

# 上海一次龙卷风过程分析<sup>①</sup>

陈永林

(上海中心气象台, 200030)

## 提 要

在分析环流背景的基础上结合风廓线仪探测资料对“990906”龙卷风作了较为详细的物理剖析。分析发现, 途经上海市的 9909 号热带风暴的残留涡旋由于西风槽的切入, 动量迅速增大, 形成中尺度强对流辐合云团, 其中生成了 4 个龙卷风暴。龙卷风暴在成熟阶段其环境气团的低空暖气柱逆温结构十分明显, 垂直测风突然逆转了 360°。沙氏指数 SI 小于  $-6^{\circ}\text{C}$ , 气层极不稳定。

**关键词:** 龙卷风 涡旋 MCC 风廓线仪 稳定度 逆温结构

## 1 龙卷风概况

### 1.1 受灾情况

1999 年 9 月 6 日早晨 6 时 50 分到 7 时 55 分的 65 分钟内, 上海市境内的松江、闵行、奉贤、南汇和浦东新区先后遭受了 4 条龙卷风的猛烈袭击(见图 1)。据不完全统计,

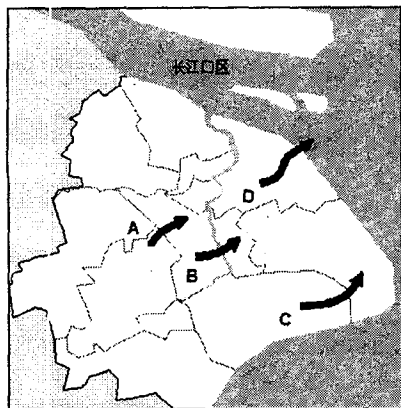


图 1 1999 年 9 月 6 日龙卷路径示意图

受影响地区有 35 人受伤, 近 4 千棵树木被拔起或折断, 最大树径达 40cm, 不少电杆断裂倾倒,  $6 \times 10^4 \text{m}^2$  的居屋、棚舍严重受损或倒塌, 浦东新区有 8 块大型广告牌被吹倒, 松

江区九亭镇山岗农艺公司  $2 \times 10^4 \text{m}^2$  的出口植物管棚被毁。这次龙卷风过程对浦东地区的影响最为严重。

### 1.2 龙卷概况

此次龙卷过程首先于 6 日早晨 6 时 50 分在西郊松江九亭出现 A 龙卷, 随后向东北偏东移动, 于 6 时 58 分在闵行七宝消失; 紧接着于 7 时整在 20km 以南的南郊闵行杜行发生 B 龙卷, 东行至南汇下沙后于 7 时 10 分消失; 约半个小时以后的 7 时 40 分, 在东南郊南汇四团出现 C 龙卷, 约 10 分钟后在南汇县城南减弱; 正当 C 龙卷在向东肆虐时, 在 30km 以北的东郊浦东新区黄楼发生 D 龙卷, 最后于 7 时 55 分在白龙港入海消失。这 4 个龙卷风的移动方向虽有区别, 但基本移向均为偏东方向。移动速度在  $35 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  左右, 着地痕迹长度为 10~20km 不等。据受灾痕迹测定, 4 个龙卷风的最大直径约 150m, 最小直径约 25m。据受损程度分析, 这 4 个龙卷风的强度等级估计为弱到中等强度(即推测的中心风力约  $18 \sim 50 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其中 D 龙卷最为强大。

<sup>①</sup> 风廓线仪资料由黄晓红提供, 雷达资料由杨引明、戴建华、郭敏提供。

## 2 大尺度环流背景

### 2.1 9909号热带风暴

9909号热带风暴 WENDY (温迪) 于9月3日早晨在巴士海峡生成, 4日上午在广东东部的惠来登陆。登陆不久其强度迅速减弱, 在地面和高空已找不到低压环流, 仅在低空的 925~850hPa 上维持着气旋性涡旋。该涡旋在副高西南气流的作用下向长江下游移动。由于西风槽的切入作用, 使涡旋在到达长江下游时范围扩大一倍 (见图 2)。

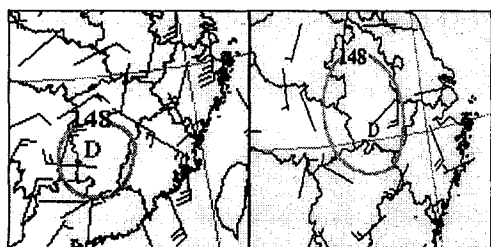


图 2 (左) 9月4日20时、(右) 9月5日20时 850hPa 形势

龙卷风通常产生于涡旋结构之中。本次龙卷过程同样也产生在类似环流背景中, 气旋性涡旋在途径上海时酝酿发展起强烈的中尺度对流辐合体 (见图 3 右), 其中有 4 个单体发展成为龙卷风暴。

