

文章编号: 1004- 4574(2009) 02- 0167- 06

# 一次超级单体风暴中龙卷的天气过程分析及龙卷强度判定

方丽娟<sup>1,2</sup>, 姬菊枝<sup>2</sup>, 陶国辉<sup>2</sup>, 周传瑞<sup>2</sup>, 王开宇<sup>2</sup>

(1. 南京大学 大气科学系, 江苏 南京 210001; 2 哈尔滨市气象局, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:**对 2008年 5月 23日发生在哈尔滨中南部的一次超级单体风暴中龙卷天气过程的天气形势、卫星云图、雷达回波进行了综合分析。研究表明:此次灾害性强风暴是一次龙卷过程;龙卷的出现与高空风场的分布及大气稳定度密不可分;龙卷母云的形状及性质与冰雹云相近,其发生发展与低空急流密切相关;龙卷出现在超级单体风暴的“V”型缺口附近,多普勒速度场上伴有强中气旋。文中还利用多普勒雷达产品中气旋的最大流入流出速度计算了中气旋强度,并结合现场勘查及灾情信息,对龙卷强度等级进行了判定。

**关键词:**超级单体风暴; 卫星云图; 雷达回波; 龙卷强度

中图分类号: P467

文献标识码: A

## Weather analysis and grade determination of a tornado occurring in a single super-storm

FANG Lijuan<sup>1,2</sup>, JI Jizhi<sup>2</sup>, TAO Guohui<sup>2</sup>, ZHOU Chuanrui<sup>2</sup>, WANG Kaiyu<sup>2</sup>

(1 Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210001, China; 2 Harbin Meteorology Bureau, Harbin 150080, China)

**Abstract** Based on the comprehensive analysis of the satellite images, radar echoes and the weather background, the features of the tornado in the single super-storm on May 23, 2008 in south-central Harbin are analyzed. The strong storm disaster is a process of Tornado closely related with the low-level jet. The tornado appeared in near the single super-storm "V" notch and strong cyclone is found on Doppler velocity field. By outflow velocity and inflow velocity, the grades of the mesocyclone are calculated. Combining with site investigation of the disaster, the grade of the tornado is determined as F2 to F3.

**Key words** single super-storm; satellite cloud chart; radar echo; tornado intensity

2008年 5月 23日 19时 20分左右,黑龙江省五常市兴盛乡出现了龙卷风,时间持续仅 1min左右,强风灾害造成 3个村 4个自然屯受灾,其中 540间房屋受损,有 57间房屋倒塌,死亡 1人,受伤 36人,当地电力和通讯设施严重受损。同时兴盛以东有 7个乡镇,1个农场,40个村,均遭受了不同程度的大风和局地水灾,灾害造成直接经济损失 3110万元。由于龙卷尺度小、持续时间短,常规观测资料很难监测到。但通过现场考察受灾情况,并借助新一代多普勒雷达的分析,可以推测这是一次由超级单体风暴引发的较强龙卷,符合 FPP 等级 2到等级 3的标准。

龙卷是一种极具破坏性的强对流天气,龙卷母云是灾害天气中最强烈的对流风暴<sup>[1]</sup>。国内研究认为,龙卷

收稿日期: 2008- 06- 16 修订日期: 2008- 12- 16

基金项目: 哈尔滨市科技攻关项目 (2008AA2CS135- 5)

作者简介: 方丽娟 (1972- ), 女, 高级工程师, 主要从事短期、短时天气预报及灾害天气研究。E-mail: fljjuan@ gmail.com

是一个平均直径为 100m 左右,其发生时通常有以下特征:一是龙卷是从积雨云内部扩展到地面的猛烈旋转的空气柱,因而十分高大并有明显的旋转性<sup>[2]</sup>;二是龙卷母云的雷达回波都很强,在 50dBZ 以上,显示出超级单体的一些特征,如钩状回波、BEWR 等,此外雷达径向速度场上常伴有中气旋(mesocyclone)<sup>[1,3]</sup>。多普勒雷达是目前对龙卷进行探测和预警的最有力工具。与传统天气雷达相比,多普勒雷达除可以测量降水的回波强度外,还可以测量降水粒子沿雷达径向的速度,从而可以识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散等特征。

本文通过对 2008 年 5 月 23 日五常发生龙卷前后的多普勒雷达图像、卫星云图及天气背景和一些表征能量和热量物理量的分析后,总结了一些短期短时预报龙卷的依据,以期对我省龙卷过程有更新的、更深入的认识。

