

# 多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用

邵玲玲<sup>1</sup> 孙婷<sup>2</sup> 邬锐<sup>1</sup> 黄炎<sup>1</sup>

(1. 上海中心气象台, 200030; 2. 南京大学大气科学系)

## 提 要

在深入了解 WSR-88D 多普勒天气雷达产品——中气旋算法的基础上, 对上海地区近 6 年间中气旋产品的几个重要特征参数进行了统计研究, 并结合局地强风的个例分析, 总结了上海及周边地区中气旋发生发展过程中各阶段的基本特征。最后综合参考雷达其他相关产品, 提出利用中气旋产品进行强风预报的思路, 以期为准确预报局地强风天气提供一些参考信息。

**关键词:** 多普勒雷达 中气旋 算法 强风预报

## 引 言

中气旋是 WSR-88D 雷达的一种速度导出产品, 它表示了对流风暴中与强烈上升气流相联系的小尺度涡旋。美国国家强风暴实验室最初引入这一概念主要是为了用于预报龙卷等灾害性天气。据统计 30%~50% 的中气旋能产生龙卷, 约 90% 的中气旋和局地强风或冰雹相联系<sup>[1]</sup>。在我国, 龙卷天气相对比较少见。以上海地区为例, 1998 年到 2003 年 6 年间可以查到的气象记录中, 仅发生龙卷 5 次, 而在其他出现破坏性大风的天气中却至少有一半以上伴随着中气旋的出现, 这里还不包括阈值设置, 距离折叠所引起的中气旋未被辨认的情况。因此, 本文希望通过研究中气旋的算法及其发生发展过程来了解其与龙卷、雷雨大风等灾害性天气的关系, 并从中获得一些利用中气旋产品预报局地强风(大于  $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的参考信息。

## 1 中气旋定义及其算法

### 1.1 中气旋的定义

中气旋可以被模拟为一个兰金组合涡旋, 即在中气旋核以内, 切向速度正比于涡旋半径; 而在中气旋核以外, 切向速度则反比于涡旋半径, 随着半径的增加而减少<sup>[1]</sup>。根据美国俄克拉荷马州中气旋探测资料的统计结果, 凡满足下列判据的小尺度涡旋即为中气旋:

(1) 核区直径(最大流入速度  $V_{in}$  与最大流出速度  $V_{out}$  间的距离)  $\leq 9\text{km}$ , 旋转速度  $V_r = (|V_{out}| + |V_{in}|)/2 \geq$  所定的阈值, 可以根据其转动速度和相对雷达的距离强中气旋、中等强度中气旋、弱中气旋和弱切变<sup>[2]</sup>。

(2) 垂直伸展厚度  $\geq 3\text{km}$ 。

(3) 上述两类指标都满足的持续时间至少为两个体扫描。

综上所述, 具有强切变、垂直延伸达到一定的高度、持续一定的时间是识别中气旋的三个必要判据。

### 1.2 中气旋算法简介

首先搜索平均径向速度数据, 寻找多普

勒速度值有持续增长的方位角相邻的距离库,组合为模式矢量;测量出从最大负值到最大正值的速度变化和这些值之间的距离,根据这两个量计算角动量(距离 $\times$  $\Delta$ 速度)和切向切变( $\Delta$ 速度/距离),并将它们与角动量阈值( $TLM$ ,  $THM$ )和切变阈值( $THS$ ,  $TLS$ )进行比较,对超过阈值的模式矢量作下一步处理;将相同仰角上的模式矢量按照其空间邻近情况(小于径向距离阈值  $TRD$  和方位阈值  $TMA$ )加以组合,并与确定一个二维特征所需要的最小模式矢量的个数阈值( $TPV$ )加以比较,检验是否为同一个二维特征;若二维特征的中心与雷达的距离小于距离阈值( $TRA$ ),并且其径向长度与切向长度的比值在最小比例阈值( $TRM$ )和最大比例阈值( $TRM$ )之间,那么该二维特征被认为是对称的。另一种情况,若该二维特征中心与雷达的距离大于距离阈值,并且其径向长度与方位长度的比值在长距离风暴最小比例阈值( $TRF$ )和长距离风暴最大比例阈值( $TFR$ )之间的,那么该二维特征也被认为是对称的,否则归为非对称的;对高度低于特征高度阈值( $TFM$ )的二维特征进行垂直相关处理。将第一个仰角上的二维特征与第二个仰角上的进行比较,如果较小的二维特征的中心点垂直地位于较大的二维特征区内,那么认为特征是垂直相关的,从而判断它们构成了一个三维环流。

### 1.3 中气旋的三种分类

根据中气旋不同阶段的特征可分为三种类型,即非相关切变、三维切变和中气旋。如果一个二维特征是对称的但不能与另一个垂直相关,那么该特征被认为是非相关切变;若二个或以上二维特征垂直相关,但少于二个二维特征是对称的,则三维特征被称作三维切变;如果二个以上垂直相关的特征是对称的,那么此三维特征被称作中气旋。

