的方向), 可见, 在水平坐标 19~23 km 刻度内有小尺度涡旋特征, 其垂直伸展度约为 2.5 km。胡明宝等(2000)指出, 中气旋的垂直伸展厚度必须大于等于 3 km, 速度分布特征起源于中层(5 km 以上), 并向上向下增长。大丰龙卷相应的涡旋的垂直伸展厚度并未达到该标准, 虽其一开始在 1.5° 仰角上产生, 后向上向下发展, 但仅限于 3 km 以下, 且整个过程是一个非超级单体风暴过程, 非超级单体龙卷通常与被成为微气旋的浅薄的、尺度较小的边界层涡旋气流有关, 因此认为, 上述小尺度涡旋是与非超级单体风暴相联系的微气旋。结合地面中尺度分析结果(图 2a—e) 可知, 发

生龙卷时段内地面风场有中尺度气旋和辐合上升速度区, 当遇到事先存在的涡旋时, 涡旋便会被拉伸而加快旋转, 非超级单体龙卷就可能产生。这与由 Wakimoto and Wilson(1989) 提出的非超级单体龙卷生成的概念模型大致类似。龙卷一般不在夜间发生。而此次在夜间发生的龙卷与盐城下垫面前期暴雨产生的积水可能有很大关系, 地面积水使夜间地表温度较高、地面摩擦较小, 这些都是有利于强对流天气的产生和维持。

3.2 龙卷级别判定

一般采用 Fujita 等级来确定龙卷的强度, 但龙卷引起的最大风速难以测定。邵玲玲等(2006)利用中气旋的强度结合灾情判定了一次龙卷的强度, 本文采用该方法对 2006 年 7 月 3 日发生在阜宁杨集的龙卷强度进行简单判定: 中气旋的转动速度最强为 22 m/s, 发生地距离雷达约 65 km, 其强度达到

了强中气旋级别;龙卷造成杨集数百间房屋倒塌、比较粗壮的树木连根拔起,还有人员伤亡,由此判定此次龙卷强度达到 F2(大风灾)级别。

3.3 短时强降水雷达特征分析

单站 1 h 雨量大于等于 5 mm 为该小时本站具有强降水,1 h 雨量大于等于 50 mm 则为短时特大暴雨。盐城站 21—22 时的 1 h 降水量达到了 93.4 mm,实属罕见。研究表明:50 dBZ 强度回波的出现标志着降水强度加强,消失标志着降水强度开始减弱(廖玉芳等,2004);强回波面积是判断强对流天气的一个很好指标(马中元等,2004)。分析盐城发生强降水集中时段前后的反射率因子发现,弓形回波前沿 20:44 开始影响测站,22:22 离开测站。20:56(图 5a) 0.5°~3.4°的 4 个仰角反射率因子图上,大于 50 dBZ 的强回波面积占到弓形回波主降水带的 1/3~1/2,其中 0.5°仰角最大,往上递减,但 2.4°和 3.4°仰角上出现了中心为 58 dBZ 的强回波,大于 50 dBZ 的强回波面积维持到 21:14 后开始减小,到 22:03(图 5b) 大于 50 dBZ 的强回波区已移出测站,面积明显变小,强降水正是集中在这 1 h 之内,降水集中时段与降水回波强度和强回波面积大小的变化相吻合,该特征可以作为强降水短时预报的有用指标。短时强降水在雷达回波径向速度上主要表现为“逆风区”特征。逆风区是指,在没有速度模糊的情况下,正速度区内包含负速度区或负速度区内包含正速度区(俞小鼎等,2006)。测站附近的逆风区自西北向东南方向移动,逆风区的一侧为辐合区,另一侧为辐散区,形成了产生暴雨的垂直环流结构,处于辐合区一侧的降水正在发生,处于辐散区一侧的降水趋于减弱。

图 6 为 22:03 的垂直风廓线图。可以看出,21:03 以后中低空急流开始增强,到 21:27 发展到最

强,风速达 32 m/s,21:33 之后中低空急流开始逐渐减弱,测站上空 5 km 以上由西南风转为西到西北风,说明高层弱冷空气开始渗透,盐城本站的短时强降水将发生在中低空急流增强到最强并开始减弱的时间段内。

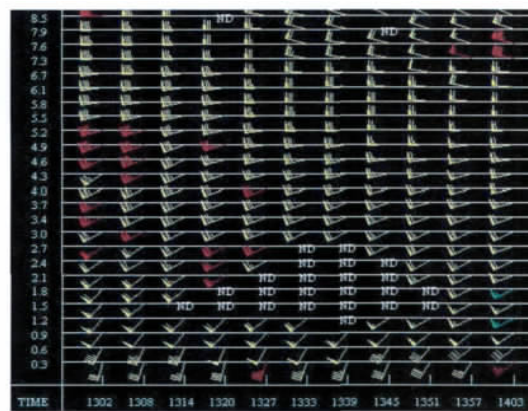


图 6 2006 年 7 月 3 日 21—22 时盐城上空垂直风廓线变化

Fig. 6 The change of vertical wind profile during 21:00—22:00 BST 3 July 2006 at Yancheng City