# 1 天气过程

## 1.1 天气背景分析

23 日 08 时开始 850hPa 内蒙北部及黑龙江省的东北部受东北冷涡控制,五常处于槽前西南气流中,低空急流正处于此高度,位置在内蒙北部临近黑龙江省边界,中心风速达到 18m/s。急流轴附近大气中低层均为西南气流,温度场表现为暖脊,因而暖湿空气能不断向北输送。20 时低空急流加强,中心风速增加到 24m/s 位置向东移了 7 个经度,正处于哈尔滨的东部,龙卷的发生时五常就处于该急流的正下方急流出口附近(图 1)。低空急流出口处风向和风速的切变导到了对流层低层水汽和能量的堆积,而低空急流强盛的水平风则致使垂直上升气流发生方向的扭转,在对流层的中下部开始旋转,并最终形成中尺度气旋,发生龙卷。这与暴雨天气与低空急流的位置配置有所差别,是预报中应特别注意的一点。

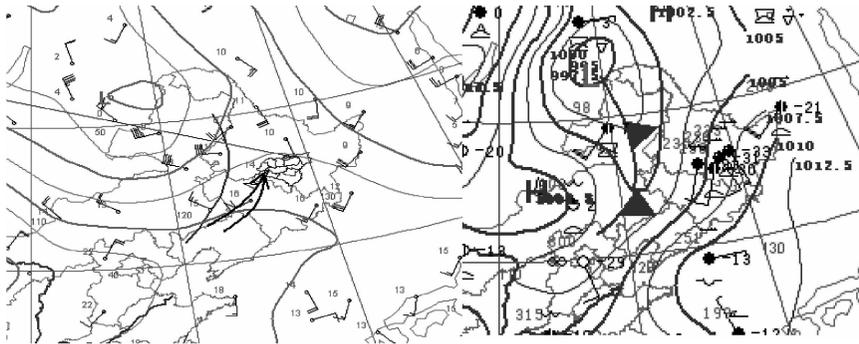


图 1 2008 年 5 月 23 日天气形势 ((a): 23 日 20 时 850hPa 高空观测, 黑色双线箭头为低空急流; (b): 23 日 14 时地面观测场)

Fig 1 Weather situation on May 23 2008

23 日 08 时地面低压中心在 51°N, 118°E, 与 850hPa 低涡位置基本一致,其后低压分裂为两个中心,其中南部一个中心 14 时移到齐齐哈尔北部,地面冷锋处于内蒙北部,20 时冷锋移到黑龙江省西部的齐齐哈尔和绥化附近,龙卷发生地处于地面冷锋前部。虽然这一时段没有强降雨,但黑龙江省西南部多站出现了积雨云。当天中午黑龙江省西南部最高气温均超过 22℃,而同纬度内蒙北部与蒙古国交界处最高气温为 9℃,也就是锋面附近的降温区与前部的高温区之间温度梯度为 0.3℃/10km,温度锋区并不很强,这与我国南方一些龙卷及暴雨的分析结果<sup>[4]</sup>有所差别。但积雨云的出现表明此处大气层结的不稳定。

## 1.2 大气动力和热力分析

龙卷作为强雷暴中最强的一种小尺度天气系统,其生成和发展与大气的稳定度及垂直风切变密不可分。因此,我们对龙卷发生前后大气层结和空间风场进行了分析,注意到此次龙卷的发生与对流层下层的不稳定层结及能量和水汽有关。

### 1.2.1 层结分析

图 2 是龙卷发生前后大气底层(850hPa)及上层(200hPa)温度的变化曲线。可见对流层高层(200hPa)在强对流天气发生前,气温剧烈下降,24h 气温下降幅度达 11℃。而对流层下层的气温则完全呈现相反趋势,23 日 20 时 850hPa 的温度比 12h 前上升了 6℃,由此深厚对流层中温度直减率的迅速增大。大气的水汽通常用比湿来反映,23 日 20 时 850hPa 以下水汽较丰富,平均达 12g/kg 而 850hPa 以上水汽迅速减少,到

500hPa比湿只有 2.3g/kg 这种对流层下层暖湿空气与上层干冷空气的叠置及温度直减率的迅速增大, 导致深厚气层的层结不稳定性增强, 为强对流天气的出现提供了可能。