## 2 中气旋特征参数的统计分析

识别中气旋三种分类最重要的特征值是旋转速度、特征中心最低高度、特征厚度、切变强度、最大切变及其位置等<sup>[3]</sup>。本文对上海多普勒雷达从1998年7月至2003年9月间探测到的93个中气旋产品的特征参数进行了统计分析,希望从中获取一些与预报强风有关的信息,其中非相关切变45个,三维切变和中气旋共48个。

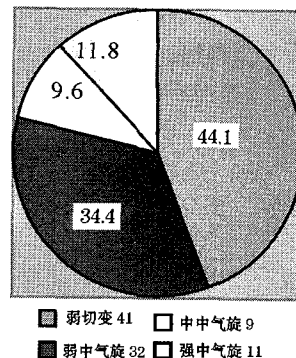


图1 上海地区中气旋产品强度分类情况

### 2.1 旋转速度( $V_r$ )

采用四分屏显示  $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$  仰角上的风暴相对平均径向速度图 SRM 或风暴相对平均径向速度区 SRR 产品,逐时逐个寻找与旋转标识相联系的最大流入流出速度,并计算该中气旋的旋转速度  $V_r$ 。一般选择气旋性切变或者辐合最强的那次体扫资料以及对应仰角上的计算结果,同时结合中气旋文本产品中的径向方位值,参考美国的中气旋强度分类进行统计<sup>[2]</sup>,以获得上海地区中气旋强度的分布情况。从图1中我们不难发现,上海地区多以弱切变和弱中气旋为主,占总数的78.5%,而中等中气旋和强中气旋则分别只占总数的9.6%和11.8%。由于龙卷是比普通中气旋强度更强、水平尺度更小的涡旋,在统计过程中也发现,强中气旋多数集中出现在龙卷天气系统中。所以,该统计结果从中气旋的旋转速度大小这个角度说明了,在上海地区出现龙卷天气的概率较小。由此可以考虑,若识别出中气旋产品,为了避

免空报,更适合发布灾害性强风警报。但是需要注意的是,当识别出强中气旋时,即使没有龙卷涡旋特征 TVS(WSR-88D 的另一产品)的出现,及时发布龙卷警报都将具有比较好的预报准确性和时效性。

## 2.2 特征中心最低高度(base),垂直厚度(depth)和切变强度(shear)

利用雷达中气旋及其文本产品,统计研究了上述 93 个中气旋产品的 3 个重要特征的分布情况以及相关预报信息(见表 1)。

表 1 1998~2003 年上海地区中气旋特征参数的分布情况

底部高度 /km	百分 率/%	伸展高度 /km	百分 率/%	切变强度 / $10^{-3}s^{-1}$	百分 率/%
0.0~1.5	24.8	0.0~1.5	19.6	2~5	6
1.5~3.0	38.7	1.5~3.0	25.5	5~10	42
3.0~6.0	33.3	3.0~6.0	54.9	10~20	32
≥6.0	3.2	≥6.0	0.0	20~40	8
				≥40	12

(1)对预报强风最具重要提示作用的是特征中心底部高度较低的那些产品,有 81% 的记录与那些底部高度低于 3km 的产品有较好的对应。当然,这并不能说明未下沉到 3km 以下高度的中气旋就可以在预报中被忽视。因为,在分析研究中气旋产品的发展演变过程时,我们发现,当环境条件有利时,中高层的中气旋具有向下发展到 3km 高度以下的潜力。

(2)当涡旋伸展高度达 3~6km 时较易产生强天气。另外,由于中气旋算法仅在一次体扫中探测两个垂直相邻仰角后就确定三维特征,未能体现出中气旋概念中的时间和高度连续性,会造成龙卷的空报,但对我们研究强风预报的工作影响不大,因为利用中气旋产品预报强风对垂直深度的要求相对较低。

(3)在切变强度 Shear 的统计中,我们发现随着雷暴的发展其切变强度加强,而产生强天气实况后随之减弱的个例达 90% 左右。对应产生龙卷的雷暴来说,其切变强度比一

般仅产生强风的中气旋要高 3~10 倍。如 2001 年 6 月 8 日孙桥的龙卷天气,最大切变达到  $86 \times 10^3 s^{-1}$ 。

(4)本文统计了 41 个三维特征样本中可望反映中气旋发展强度的底部高度、深度、切变强度,并将这三个重要特征出现时间的关系进行分析研究。发现可以期望通过应用雷达中气旋文本产品监测中气旋产品的重要特征。如果发现其切变不断加强,具有明显的旋转向下发展的趋势,并且垂直深度增加,则表明这是一个比较强的中气旋,存在继续发展的可能性<sup>[4]</sup>。在预报中结合基本反射率( $R$ ),风暴相对速度图( $SRM$ ),风暴轨迹( $STI$ )以及文本产品( $M$ )判断其所处的生命史的阶段,并预报其可能造成破坏性天气的强度和影响区域。

