

# 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析\*

何彩芬<sup>1)</sup> 姚秀萍<sup>2)</sup> 胡春蕾<sup>1)</sup> 全彩峰<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(浙江省宁波市气象局,宁波 315012)

<sup>2)</sup>(中国气象局培训中心,北京 100081)

## 摘要

通过分析2004年8月25日发生在浙江省宁波市的一次台风前部龙卷发生发展的环境特征,发现该龙卷发生在台风前部风切变区里,尽管当时湿度、散度等物理量对于深对流发展不是非常有利,但下湿中干、强的垂直风切变及地形条件等还是有利于局地弱龙卷的产生;在宁波新一代天气雷达产品上表现为强的钩状回波,速度场上有相邻的正负速度中心及强的组合切变值等。通过多个反射率产品、剖面产品等综合分析了该风暴的三维结构,初步了解此类弱龙卷的发生机理,为以后的预报提供一些经验。

关键词:台风前部龙卷;垂直切变;多普勒天气雷达

## 引言

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,它的直径一般从几十米到几百米,可造成重大的人员伤亡和财产损失。龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷<sup>[1-2]</sup>。超级单体龙卷由超级单体风暴产生<sup>[3]</sup>,通常与中气旋(mesocyclone)相联系,而非超级单体龙卷与非超级单体风暴相联系,通常与被称为微气旋(misocyclone)的浅薄的、尺度较小的边界层涡旋气流有关<sup>[4]</sup>。

2004年8月25日凌晨01:50(北京时,下同)左右,浙江省宁波市鄞州区高桥镇的高桥村至高峰村宽约40~50 m、长约6~7 km呈东北偏东—西南偏西走向的带状地区发生了龙卷风。从建筑物受损程度分析,过程风力大,一幢3000余平方米钢架结构厂房的铁皮盖棚一半被掀翻,其中10余块长条铁皮盖棚被吹到了百米外的电线上;有栋民居二楼的栋梁被吹断。1米多高的甘蔗林被吹毁不少,并且甘蔗林倒伏方向呈逆时针旋转。据现场目击村民介绍,受影响前听到象火车汽笛一样的尖锐啸声,并且看到有一团黑云突然袭来,从听到声音到成灾,前后只有2~3 min。这次过程致使高桥镇有6个行政村受灾,124间楼房、180间平房、9.2 hm<sup>2</sup>农作物、43

档低压线、3200 m<sup>2</sup>的钢棚及1000只鸡鸭受损,直接经济损失185.06万元,所幸的是没有出现人员伤亡。

这次过程,宁波的多普勒雷达当时并没有自动识别出中气旋及龙卷涡旋特征等,但是由于雷达是近距离观测,多个雷达产品还是反映了龙卷回波<sup>[5]</sup>的一些特征:回波强度大于50 dBz;出现钩状回波,有界弱回波区(BWER)特征;在速度场上显示有相邻的正负速度中心。根据龙卷的FPP分级<sup>[5]</sup>,认为龙卷等级达到F1级。本文试图通过分析此过程的天气背景、物理量及回波特征等,了解此类龙卷发生的机理及为以后的预报提供一些经验。

## 2 龙卷发生发展的环境特征

### 2.1 天气尺度环流背景

2004年8月23—24日,“艾利”台风自东向西向福州挺进,在长江中下游地区为庞大的大陆高压控制,东部沿海还有减弱冷槽的残余影响。在24日20:00的500 hPa高空图上(图1a)可看到,在台风前沿与副热带高压之间形成了较强的风切变线。而龙卷的发生地宁波高桥镇正处在强风切变线的右侧,对应24日20:00和25日02:00地面图则处在风速切变区里(如图1b、图1c所示)。可见龙卷的产生与