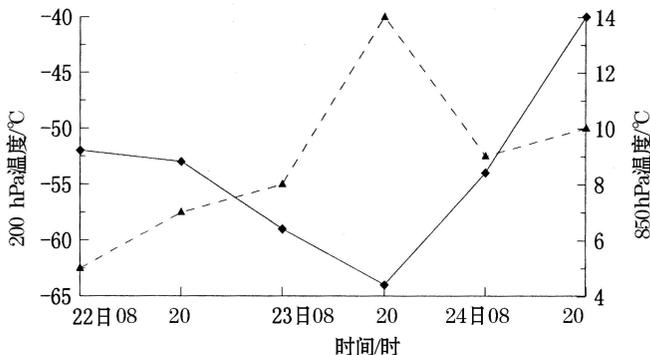


图 2 哈尔滨站对流层底层及上层温度的变化曲线 (实线是 200hPa 温度变化曲线, 虚线为 850hPa 温度变化曲线)

Fig 2 Variation of air temperature at bottom and upper parts of convective layer over Harbin station

国外分析认为<sup>[5]</sup>: 龙卷一般发生于近地面层 (厚度不小于 1km) 内水汽丰富, 中层有干冷空气存在, 通过蒸发冷却提供潜在的强烈下曳气流的环境中。对于此次龙卷天气过程的研究也得到了相同的结论。23日 08 时, 哈尔滨近地面 925hPa 能级  $\theta_{se}$  为 41°C, 向上能级逐渐减少, 低能中心在 700hPa 为 37°C, 其与地面差值较小, 为 -4°C, 已表现出有不稳定层结存在。700hPa 之上能级逐渐增加。而平时我们最常关注的对流层中下层的能级差  $\theta_{se500} - \theta_{se850}$  为 2°C, 则表现为稳定层结。到了 23 日 20 时低能中心仍在 700hPa 但不稳定强度明显加大,  $\theta_{se500} - \theta_{se850}$  也达到了 -11.5°C, 但  $\theta_{se700} - \theta_{se850}$  达到了 -13.4°C, 此时  $\theta_{se500} - \theta_{se700}$  为 1.9°C, 可见对流层下层表现为较明显的不稳定状态, 而 700hPa 到 500hPa 之间存在干层。分析表明: 此次龙卷的不稳定能量主要集中于大气中下层, 尤其是 700hPa 以下对流层下层。

由于龙卷发生在 19 20 前后, 分析 23 日 20 时其下游距离最近的探空站 T-lnP 图, 应该可以对龙卷发生时的环境层结状况, 但由于五常下游最近的探空站距离龙卷发生地约 500km, 因此我们根据低空急流的移动路径及发展情况, 选取距离相对较近的长春站 20 时探空曲线进行分析 (图 3), 此时对流有效位能为 570.5J/kg K 指数为 30°C, 沙氏指数为 -4.9°C, 表现为不稳定层结。

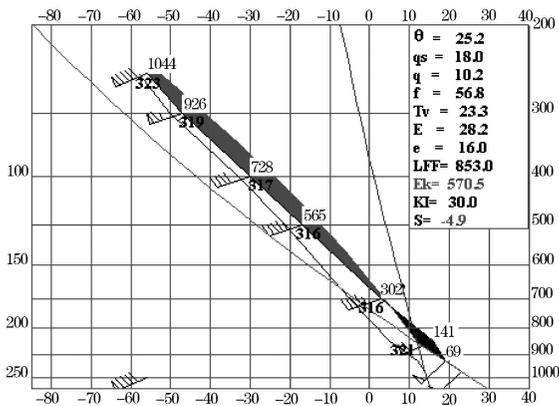


图 3 长春 23 日 20 时探空曲线

Fig 3 Sounding curve in Changchun City at 2008-05-23T20:00

### 1.2.2 空间风场分析

23 日 20 时 700hPa 以下为西南风, 最大风速中心位于 850hPa 附近, 低空急流与两侧及上下层均存在明显的风速切变。而风向上 700hPa 以上开始转为偏西风, 到 500hPa 后向上又转为西南风, 风速逐渐加大。对流层下层风速随高度顺转, 中层以上风速随高度逆转。这一点在 WSR-88D 雷达回波图上也可以得到证实。下层的暖平流结构具有明显的正值水平螺旋度。而 850hPa 处的低空急流与正水平螺旋度相结合, 当其转化为垂直螺旋度后, 构成了龙卷产生的重要动力条件<sup>[6]</sup>。