### 2.2 西风槽活动

在 WENDY 登陆的同时, 中高纬地区不断有西风槽自西向东移动。9月4日20时首条西风槽进入华东地区, 其 700hPa 槽线在山东西部到安徽中部一线。在卫星云图上表现为低压槽南段云系与 WENDY 的倒槽云系相连接; 5日20时, 第二条西风槽进入华东地区, 且 700hPa 槽线位置也是在山东西部到安徽中部, 卫星云图上表现为低压槽云系与 WENDY 的主体云团相连接。6日凌晨这条西风槽完全切入至位于淀山湖地区的 WENDY 低涡环流内。增强了 WENDY 的涡旋动能, 为龙卷风的生成创造了重要条件。

## 3 中小尺度系统分析

### 3.1 卫星云图分析

在 4~6 日的卫星云图上可以看到: 从 WENDY 登陆到消失的两天多时间里, 共形成过 4 个中尺度强对流辐合云团。第一个形成在 WENDY 刚登陆时的浙南倒槽中, 但由于动能不足而在形成雏形后夭折 (图略); 第二个形成在 4 日 16 时西风槽云系与 WENDY 倒槽云系相结合处的江苏中南部, 虽然强对流辐合云团中没有生成龙卷风暴, 但江苏东台 4 日 20 时的 6 小时雨量达 89mm, 崇明界河达 131mm。随后, 云团继续发展, 在 5 日 4 时进入黄海南部时, 已发展成一个边缘十分清晰, 直径 300km 左右, 面积达近  $10^4 \text{km}^2$  的正圆型 MCC (见图 3 左), 于 5 日 08 时发展成熟; 第三个中尺度强对流辐合云团于 5 日 20 时形成在西风槽和 WENDY 中心的结合地上海, 6 日 7 时发展成熟 (见图 3 右), 就是这个中尺度强对流辐合云团, 导致了上海地区在 65 分时间内几乎同时遭受 4 个龙卷风的猛烈袭击; 最后一个中尺度强对流辐合云团于 6 日中午在黄海南部发展成熟 (图略), 在东移中减弱消失, WENDY 也从此烟消云散, 彻底消亡。



图 3 1999年9月5日04时(左)和6日07时(右)云图

由上可见, 与 WENDY 相关而形成的 4 个中尺度强对流辐合云团中, 只有第三个由于西风槽的完全切入, 使 WENDY 的流型得到重新调整, 涡动动能得到极度增强, 才孕育出了特强的对流单体——龙卷风暴。

#### 4 回波分析

在“990906”龙卷过程中,共收集到4张PPI雷达平面回波图(见图4)和3张剖面回波图。经仔细辨别和外延等分析发现,龙卷风暴回波在上海西郊生成,然后东移进入东海消失。期间龙卷风暴回波的强度和形状均发生了很大的变化。

##### 4.1 龙卷风暴回波演变

这次龙卷风暴回波于6时09分首先在西郊青浦、松江和金山出现,45dBz以上的回波区呈南北排列(见图4a),其中北块回波之上还排列着60dBz以上的强回波中心;6时59分回波东移到达市区、闵行、奉贤等一线(见图4b),此时回波处于旺盛发展时期,北块回波出现分裂,范围扩大,而且所有45dBz回波上均发展有60dBz以上的强回波中心,同时强回波中心面积明显扩大。据当地群众反映,来自于松江九亭的龙卷风此时刚结束对闵行七宝的袭击,同时距七宝20km以南的杜行刚出现着地龙卷。从回波的对位位置看,这两个龙卷应分别发生在图4b原点北侧

的60dBz强回波西端和原点南侧的60dBz强回波中。7时02分测得图4b原点南侧10km处强回波中心垂直剖面图,该回波最大高度达16km,55dBz以上的强回波集中在7km以下,60dBz在6km以下,顶部出现1.5km高度内达20dBz的衰减梯度;7时17分回波移出市区,到达东郊区县,60dBz以上的强回波面积明显缩小(见图4c);在7点49分的回波图上(见图4d),60dBz以上的强回波中心数减少,但位于南汇四团(第二象限)和浦东新区白龙港(第一象限)附近的60dBz强回波面积却有所扩大,出现能量转移的弥合现象。此时南汇和浦东新区正在遭受龙卷风的猛烈袭击。

