

多普勒雷达中气旋判据及算法的发展与应用

费海燕 周小刚 王秀明

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 由于超过90%的中气旋伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生, 因此中气旋的识别与应用对于准确、实时发布强天气预报具有十分重要的意义。目前我国仅CINRAD WSR-98D SA/SB多普勒雷达内置了美国强风暴实验室开发的中气旋算法, 并有相应的中气旋产品, 其他型号的多普勒雷达则只能从径向速度图上人工识别中气旋。回顾了中气旋判据演变的三个阶段, 对当前业务上使用的第三阶段的中气旋判据存在的问题进行了分析; 依据中气旋算法发展历程, 介绍了中气旋切变算法、中气旋算法及中气旋探测算法, 并对当前业务上使用的中气旋算法得到的产品应用及其存在问题作了讨论。

关键词: 中气旋判据, 中气旋切变算法, 中气旋算法, 中气旋探测算法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.003

The Development and Application of Doppler Radar Mesocyclone Criterion and Algorithm

Fei Haiyan, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: Since more than 90 % of the mesocyclones are accompanied by severe weather such as tornadoes, severe hails, strong winds etc., it is a great significance to identify the mesocyclones and apply to publishing the severe weather warning in real-time for more accurate. At present, only the CINRAD WSR-98D SA / SB in China has mesocyclone algorithm, which was developed by US National Severe Storms Laboratory, and mesocyclone products. While other types of Doppler radar have to recognize mesocyclone by using radial velocity maps artificially only. This paper reviews the evolution of the mesocyclone criterion for three stages in the operational application, and analyzes some issues in the third stage. Based on the development of the mesocyclone algorithm, this paper introduces the mesocyclone shear algorithm, mesocyclone algorithm and mesocyclone detection algorithm, and discusses the operational applications and the issues of products from the mesocyclone algorithm.

Keywords: mesocyclone, criterion, algorithm, shear, detection

0 引言

在20世纪中期, Brooks^[1]就已认识到在雷暴单体中可能存在尺度比龙卷要大的气旋式涡旋。1963年, Fujita^[2]将其正式命名为中气旋(mesocyclone)。根据国外的统计, 90%以上的中气旋会伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生, 因此中气旋探测对于准确、实时发布强天气预报具有十分重要的意义。

在多普勒雷达应用之前, 由于缺乏对速度场的探测资料, 中气旋研究进展缓慢。1971年, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的强风暴实验室(NSSL)拥有了位于诺曼(Norman)的第一台用于研究的S波

段多普勒雷达。其后, 依据Norman多普勒雷达所收集的数据集, NSSL对中气旋的基本特征进行了深入研究, 先后提出了利用径向速度对来识别中气旋的判据及中气旋客观算法。

中气旋的判据发展经历了三个阶段: 使用径向速度方位切变阈值和厚度阈值; 使用与距雷达站距离有关的径向速度方位切变阈值和厚度阈值; 使用与距雷达站距离有关的旋转速度阈值和厚度阈值。目前, 国内业务中最常使用的中气旋判据是使用与距雷达站距离有关的旋转速度和厚度阈值。

中气旋客观算法的发展也经历了三个阶段: 中气旋切变算法(mesocyclone shear algorithm)、中气旋算法(mesocyclone algorithm)、中气旋探测算法(mesocyclone detection algorithm)。目前在全美布网的165部WSR-88D S波段雷达build 9.0版本中内置的是中气旋算法, 预期下一阶段将会更新为中气旋探测算

收稿日期: 2015年6月3日; 修回日期: 2015年9月11日
第一作者: 费海燕(1983—), Email: feihy2009@163.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(41475042); 江苏省气象科学研究所北极阁基金(BJG201305)

法。我国CINRAD WSR-98D SA/SB目前使用的也是中气旋算法。

国内在中气旋判据和中气旋算法得到的中气旋产品的应用上,业务人员也积累了一些相关经验。个例分析^[3]表明,与非超级单体龙卷相比,导致强龙卷的中气旋底高明显偏低,基本在1km以下。台风前部龙卷个例研究^[4]发现,中气旋算法产品没有报警,认为中气旋阈值应结合当地特点作调整。由中气旋文本产品给出的最强切变值统计发现,当中气旋最强切变达到 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 以上极有可能出现 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的强风或者龙卷天气^[5]。根据对中气旋的旋转速度统计,64.3%以上的冰雹天气的中气旋达中等强度以上,50%以上的雷雨大风天气的中气旋达中等强度以上,而强降水天气达中等以上强度仅为36.4%^[6]。