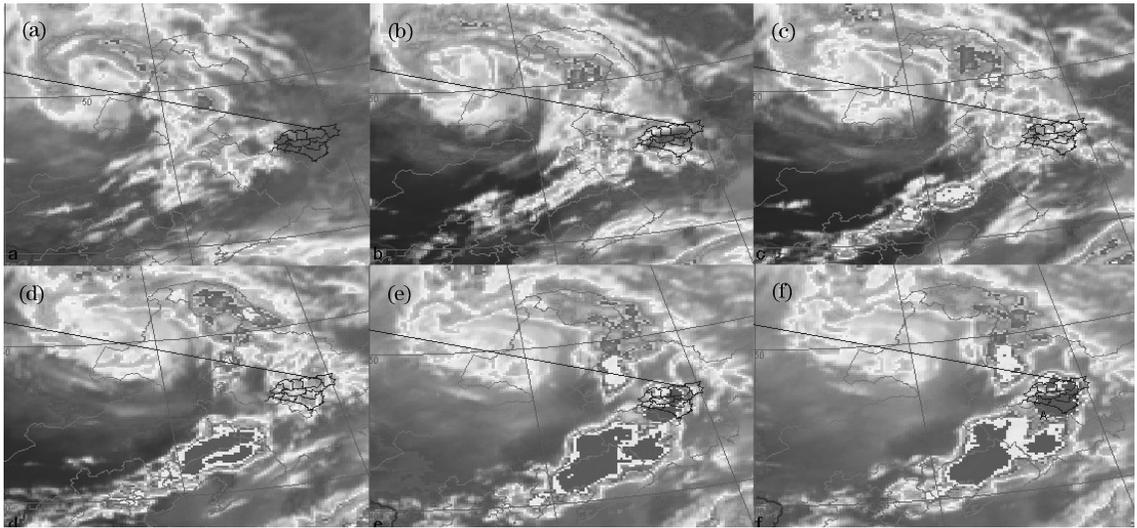


图4 龙卷发生当日卫星云团变化 ((a) & 30 (b) 12 00 (c) 14 30 (d) 16 30 (e) 18 30 (f) 19 00)

Fig 4 Variation of satellite mass on the day occurring tornado

## 2 卫星云图分析

根据云图分析, 8:30螺旋云系中心位于高空700hPa中心附近(图4(a)), 东北东南部到内蒙中部为一冷锋云带, 宽约5个经度, 内蒙中部云体散乱, 为较弱的积云(最大TBB仅为 $-46^{\circ}\text{C}$ ), 移向东东南。12时(图4(b))冷锋云带移到高原的东南侧, 云带宽度明显收缩至2个经度。云体加强, 结构变得紧实, 其北部有一最大TBB达到 $-65^{\circ}\text{C}$ 的对流云团, 但地面无对流天气。

14时地面冷锋越过蒙古高原到达我国东北地区东南部, 因为此时山后为强暖空气控制(赤峰14时气温 $32.4^{\circ}\text{C}$ ), 下暖上冷的平流叠置使不稳定大为增强, 此时云带下高原, 14:30云图上(图4(c))冷锋云带上也表现为对流云的突然出现了5个强度不同的对流云团, 其中赤峰附近的云团范围最大, 为椭圆型, 但最大TBB值此时为 $-68^{\circ}\text{C}$ , 地面并无对流天气出现。此后, 冷锋云带继续沿850hPa引导气流向东东南方向移动, 移向同850hPa急流基本一致。16时30分(图4(d)), 北部两个对流云团已合并成一体, 但仍能分辨出两个强中心。

18时30分(图4(e)), 在850hPa低空急流的出口处, 西南风和东南风相切的地方, 紧临的两个测站风向逆转了 $50^{\circ}$ , 风速由 $24\text{m/s}$ 骤减为 $12\text{m/s}$ 。此时, 当冷锋云带的北部移到此处后, 一个形状接近椭圆型的积雨云云团迅速新生, 其范围和强度半小时内均呈现剧烈增长。19时(图4(f))该对流云团TBB值达到 $-73^{\circ}\text{C}$ , 强中心的范围已达3个经距 $\times$ 2个纬距, 呈现我省冰雹天气云团典型特征<sup>[7]</sup>, 龙卷发生地就处于该云团的后部, 靠近TBB值最大处。20时, 龙卷母云范围增加到最大, 哈尔滨市东部和北部出现了局地暴雨及雷电天气, 但没有雹灾记录, 这可能同各县(市)了人工防雹作业有关。