从上述回波强度和时间演变看,水汽资源对龙卷的形成具有十分重要的作用,A龙卷在到达七宝镇时,由于水汽资源变得枯竭而减弱消失;D龙卷强回波在市区时已经形成,同样是水汽原因在到达浦东新区东部沿海时才突然加强变为着地龙卷,并且是这个龙卷簇中最为强盛的一个龙卷风。

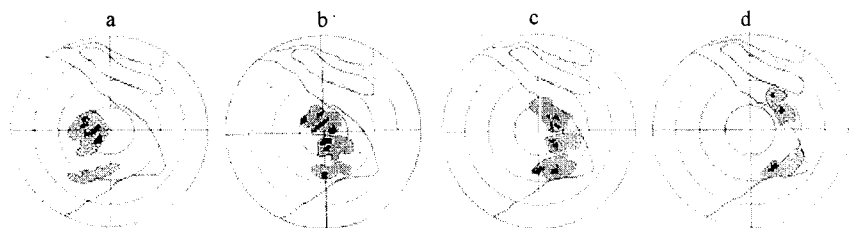


图4 PPI图 (a) 6时09分 (b) 6时59分 (c) 7时17分 (d) 7时49分

##### 4.2 龙卷风暴在低涡中的位置和移向移速

在6时09分的雷达回波图上(图4a),青浦、松江上空45dBz的回波上排列着4块较为整齐的60dBz以上的强回波(黑色),核心两块呈弧形状态。可以认为,中间应该有一个涡旋中心存在。为此特分析了6~8时的小尺度流场:6时在青浦和长宁区之间确实有一个辐合区存在;到7时,辐合区接近长宁区;8时随着辐合区进入市区自动气象站

的密集观测网,一个十分完整的涡旋辐合中心明显地出现在外滩黄浦公园附近(图略)。配置龙卷风动态可以发现,龙卷风暴分布于低涡中心的第一、第二象限,并随低涡向偏东方向运动,移动速度约 $35\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。

#### 5 物理量特征分析

##### 5.1 K指数

5日20时 $40^{\circ}\text{C}$ 高能中心位于浙江衢州地区,高能轴指向苏北沿海一带,上海K指

数为 34.0℃，能量不算太高，但高能中心和轴的分布走向与强对流区基本一致，具有很好的指示作用；6日08时，41℃的高能区分裂成南北两块，南块在浙江大陈，北块位于江苏射阳，上海 36.0℃。这应该认为，上海地区刚发生过强对流天气，有效能量已经被部分释放。但上海 K 指数比前 12 小时还是有所增加，说明龙卷风暴形成前上海地区的气团能量很高。

### 5.2 沙氏指数 SI

SI 比 K 指数分布更具有区域和时间上的指示意义。5日20时，-6.2℃的不稳定中心位于上海地区，达到了产生龙卷风时  $SI \leq -6.0^\circ\text{C}$  的标准。从时间上看，这时 9909 号热带涡旋中心还在浙江北部地区，高能区比强对流区提前 12 小时到达上海。

### 5.3 $\Delta\theta_{se(850-500)}$

由于  $\theta_{se}$  在各等压面具有保守性，因此取  $\Delta\theta_{se(850-500)}$  值分析龙卷风发生前后的稳定度情况。5日20时  $\Delta\theta_{se(850-500)}$  有 3 个负中心，分别位于浙江衢州、上海和江苏射阳；12 小时后， $\Delta\theta_{se(850-500)}$  发生了很大的变化，原位于浙江和江苏的负中心已向上海一带转移，浙江衢州和江苏射阳的负中心已变成正值稳定区，而上海却比前 12 小时又下降了 1.2℃，达 -8.4℃，气层极不稳定，环境气层极有利于强对流的产生。这与卫星云图上的云团演变情况完全一致。

## 6 风廓线仪资料特征

这次龙卷风首先在松江九亭乡出现，与青浦气象站的风廓线仪相距约 10km。距离虽然不算太远，但由于风廓线仪所测资料仅代表风廓线仪上空的大气情况，而龙卷风是小尺度系统，最大直径也不过 1km 左右，与 10km 之比显得较远，风廓线仪资料当然不能说明龙卷风的内部情况。但由于龙卷风产生于大尺度气团内，因此完全可以说明当时产生龙卷风的背景气团情况。

### 6.1 测风演变

在 5 时 05 分~7 时 40 分的风廓线仪测风资料中可以发现，此期间近地层出现了异

常的旋转变化的。由图 5 可以看到，5 时 05 分~5 时 40 分，3000m 以下主要是 S-SW 风，但 6 时 05 分测得自地面到 1200m 突然出现了风向逆转 360° 的异常情况。对应应在 6 时 09 分的雷达回波图上，此时青浦正有一块强对流回波在向东移动。