4 结论

通过以上分析知道,本次过程是在江淮梅雨期暴雨的天气形势下,由中尺度辐合系统引起的强对流天气过程。

1) 短时强降水和雷雨大风发生时,地面有中尺度涡旋的生成、发展和移动相配合,为强对流天气的发生、发展提供了强劲的上升运动。通过布局越来越密集的自动站可获取 10 min 一次的高密度气象资料,据此进行地面流场的中尺度分析能够有效提高强对流天气的短时临近预报能力。

2) 非超级单体龙卷发生在较小的低层垂直风

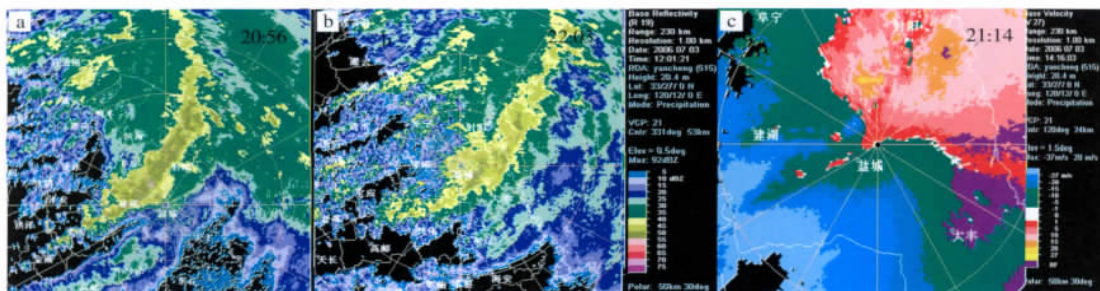


图 5 短时强降水的雷达反射率因子(0.5°仰角)和速度“逆风区”特征(1.5°仰角) a. 20:56 反射率因子; b. 22:03 反射率因子; c. 21:14 速度“逆风区”特征

Fig. 5 Doppler radar reflectivity factor characteristics (elevation: 0.5°) at (a) 20:56 BST, (b) 22:02 BST, and (c) the adverse wind area characteristics (elevation: 1.5°) at 21:14 BST during the short-term heavy rain

切变环境下,大的 CAPE 以及低的抬升凝结高度是龙卷发生的有利条件。在多普勒雷达反射率因子垂直剖面图上,非超级单体龙卷反映出弱回波区和悬垂结构;径向速度图上表现为小尺度涡旋特征,当其满足一定的切变、垂直伸展厚度和持续性判据时,称之为中气旋,当其达不到中气旋判据时,称之为与非超级单体相联系的微气旋,这些微气旋易于沿着中尺度地面边界或在其相交区发展,当正在发展中的上升气流遇到事先存在的涡旋时,涡旋便会被拉伸而加快旋转,非超级单体龙卷就可能产生。雷达可以提前探测到这些小尺度涡旋,并可能在中气旋产品中给出相应指示,结合地面中尺度分析,应当可以对龙卷的发生进行有效预警。

3) 短时强降水的发生和大于 50 dBZ 的强回波面积的变化相吻合,50 dBZ 强度回波的出现标志着降水强度加强,消失标志着降水强度开始减弱;在雷达回波径向速度上主要表现为“逆风区”特征,逆风区的一侧为辐合区,另一侧为辐散区,形成了产生暴雨的垂直环流结构,处于辐合区一侧的降水正在发生,处于辐散区一侧的降水趋于减弱;垂直风廓线变化表明,短时强降水发生在中低空急流增强到最强并开始减弱的时段内。以上可作为强降水短时临近预报的有用指标。

参考文献:

胡明宝,高太长,汤达章. 2000. 多普勒天气雷达资料分析与应用 [M]. 北京: 解放军出版社: 190-191.

廖玉芳,俞小鼎,邹用昌. 2004. 基于多普勒雷达速度场的暴雨分型模型 [C] // 中美强对流天气临近预报技术国际研讨会文集. 北京: 气象出版社: 262.

廖玉芳,俞小鼎,唐小新,等. 2007. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征 [J]. 南京气象学院学报, 30(4): 433-443.

陆汉城. 2000. 中尺度天气原理和预报 [M]. 北京: 气象出版社: 251-276.

马中元,许爱华,郭艳. 2004. “7. 17”庐山雷击事件的个例分析 [C] // 中美强对流天气临近预报技术国际研讨会文集. 北京: 气象出版社: 154.

邵玲玲,黄宁立,郭锐,等. 2006. 一次强飚线天气过程分析和龙卷强度级别判定 [J]. 气象科学, 26(6): 627-632.

杨成芳,朱君鉴. 2008. 一次弓状回波和超级单体过程的多普勒天气雷达资料分析及其与大气热源的关系 [J]. 气象科学, 28(4): 409-414.

俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社.

郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004a. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析 [J]. 气象学报, 62(3): 317-328.

郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004b. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析 [J]. 气象, 30(1): 38-40.

周海光,郭富德. 2007. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统结构模型的双多普勒雷达研究 [J]. 南京气象学院学报, 30(1): 1-8.

Batta L J. 1973. Radar observation of the atmosphere [M]. Chicago: The University of Chicago Press.

Fujita T T. 1963. Analytical meso-meteorology: A review, severe local storms [J]. Meteor Monogr, 5(27): 77-125.

Lemon L R, Doswell C A III. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis [J]. Mon Wea Rev, 107: 1184-1197.

Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes [J]. Mon Wea Rev, 117: 1113-1140.

(责任编辑: 倪东鸿)