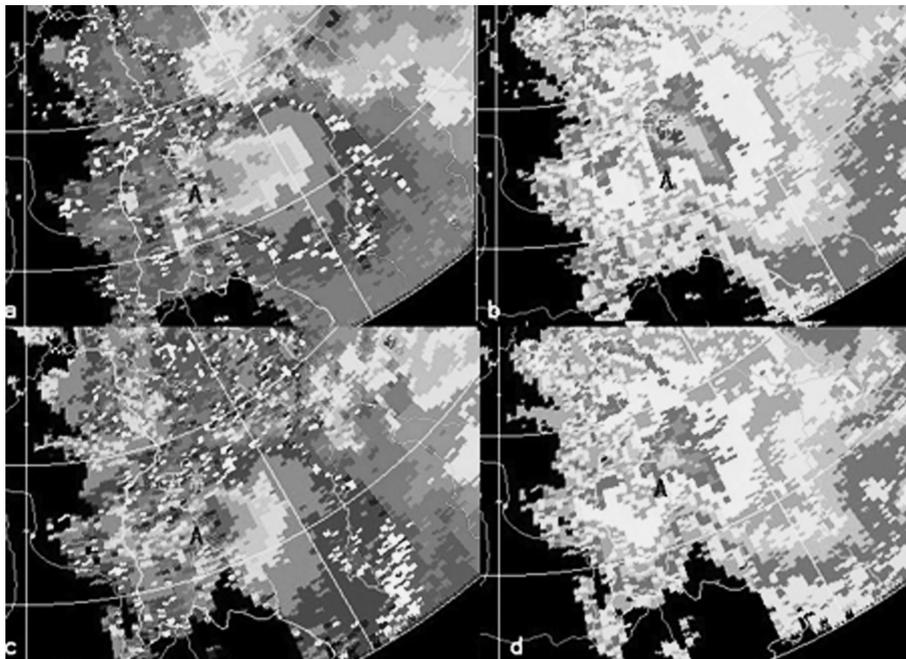
从云带的新生和发展情况看, 蒙古高原和下游的平原间地势的差异对对流不稳定性增强起到了关键性作用, 卫星云图上可以清晰地看到对流云团的迅速增长。但冷锋云带所经之处仅有个别的阵雨记录。分析认为, 低空急流虽然带来了南方的暖湿空气, 但由于水平风速较大, 水汽的垂直输送并不明显, 而低空急流出口处风向和风速的明显差异使得水汽和低层热量在哈市附近堆积, 并最终导致超级单体风暴的形成。实际上, 当日哈尔滨所属12区、县(市)均出现了强对流天气。

## 3 龙卷性质及强度判定

### 3.1 多普勒雷达产品判断

从16时开始对多普勒雷达进行连续分析表明, 龙卷发生前有一条西北—东南向的飢线过境, 所经之处出现了短时强降雨或大风天气。但此次龙卷母云是飢线后从东南方向移来的超级单体风暴。19时25分的

多普勒强度图发现,回波呈现超级单体风暴特征,2.4°仰角上五常本站回波强度为62.5dBZ,这在我省是极为少见。龙卷的发生地在最强回波的西南方向,回波也达到了52dBZ(图5)。



这次过程虽然没有识别出龙卷涡旋(TVS),但在WRS-88D多普勒雷达软件系统提供的众多产品中,中气旋产品反映的是与对流风暴中强上升气流密切相关的小尺度涡旋,美国国家强风暴实验室将这一概念用于预报龙卷等灾害性天气<sup>[8]</sup>。我国在对中气旋产品的应用中发现其常和局地强风相关联<sup>[9]</sup>。分析19时20分的1.5°仰角的风暴相对速度图,“V”型缺口附近有一清晰的中γ尺度的正负速度中心,表示此时回波的切变强度、上升气流强度和发展持续时间都已达到了产生局地强风的可能。根据中气旋算法,对19时20的风暴相对速度进行计算,可得

$$V_r = (V_{in} + V_{out}) / 2 = (-23.4 + 20.8) / 2 = 22.1 \text{ m/s}$$

此时中气旋距测站110km,参考中气旋识别的旋转速度和距离判据<sup>[10]</sup>可知这一个强中气旋。根据美国国家强风暴实验室的统计,满足中气旋标准的涡旋中,有20%的可能会引起龙卷<sup>[11]</sup>,而若出现强中气旋,这一比例则上升到40%,龙卷警报往往是基于观测到强中气旋而发出<sup>[12]</sup>。因此,根据雷达资料分析,虽然此次过程没有识别出龙卷涡旋特征产品,但仍可判断为一次中等强度以上的龙卷灾害天气。