\* 国家自然科学基金项目(40205008)资助。

2005-07-08收到,2005-11-02收到再改稿。

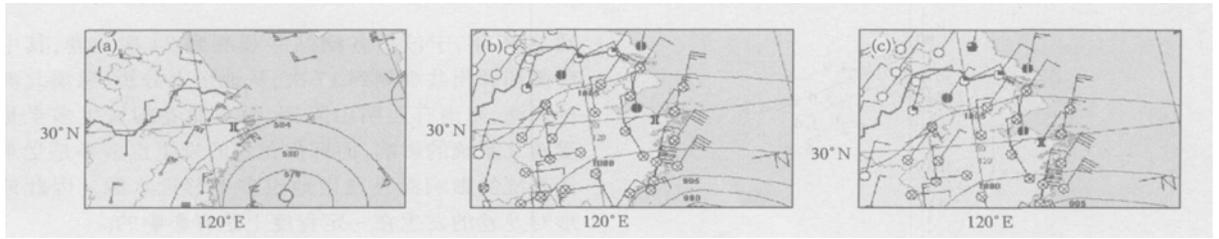


图1 2004年8月24日20:00 500 hPa高空图(a)、地面图(b)和8月25日02:00的地面图(c)

边界层辐合切变线密切相关<sup>[1]</sup>,由于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,龙卷就可能形成<sup>[6-7]</sup>。本次台风前部龙卷正是在这样的天气背景下产生的。

## 2.2 不利于深对流发展的物理量特征

从天气实况看,24日白天宁波地区多云到阴,傍晚开始受台风外围云系的影响,出现零星阵雨,直至25日08:00周边测站都是弱的阵性降水,均未出现雷暴天气。分析物理量场,宁波市鄞州区24日20:00除低层925 hPa以下是正涡度区外(图略),850 hPa以上各层均对应于负涡度区,25日08:00随着台风的进一步西进,正涡度区也仅上升到850 hPa;从垂直速度场(图略)来看,在24日20:00和25日08:00,上升区都在850 hPa高度以下;对应散度场,除925 hPa以下是负散度外,以上则都是正散度区;相应的沙氏指数也接近于0。从以上物理量特征来看,对流层浅,似乎并不具备深对流发展的条件。事实上宁波地区也没有出现大范围的强对流天气,那么产生此次龙卷的热力条件和动力条件是什么呢?

## 2.3 有利于龙卷发生发展的热力条件——下湿中干的不稳定层结

对流风暴的发展,依赖于大气的热力和动力条件。影响对流风暴发生发展的最重要条件是:中层干空气和强的垂直风切变<sup>[8]</sup>。

分析24日20:00和25日08:00湿度场,发现低层1000 hPa至850 hPa之间  $T - T_d$  都在  $0 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,较为湿润,而中高层则相当干燥,700 hPa以上层,  $T - T_d > 8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,500 hPa层  $T - T_d > 24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。假相当位温500 hPa层以下也都是随高度递减的(图略),即呈对流性不稳定。加之白天最高气温也达到了  $30.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,表明当时的大气还是具备一定的能量条件。

## 2.4 有利于龙卷发生发展的动力条件——强的垂直风切变

风廓线产品 VWP 是假设雷达站周围 30 km 范

围内,水平风场是均匀分布的条件下,根据多普勒天气雷达不同仰角的风场资料在 VAD 处理的基础上反演出来,可反映测站平均风场的垂直分布随时间变化。

这次龙卷的发生地高桥镇离测站的直线距离为 25 km 左右,测站的风场基本上可反映当地的风场。下面就用该产品来分析风在垂直方向上的分布特征。从8月24日21:00开始到龙卷发生前在低层风向随高度都是有序的顺时针旋转(组织完善的风暴往往是这种结构),但顺时针方向旋转的角度不超过  $90^\circ$ 。宁波的地面测站鄞州站风速基本上都小于  $4 \text{ m/s}$ ,而在  $0.6 \text{ km}$  高度层以上则都是  $10 \text{ m/s}$  以上的东北或偏东大风,即低层的风速切变很大。