## 2.3 其他说明

此外,占总数 26% 的中尺度强风实况并没有伴随中气旋产品的出现,分析原因发现基本可以归为以下三类:

(1)由于大尺度的锋面移动或非气旋性弯曲和切变造成强风而不存在中小尺度的涡旋。如 1998 年 8 月 20 日龙华的  $22m \cdot s^{-1}$  强风的记录, $SRM$  上整个雷达视野内的风向全部为东南东,又如 2001 年 8 月 9 日南汇的  $17m \cdot s^{-1}$  的记录, $SRM$  上可见观测范围内全部是一致的东北风。

(2)由于阈值设置不够合理因而未能识别出具有危险性的涡旋:如 1998 年 7 月 30 日金山的  $20m \cdot s^{-1}$ ,2000 年 6 月 27 日奉贤的  $19m \cdot s^{-1}$  和 7 月 25 日浦东的  $21m \cdot s^{-1}$  以及 8 月 19 日崇明的  $21m \cdot s^{-1}$ ,2003 年 7 月 1 日崇明的  $18m \cdot s^{-1}$  记录都是属于这种类型。这几次共同特征是在基本反射率产品中各仰角上都不存在大片的强回波区,在弱回波区中只有若干分散的尺度较小的单体。

(3)由于速度模糊造成视野内大片区域风速资料无法获得。如 2002 年 6 月 10 日金

山  $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的记录便是这种类型。在这种情况下,可以通过调整脉冲重复频率来减小速度模糊的现象。

### 3 中气旋个例的特征值分析

2002年8月24日傍晚到夜间,一条强雷暴带自西向东横扫了长江三角洲地区。19:50到20:40之间,上海部分地区先后出现了  $19\sim 29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的大风。通过综合分析多普勒雷达产品,发现一个代号为 R9 的中气旋持续时间较长,其发生发展过程对这次具有强大破坏力的飊线天气过程产生了重要影响。本文将尝试从特征值变化的角度分析中气旋的发展演变情况。

19时37分,雷达首次在雷暴带的东部探测到一个代号为 R9 的非相关切变。研究这个切变的垂直结构,发现在该位置的上空是一个中层悬垂(底层的回波强度明显小于上方),  $0.5^\circ$  的 SRM 上存在辐合,  $1.5^\circ$  和  $2.4^\circ$  则是比较均匀一致的  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  流出,表明这个切变值为  $6\times 10^3\text{s}^{-1}$  的非相关切变,目前处于中气旋生命史的初生阶段(见图2)。19时55分, R9 附近的飊线辐合趋于加强,并逐渐被上升气流抬升加强为一个三维切变,位于  $2.7\sim 3.8\text{km}$  之间,切变强度为  $8\times 10^3\text{s}^{-1}$ , 在中气旋 M 图上可见黄色圆圈标志(图略)。此时不同仰角的 SRM 显示,该三维切变的低层紧靠其前方是气流辐合区,中层为气旋性切变,最高层则是比较明显的反气旋性切变, R9 已经进入了成熟阶段的初期,具备了产生强风的可能。事实上,11分钟后,它陆续扫过的青浦和闵行地区都出现了雷雨大风。20时12分, R9 周围的低层强回波区面积增大、强度增强,中层悬垂消失,意味着单体后侧下沉气流发生,由此引起的斜压涡旋发展将导致 R9 更为成熟,破坏性进一步加大。分析此时的中气旋文本产品证实了这一点:它的深度达到了  $3.6\text{km}$ ,切变强度  $12\times 10^3\text{s}^{-1}$ ,到20时18分,深度已经达到

$5.2\text{km}$ ,旋转速度也达到了它生命过程中的最大值  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , R9 正处于发展最为旺盛的阶段。它经过的闵行地区出现了  $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的大风。然而,这以后它的径向直径却突然有了较大的增加,从前一次体扫的  $5.4\text{km}$  变成了  $16.5\text{km}$ ,切变强度也因而减小到了  $9\times 10^3\text{s}^{-1}$ ,这种现象似乎与中气旋发生发展的概念模式有出入。研究认为,直径的突然变大可能是中气旋将要进入消亡阶段的前兆,因为20时24分, R9 所在的区域周围各层的反射率较前一次体扫都明显减弱, SRM 产品中仅仅只在  $1.5^\circ$  和  $2.4^\circ$  仰角之间的薄层内可见一个弱的气旋性切变,而其上层  $6.0^\circ$  仰角上则是辐散区。这些现象都说明 R9 已经进入了生命史中的第三个阶段即消亡阶段,如果没有更适合其发展的环境条件出现,它的强度将会逐渐减弱直至消散。事实确实如此,在下一次体扫的中气旋文本产品中我们已经找不到这个代号为 R9 的涡旋了。