### 3.2 灾情及实况判断

通过对现场的勘察了解,这次风灾,从五常市中部掠过,沿途经过兴盛、五常、杜家、民意、龙凤山、小山子等6个乡镇,自西向东强度逐渐减弱。3个村4个自然屯受灾,其中540间房屋受损,有57间房屋倒塌,死亡1人,受伤36人,当地电力和通讯设施严重受损,兴盛乡五道岗村的杨家炉屯和兴盛村的双井子屯受灾最重。

表1 藤田-皮尔森龙卷风强度分级标准(截至F3级)

Table 1 Fujita-Pearson scale

龙卷等级	灾害程度	相当风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	地物征象
F0	轻微	18~32	烟囱、树枝折断,根系浅树木倾斜,路标损坏等
F1	中等	33~49	房顶被掀走,活动房被掀翻,行驶中的汽车刮出路面等
F2	较大	50~69	刮飞屋顶,活动房被破坏,大树拦腰折断或整棵吹倒
F3	严重	70~92	结实的房顶墙壁刮跑,森林中大半的树木连根拔起。

五常站位于重灾现场的东北方向,距离10km左右,监测到的最大风速为14.6m/s,龙凤山位于重灾现场的东东南向,距离50km左右,监测到的最大风速为15.3m/s,两站均达到了7级风力。

重灾现场看,地面影响直径30~50m宽。两屯受损房屋均临一东西向街道,其中大多数为屋顶被卷走,也有57间房屋倒塌。近百棵树木被拦腰折断或连根拔起,最大直径在20cm以上,且倒伏方向不一致。参照美国的藤田-皮尔森强度分类标准(表1),这次风灾的地面灾害特征符合灾害较大到严重的2到3级标准。

## 4 讨论

(1) 对流层下层的暖湿空气为龙卷的发生提供了热量和动力条件。对于大气层结稳定性的判断应分层分析, 而不能仅仅依靠一般强对流天气或暴雨天气中常用  $\theta_{se500} - \theta_{se850}$  值, 对  $\theta_{se}$  垂直分布做细致地分析会发现: 对流层中低层出现高能区应关注局地龙卷是否会出现。

(2) 低空急流出口处风向风速的切变造成能量和水汽的堆积, 从而产生了强烈的上升运动。低空急流中强盛的水平风使得了上升气流出现方向的扭转, 在对流层的中下部开始旋转, 并最终导致了龙卷。

(3) 从云带的新生和发展情况看, 蒙古高原和下游的平原间地势的差异对对流不稳定性增强起到了关键性作用。而低空急流出口处风向和风速的差异则是龙卷母云发生发展至关重要的因素。

(4) 新一代多普勒雷达上, 若飚线后出现超级单体风暴, 若对应的速度场上有强中气旋, 可以判断将有局地龙卷或风灾的出现。利用蓝金模式对 WRS-88D 雷达速度图上中气旋强度进行判定, 并结合国内、外的研究成果, 可以判断这次五常兴盛乡出现风灾是一次强度为 F2 到 F3 级的龙卷, 这同受灾现场的调查情况相符。同时也表明, 强中气旋对风灾有指示意义, 短时预报中应关注。至于两者在我省的相关性还待以后做进一步工作。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 397
- [ 2 ] 孔燕燕, 沈建国. 强雷暴预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 142
- [ 3 ] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒雷达分析 [J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-923.
- [ 4 ] 邵玲玲, 黄宁立, 邬锐, 等. 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, 2006, 26(6): 627-632.
- [ 5 ] MacGowan D. R., Nielsen K. E. Cloud-to-ground lightning in a tomadic storm on 8 May 1986 [J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(7): 1, 557-1, 574
- [ 6 ] Johns R H., Doswell C A. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 1992, 7, 604-605.
- [ 7 ] 张晰莹, 方丽娟, 景学义, 等. 黑龙江省产生冰雹的卫星云图特征 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 27(1): 106-112
- [ 8 ] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [ 9 ] 邵玲玲. 中气旋在强风预报中的应用 [J]. 气象, 2005, 31(9): 34-38.
- [ 10 ] 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
- [ 11 ] Doswell C A. An overview. Severe convective storms [J]. Meteor Monogr, 2001, 50: 1-26
- [ 12 ] Brown L R, Lamson D W, Burgess. Tornado detection by pulsed Doppler radar [J]. Mon Wea Rev, 1978, 106: 29-38