根据风廓线产品(彩图2)分析龙卷发生前1h的速度矢图,其明显的特征是低层风速随高度是有序的顺时针旋转,并具有正的螺旋度(图3)。螺旋度是表征外界气流对风暴所输送的旋转程度的物理量,研究表明,螺旋度对雷暴、龙卷、大范围暴雨等天气的发生有一定的指示作用<sup>[9]</sup>,稳定的强风暴常发生在螺旋度值大的地方<sup>[10]</sup>。螺旋度严格定义为:

$$H = \iiint V \cdot (\nabla \times V) d\tau$$

在实际应用中运用简化的公式:  $H = H + u_i \times v_{i-1} - u_{i-1} \times v_i$ ,  $u_i, v_i$  是  $0 \sim 3 \text{ km}$  层面间的实际风速,  $u_0, v_0$  是地面风场。  $i = 0, \dots, 8$ , 对应的层面分别为地面,  $0.6 \text{ km}, 0.9 \text{ km}, 1.2 \text{ km}, 1.5 \text{ km}, 1.8 \text{ km}, 2.4 \text{ km}, 2.7 \text{ km}, 3 \text{ km}$  经计算从地面到  $3 \text{ km}$  的高度层间风暴螺旋度达到  $380 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,有利于风暴中上升气流的旋转和发展加强。理论证明,这种风暴可从平均气流中获取能量,并且由于螺旋度的存在,抑制了湍流能量的串级,从而有利于对流风暴的长时间维持。同时,在浮力和螺旋度的共同作用下,使旋转上升气流进一步增强,在下沉气流前侧边缘为局地涡源区,那里有利于龙卷产生<sup>[10]</sup>。

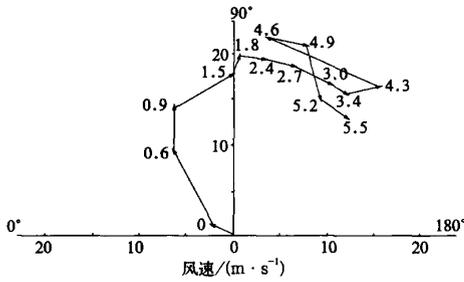


图3 2004年8月25日01:00地面到5.5 km 的风速矢图(纵横坐标为风速标尺,单位:m/s; 图中数字为高度,单位:km)

### 2.5 地形的辐合抬升作用

宁波市鄞州区三面环山,形同处在一个大的喇叭口中,其口朝向东北方向。西南面的四明山与东南面的天台山绵延起伏,最高峰海拔高度达1000 m 以上,因此东北方向来的大风受山脉的阻挡,容易沿着山脉形成弱的涡流,而在涡流的中心地带会形成相对较弱的上升气流。龙卷的发生地旁边还有一条小河,夏季的午夜,河陆之间的温湿还是有一定的梯度差,也容易形成小尺度环流。据不完全统计,自1954年

到1996年,宁波市各测站共观测到24次龙卷,其中慈溪和鄞州共观测到17次,从地形上分析,慈溪北濒杭州湾,东南有西明山阻挡,而其龙卷的发生多半是受西北系统的影响,而鄞州龙卷的发生也多半是受东面系统的影响而且发生地也多半邻近水源。因此地形对龙卷的发生在一定程度上是有影响的。

### 3 多普勒天气雷达资料分析

#### 3.1 反射率因子的演变特征

联合组合反射率及其等值线产品,可清晰地了解回波的发展演变情况(图4)。从图4可以看到,产生龙卷的风暴A于8月25日00:18开始在海上形成单体,之后逐渐发展加强,并缓慢西移。00:36与其西侧的回波单体B合并加强,在随后的时次里两个单体又分离后各自加强。00:48 A单体的回波强度达48 dBz,此时雷达开始给风暴进行编报,01:00强度增强到53 dBz,并进入宁波边界,01:24在回波前进方向的左侧出现明显的V形无回波区,钩状回波清楚。