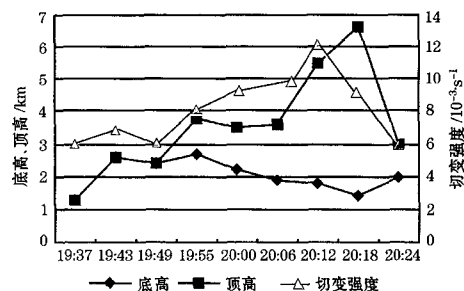


图2 R9生命史中三个物理量随时间的变化

### 4 预报参考信息

通过对中气旋概念模式和算法的研究并结合上面的特征值统计和个例分析,可以验证,中气旋产品与某种形式的强天气(大冰雹、灾害性风或龙卷)有关,显示了那些与雷暴有关的风暴级涡旋的存在及特征。上海地区以出现弱切变和弱中气旋为主,可能引发龙卷的强中气旋出现的几率比较小。中气旋与雷雨大风等灾害性天气的出现具有密切关系,因此可望利用它进行中尺度破坏性强风

的预报。可以根据其强度和分类,综合利用各种雷达产品,确定预报的天气类型以及影响区域、时间等。

灾害性强风的预报着眼点:

(1)当雷达识别出中气旋、三维切变时即可考虑预报局地大风,还要注意风场资料中有明显风速增大的现象和区域。

(2)在利用中气旋预报中尺度强风的工作中,综合使用 *R*、*SRM*、*STI*、*CM*、*VWP* 等产品对提高预报的准确性和时效有很大的帮助,最好将这些产品作为中尺度气旋的警报配套产品。特别要注意反射率因子 *R* 产品中是否有强回波中心或强回波带(区)的形成,密切关注那些强度高、高度梯度大、移速快的回波系统。

(3)通过 *M* 文本产品可以直接获得中气旋(或非相关切变,三维切变)的相关信息,提前了解中气旋的生成和特征值的变化。

(4)测时要注意:一个中层的中气旋,如果向着地面发展,且旋转速度和切变持续加强,伸展高度增加,有进一步发展成龙卷风的可能。

(5)中气旋算法有助于我们识别龙卷风和强风,但由于雷达扫描在时间和空间上存

在不连续性,该算法还有一些缺陷,应该同时检查 *R* 和 *SRM* 产品以确定中气旋的存在。

(6)处于初生阶段和成熟阶段的中气旋,我们应该结合 *M* 文本产品和风暴轨迹 *STI* 产品判断其当前位置和移向移速,及时做出预报,对于已处于消亡阶段的中气旋,除非出现某些可以使其再生的环境条件,一般情况下可不再作为预报关注的重点。

(7) *SRM* 产品中看是否存在明显的气流的辐合或切变。如果没有,则说明降水乃是由于较大尺度的天气系统引起,一般情况下不会出现中气旋。

#### 参考文献

- 1 OTB, OSF. WSR-88D Operations Coures, 1997. 5; TOPIC 8, 122—130.
- 2 Grant, B. N, and R. Prentice, Mesocyclone Characteristics of Mini Supercell Thunderstorms. 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, 1996:362—365.
- 3 Gregory A. Tipton, Eric D. Howieson, John M. Margraf and Robert R. Lee. Optimizing the WSR-88D MESO/TVS Algorithm Using WATADS-A Case Study, Weather and Forecasting, 1997.
- 4 Larry Ruthi. Mesocyclone Detection by the WSR-88D: Some Observations Based on the 24 April 1993 Tulsa Tornado Case. OSF/JSPO: The First WSR-88D Users' Conference, 1994, 10:351—361.

## Application of WSR-88D Radar Mesocyclone Products to Prediction of Mesoscale Severe Wind

Shao Lingling<sup>1</sup> Sun Ting<sup>2</sup> Wu Rui<sup>1</sup> Huang Yan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Central Meteorological Observatory, 200030; 2. Department of Atmospheric Science, Nanjing University)

#### Abstract

Statistics about important feature parameters of the WSR-88D mesocyclone products is analyzed on the base of knowing the mesocyclone algorithm using the data of the last six years in Shanghai area. The basic features on mesoscale lifetime associated severe wind case are investigated. Then with the combination of severe wind records, the thresholds of adaptable parameters used mesocyclone algorithm in Shanghai are discussed and some adjustment schemes are suggested. Finally, a technical idea of forecasting local severe wind based on the mesocyclone products and other radar products are developed.

**Key Words:** radar mesocyclone algorithm prediction