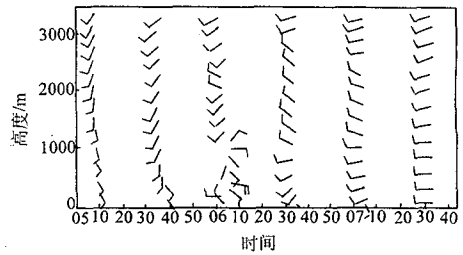


图 5 6 时 05 分~7 时 40 分测风

在常规的探空资料上得不到如此密集的测风资料，近地层风向的异常旋转自然无法知晓。因此，两者的配合使用，更有利于监测强对流天气的发生发展。

### 6.2 气团的温度演变

5 日白天，300m 以下的气团温度均在 31℃ 以上，600m 高度上的温度在 26℃ 上下，气团垂直温度分布正常。入夜以后，近地面气团温度慢慢下降到 26℃，而 600m 高度上的气温却出现上升趋势，特别是午夜 1 时 30 分，700m 气层温度达到 29℃，比白天还高。随后气温缓慢下降，气层几乎完全稳定下来。然而，风廓线仪却在 6 时 10 分测到了气团的异常逆温，200m 以下在 26℃，而其上 500~700m 高度上的气团温度达到 30℃，见图 6。可见低层气团已变得极不稳定。

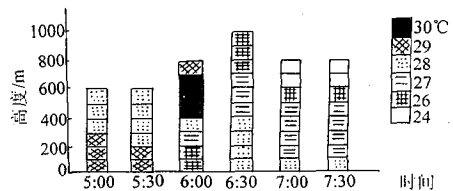


图 6 6 时 05 分~7 时 40 分气团温度

### 6.3 层结曲线的演变

风廓线仪所测得的层结曲线资料同样显示气层的不稳定情况(见图 7)，5 时、5 时 30

分和7时、7时30分4个时次800m以下的4根温度曲线均没有逆温出现,而在6时30分的温度曲线上却在600m以下出现了与其它温度曲线截然相反的走势,温度随高度的

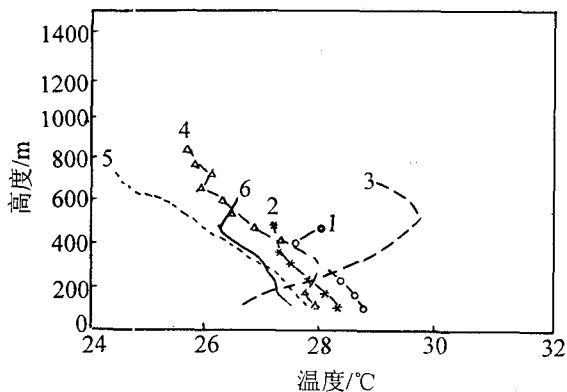


图7 6时05分~7时40分温度曲线  
上升而迅速升高的图形,平均增温率每100m

达到0.7℃。

## 7 小结

①热带风暴残留涡旋与西风槽的结合,由于能量的增加,有利于强对流辐合体的形成和发展,有利于龙卷风暴的形成。

②在对流天气条件下,风廓线仪层结曲线图上出现较强逆温时,尤其增温率在0.7℃以上时,要特别注意强对流或龙卷风暴的形成发展。

③ SI 达 -6.2℃;  $\Delta\theta_{se(850-500)}$  达 -8.4℃,这种情况容易发生龙卷风天气。

④水汽资源对龙卷的形成和维持具有十分重要的作用,强对流云团或龙卷风暴在到达缺少水汽资源的城区时会减弱或者消失,相反如遇江湖海面时会突然加强。

致谢:本文受到曹晓岗、姚祖庆指导,特表感谢。

# An Analysis of a Tornado in Shanghai

Chen Yonglin

(Shanghai Meteorological Center, 200030)

## Abstract

Based on the synoptic situation and the wind profiler data, the detailed physical analysis of a tornado, which occurred on 6 September 1999, was given. Accumulating with westerly trough, the momentum of Tropical-Storm-9909's remains increased suddenly and a mesoscale convective complex (MCC) formed. Four tornadoes developed in this MCC. It is found that there are apparently inversion structure and a 360-degree backing of wind direction in low level warm column at the mature stage of tornado. The air is very unstable with an index of SI below -6℃.

**Key Words:** tornado wind profiler inversion structure MCC