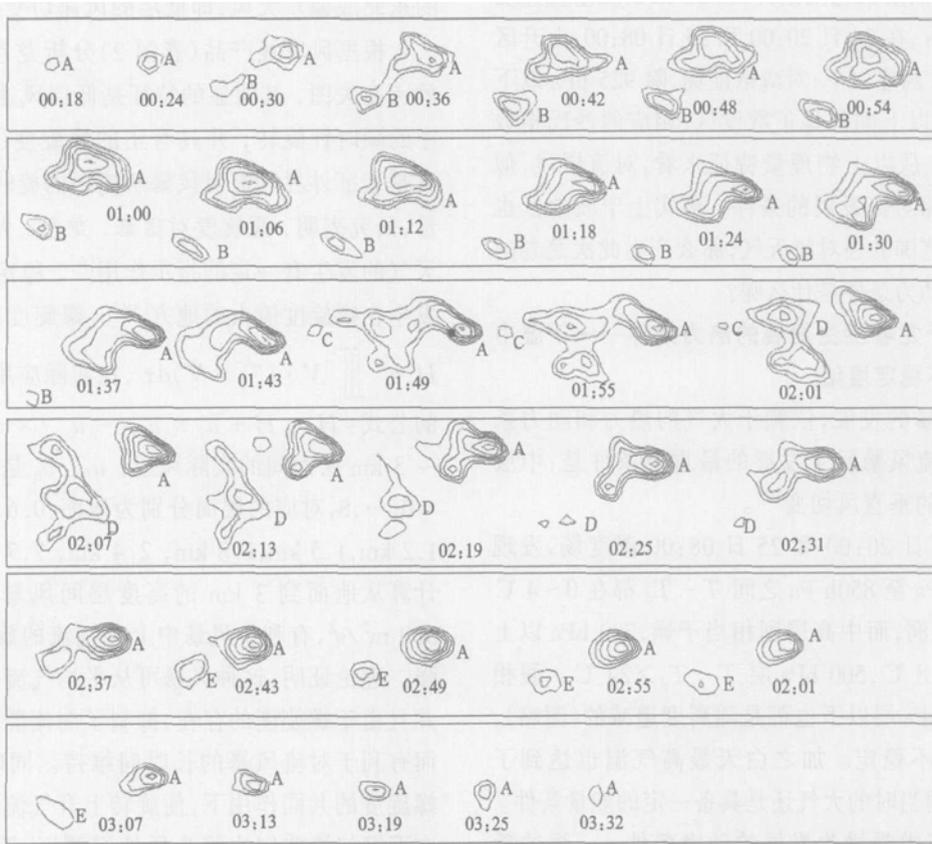


图4 2004年8月25日00:18—03:32 风暴的发展演变 (01:49 图中圆黑点为龙卷发生的位置,等值线最外圈为20 dBz,由外向内,间隔为5 dBz)

风暴是自东向西运动,当时中高空的风向为东南偏东风,在回波梯度较大处即在风的入流侧出现 V 形无回波区,此时回波最强达到 58 dBz,在随后的 4 个时次,入流侧 V 形无回波区进一步加大,回波强度也达到了 60 dBz,风暴内并有新单体产生,但风暴顶高却从 8 km 下降到 6 km,强回波的顶高也从 5 km 下降到 3.3 km,强回波的底高则变化到 1 km(图 5),龙卷即发生在 01:50 左右,并伴有少量降水,但没有发生冰雹的报告,当时雷达显示垂直液态水含量仅为  $11 \text{ kg/m}^2$ 。01:55,回波强度为 59 dBz,强回波的底高回升到 1.5 km,02:01 回波分裂成两大块,此时回波强度还有 58 dBz,之后回波强度逐渐减弱,02:50 雷达不再编报,03:32 后完全消亡。从以上分析可知,该风暴从形成到完全消失,历时 3 个多小时,而龙卷发生的位置是在入流侧 V 形无回波区附近回波梯度最大的一侧。说明强的上升气流是龙卷产生发展的重要原因。

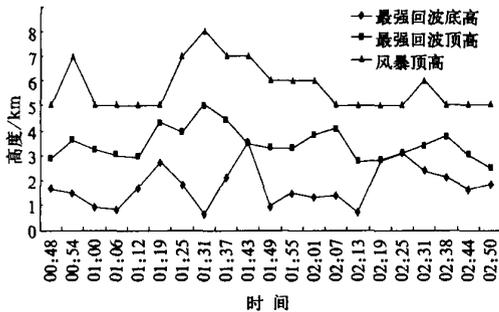


图 5 风暴单体最强回波顶高、底高及风暴顶高的时间演变曲线

另外,风暴单体的强度与风暴伸展的高度或者风暴最强回波顶高度密切相关,通常,风暴伸展越高就越强。图 5 给出了雷达编报时段内该风暴最强回波高度及回波顶高的变化,可见,3 条线的变化趋势相似,基本上呈周期性的变化。在风暴的整个发展演变中,风暴的顶高都没超过 8 km,甚至比不上夏季的一般强对流,在龙卷发生时刻风暴顶高也仅 6 km,说明在较低层次也能发展龙卷。另外,01:31 风暴的顶高、强回波顶高及强回波厚度都达到了波峰,而龙卷发生时前两项都降到波谷,即回波高度的下降有时是龙卷将要发生的征兆,这与美国的观测结果是相似的。

### 3.2 径向速度场的表现特征

在 WSR-98D 中,中气旋和龙卷涡旋特征都是根据体扫描中速度场的切变大小、切变垂直方向的伸展及持续性等 3 方面来有效判别。本个例中的这

次过程雷达并没自动识别出中气旋及龙卷涡旋特征。但速度图上还是出现了短时的几公里尺度气旋特征,在相对运动速度图上则更为明显。由于相对运动速度图减去了由风暴跟踪信息识别的所在风暴的平均运动速度,较之其他速度产品,它更有利于探测到被风暴运动所掩盖掉的切变区域。该产品显示:在 25 日 01:00,在  $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$  和  $4.3^\circ$  仰角产品上开始有辐合出现,01:25 辐合分别伸展到低层  $0.5^\circ$  和高层  $6.0^\circ$  上。01:19 在  $2.4^\circ$  仰角产品上首先出现气旋式辐合,01:31,在  $0.5^\circ$  到  $3.4^\circ$  的仰角产品上都出现了气旋式辐合, $4.2^\circ$  到  $6.2^\circ$  的仰角产品上则出现了未闭合的深对流辐合区, $9.9^\circ$  的仰角产品上也为辐合,而高仰角则表现为明显的辐散。01:37,01:43 则出现较典型的类似成熟中气旋特征,即低层辐合,中层气旋性辐合,而在高层则为辐散,且正负速度中心的距离小于 4 km。01:49 则为低层气旋性辐合,中层气旋,高层辐散(图 6)。在  $1.5^\circ$  的仰角上,正负速度中心的距离为 3.8 km,正负速度的绝对值和为  $40 \text{ m/s}$ ,旋转速度为  $20 \text{ m/s}$ ,此时与雷达的距离是 22 km,还没达到中气旋的标准。01:55  $0.5^\circ$  相对运动速度图上表现为气旋式旋转,而对应时次的  $1.5^\circ$  以上仰角产品都出现了辐散,02:01 上述气旋性特征基本上减弱不见。

总之,不同高度的径向速度场描述了类似于中气旋(mesocyclone)的径向速度分布特征,体现了龙卷回波的特征。

另外,反映平均径向速度在径向和方位切变的产品——组合切变 CS 在这次过程中也有很好的反映:01:31 该风暴的最大切变值为  $90 \times 10^{-3}/\text{s}$ ,01:43 为  $139 \times 10^{-3}/\text{s}$ ,01:49 达到最大  $189 \times 10^{-3}/\text{s}$ 。01:55 减弱为  $80 \times 10^{-3}/\text{s}$ 。切变值越大,湍流就越强,对应的天气也就越剧烈。统计表明,出现  $100 \times 10^{-3}/\text{s}$  以上的强切变值就应注意强天气的发生,配合其他产品,CS 产品对识别龙卷还是有一定的意义的。

从以上分析可知,从 01:37 雷达观测到几公里尺度的弱气旋式涡旋的特征到 01:49 发生龙卷,其时间间隔为 12 min,而仅观测到弱的风暴尺度气旋是不可能发布龙卷警报的。

### 3.3 风暴的三维结构特征

Le mon 提出,应用体积扫描方案,可根据高中低仰角的 PPI 回波强度资料,并把它们组合在同一屏幕上显示,从而得到风暴回波的三维结构图像,并可判断对流风暴的强弱<sup>[6]</sup>。彩图 7c 给出了龙卷发

生时低层到高层的 PPI 上的风暴廓线的合成图,从图中可看出,从低层到中层风暴向西北方向倾斜,结合彩图 7a 至 7c,可看出风暴高层的回波分布与低层最大回波强度的位置十分接近。彩图 7a 和 7b 中圆环所示的区域内,弱回波区明显,在剖面产品(彩图 7f,7g)可看出是有界弱回波区,而且风暴向 V 形无回波区一侧倾斜。在龙卷发生的时刻,回波高度仅 6 km 左右,最强回波底下降到 1 km 左右。从发展演变看:25 日 01:43 V 形无回波区上升到 6.0°仰角产品上,而 6.0°,9.0°仰角产品上(图略)回波后侧也开始出现 V 形槽口,也即开始有下沉气流产生,01:49 V 形无回波区延伸到地面 1 km,同时其后侧的 V 形槽口也下降到较低层(如彩图 7b 白色箭头所示,弱回波区产品 WER 也有清楚显示),在对应时刻的速度剖面产品上也可看到明显的下沉气流,在 3 km 的高度上有深辐合区(deep convergence zone)存在,对应的谱宽产品也显示有较强的湍流。从垂直风廓线产品上显示,在此之前的时刻,风向随高度都是有序的顺时针旋转,也即都是暖平流的特征,而在 01:49 中层 2.4 到 2.7 km 高度处出现大的风向切变且风向逆转(如彩图 2 所示),表明中层开始有冷空气侵入,大气更不稳定,此刻也正是龙卷发生的时刻。01:55,中高层的 V 形无回波区明显减弱,而后侧的 V 形槽口也基本上消失不见,此时风暴减弱,风廓线产品中中层的风向逆转也消失,02:01 该风暴分裂成两个,上述特征也均减弱消失。

从上面分析可知,该风暴表现出有界弱回波区特征,龙卷发生时回波顶高也只有 6 km,在其发生发展中与干冷空气的侵入密切相关。利用弱回波区产品联合剖面产品、风廓线产品等可大致分析风暴的三维结构,在了解天气背景和确定可能产生的风暴类型后,可预测强天气可能出现的发展演变等。

#### 4 结论和讨论

1) 台风前部微龙卷的产生与台风前部风切变有很大的联系,在不具备深对流发展的涡度、散度等条件下,在满足下湿中干的热力条件和具有强的垂直风切变等动力条件下,在利于形成涡流附近的地方局地弱龙卷容易发生。

2) 从新一代天气雷达资料分析,龙卷风暴历时 3 h 之多,龙卷发生时回波高度的伸展不超过 6 km。

龙卷发生在 V 形无回波区附近回波梯度最强的一侧,说明强的上升气流是龙卷产生的重要原因。

3) 从分析中发现,多个雷达产品对此类龙卷的产生有一定的指示作用:回波强度达 60 dBz 的钩状回波,风暴相对运动速度图 5 个体扫显示有小尺度气旋特征,组合切变值最大达  $189 \times 10^{-3}/s$  等。但龙卷的提前预警时间短,风暴相对运动速度图产品显示有几公里尺度的弱气旋式涡旋特征出现到龙卷的发生仅 12 min。

4) 此类龙卷的发生机理可能是水平风切变产生气旋式涡旋,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,龙卷就可能形成;在大的垂直风切变的环境流场中产生水平涡度,使风暴中上升气流的旋转和发展加强,并且在浮力和螺旋度的共同作用下,使旋转上升气流进一步增强,在下沉气流前侧边缘的局地涡源区,产生龙卷。也就是说该龙卷的发生机理同时具有非超级单体龙卷和超级单体龙卷的特征,其回波特征上也表明不是典型的超级单体龙卷或非超级单体龙卷,因此,很可能是介于两者之间的混合型龙卷。

#### 参考文献

- [1] Wilson J W. Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 270-284.
- [2] OTB/ OSF/ NWS. WSR-88 D Operations Course, 1996: 600.
- [3] Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression. *Quart J R Met Soc*, 1976, 102: 499-533.
- [4] Bruce D L, Robert B W. The Numerical Simulation of non-supercell tornadogenesis. Part I: initiation and evolution of pre-tornadic mesocyclone circulations along a dry outflow boundary. *J Atmos Sci*, 1997, 54(1): 32-59.
- [5] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 396-397.
- [6] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 新一代天气雷达原理和应用讲义. 北京: 中国气象局培训中心, 2000: 163-197.
- [7] 郑媛媛, 俞小鼎, 方羽中. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代雷达分析. *气象*, 2004, 30(1): 38-40.
- [8] 陆汉城. 中尺度天气原理和预报. 北京: 气象出版社, 2000: 251-262.
- [9] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展. *气象科技*, 2005, 33(2): 7-11.
- [10] 陆慧娟, 高守亭. 螺旋度及螺旋度方程的讨论. *气象学报*, 2003, 61(12): 684-691.

## Analyses on a Tornado Event in Front of a Typhoon

He Caifen<sup>1)</sup> Yao Xiuping<sup>2)</sup> Hu Chunlei<sup>1)</sup> Quan Caifeng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ( *Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012* )

<sup>2)</sup> ( *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081* )

### Abstract

By employing the basic and derived data sets from the products of the new generation Doppler weather radar and the conventional weather observation data sets, a tornado event in front of a typhoon happened in Gaoqiao town, Zhejiang Province on 25 August, 2004 is synthetically analyzed. The results show that the intensity of this tornado belongs to the F1 tornado intensity category. And its generation and development has a close relationship with the strong wind shear in front of the typhoon. The vertical humidity change (greater in the lower level and less in the upper level), the significant wind vertical shear and the topographic impact play an important role in the occurrence of the local tornado, though the vorticity and the divergence patterns may not be very essential for the deep convective development. The analysis of the Doppler weather radar output products also indicates that the storm has a life span lasting for more than 3 hours, with its echo top extends the height of less than 6 km. And the tornado locates on the edge of the strongest echo gradient region near the V-shaped weak echo region which means that the strong updraft contributes most to the tornado. It can be discovered that quite a few radar products can help show the occurrence of the typhoon, such as the significant hook echo pattern with 60 dBz reflectivity intensity, microcyclone characteristic in the products of storm-relative mean radial velocity map in all four volume scans, with a maximum composite shear approaching to  $189 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  and so on. But the warning time is only twelve minutes in advance of the occurrence of the tornado and the weak microcyclone has a several-kilometer scale in the vertical direction. Moreover the analysis of the 3-dimensional characteristic of the tornado reveals that the tornado is neither a typical supercell tornado nor a non-supercell one, it is a mixed tornado of the above two kinds. The tornado may develop while a vortex meets with the cyclonic region resulting from the wind vertical shear and the ascending area coming from the convergence effect and rotates acceleratedly. The tornado develops in the edge of the local vortex source in front of the downdraft while the rotation and updraft enhance owing to the great wind vertical shear and the effects of the buoyancy and the helicity. Therefore, the analysis is conducive to the tornado forecast in the future.

**Key words:** tornado in front of typhoon; wind vertical shear; new generation Doppler weather radar

# 何彩芬等：一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析

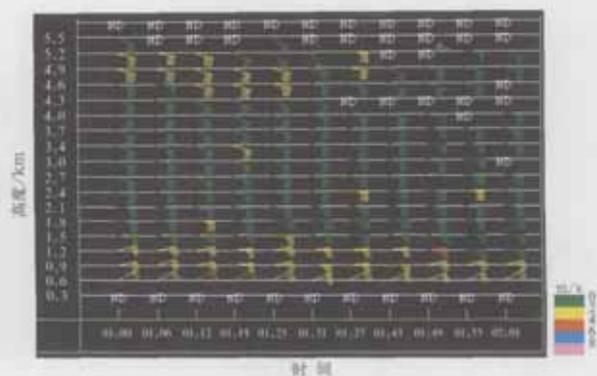


图2 2004年8月25日宁波雷达的风廓线产品

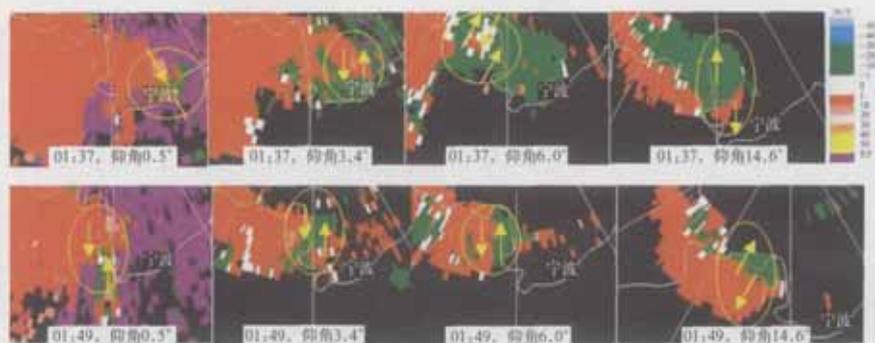


图6 2004年8月25日不同时刻宁波雷达不同仰角的风暴相对平均径向速度图

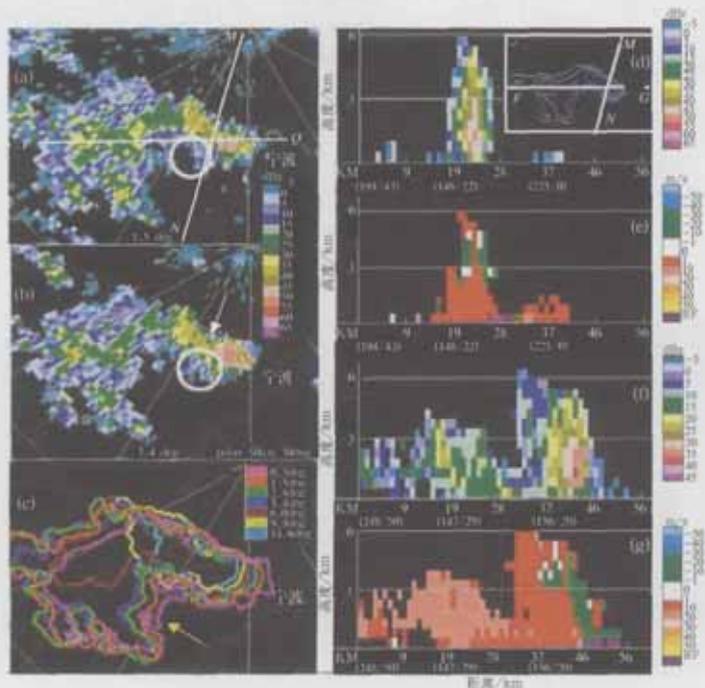


图7 2004年8月25日01:49宁波雷达低层反射率因子产品, 高中低仰角风暴廓线合成图及相应的剖面产品  
(a)仰角为 $1.5^\circ$ 的低层反射率因子, (b)仰角为 $3.4^\circ$ 的低层反射率因子(a,b中圆环给出了弱回波区域, 白色箭头指向后侧V形槽口), (c) $0.5^\circ \sim 14.6^\circ$ 仰角上的风暴廓线合成图(箭头为中高空的风向), (d)沿(a)中MN所得反射率因子剖面, (e)沿(a)中MN所得速度剖面, (f)沿(a)中PQ所得反射率因子剖面, (g)沿(a)中PQ所得速度剖面。