国内多普勒雷达应用研究起步较晚,且国内大部分C波段多普勒雷达应用软件中无中气旋算法,因此业务上由中气旋判据和由中气旋算法产品来识别中气旋是并存的。

1 中气旋判据发展的三个阶段

由于多普勒雷达仅能探测到一维的径向风场,因此必须对中气旋流场作一定假设,才能在径向速度场上给予合理解释。故通常假设中气旋流场满足Rankine涡旋条件,即:

$$\begin{cases} v_t = V_t \frac{r}{R_t} & r \leq R_t \\ v_t = V_t \frac{R_t}{r} & r \geq R_t \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_t 表示切向速度, V_t 表示核半径 $r=R_t$ 时的最大切向速度。在核区内($r \leq R_t$),切向速度随半径线性增加;在核区外,速度与半径成反比。对气旋式旋转, V_t 为正;对反气旋式旋转, V_t 为负。

中气旋为气旋式旋转。由于多普勒雷达平面扫描是以顺时针方向进行的(正北为 0° 方位角,顺时针方位角增加到 360°)。因此,在多普勒雷达平面扫描径向速度场上,中气旋就表示为同一距离圈上,相隔一定方位角距离(即直径)的最大负速度与最大正速度(简称最大正负速度对或径向速度对)。传统意义上,中气旋可以定义为具有风暴尺度(2~10km)的Rankine涡旋特征的多普勒径向速度对。径向速度对的值越大或径向速度对之间的距离越小,说明中气旋的强度越强。

1.1 第一阶段的中气旋判据

从传统意义上的中气旋定义到中气旋定量识别判据,主要是考虑到中气旋为三维旋转系统,加入了对

中气旋厚度要求的限制。中气旋识别判据的第一阶段即是使用径向速度方位切变值(即 V_t/R_t)和厚度值作为中气旋识别判据。

该判据是Donaldson^[7]在1970年提出的。Donaldson^[7]使用美国空军5.4cm多普勒气象雷达,分析了1968年春季美国Massachusetts东部地区一次伴随大范围强雹和龙卷过程的中气旋演变,首次提出中气旋定量识别判据阈值为:径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$;其伸展厚度大于 $2R_t$ 。1976年, Burgess^[8]利用NSSL的Norman多普勒雷达在1971—1975年的每年春季收集到的37个Oklahoma中气旋(62%伴有龙卷)进行特征统计研究时,降低了Donaldson判据的厚度值要求,采用的中气旋识别判据阈值为:径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$;其伸展厚度大于3km。

1.2 第二阶段的中气旋判据

第二阶段的中气旋判据是使用与距雷达距离有关的径向速度方位切变阈值和厚度阈值识别中气旋。这是1977年NSSL研究人员在Norman多普勒雷达(注:Norman多普勒雷达径向速度探测范围为345km)进行的春季联合多普勒业务试验(Joint Doppler Operational Project, JDOP)中提出来的。主要是考虑到受雷达采样方式的影响,距雷达越远分辨率越低,因此,采用的中气旋识别判据阈值为:距雷达230km范围内,方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,其伸展厚度大于3km;距雷达230km范围外,切变值 $\geq 1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,无厚度要求^[9]。此后,针对中气旋的研究一直使用该识别判据。

1.3 第三阶段的中气旋判据

第三阶段的中气旋判据是使用与距雷达距离有关的旋转速度阈值和厚度阈值识别中气旋。这是1987年NSSL研究人员在多普勒/闪电(Doppler/Lightning, DOPLIGHT)试验中首次提出来的,其使用旋转速度(即 V_t)代替方位切变值作为判据。中气旋识别判据阈值为:距雷达150km范围内,旋转速度 $\geq 15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,其伸展厚度大于3km;距雷达150~230km范围,旋转速度 $\geq 11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,无厚度要求^[10]。此后,美国预报业务人员开始使用旋转速度作为定量识别中气旋的重要参量。

1997年, Andra^[11]根据美国俄克拉荷马(Oklahoma)中部伴有强雹和龙卷的中气旋进行统计,给出了距雷达不同距离圈上观测到的旋转速度和中气旋强度的关系,将中气旋判据进行了细化,根据旋转速度和距雷达距离,将其分成了弱切变、弱中气旋、中等强度中气旋、强中气旋四个区域(图1)。

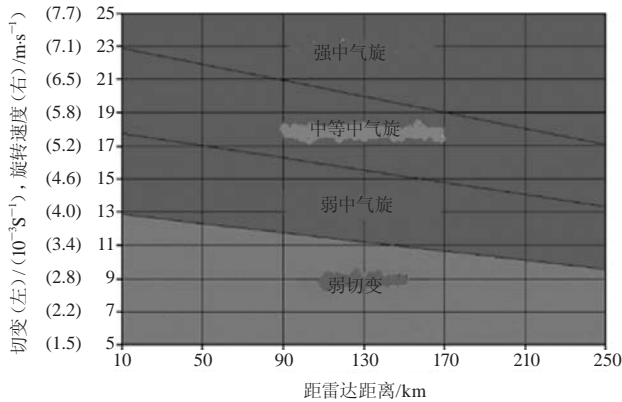


图1 中气旋强度阈值 (改自Andra^[11])
Fig. 1 Mesocyclone strength threshold

图1是目前我国业务中最常使用的中气旋判据依据。对此图的使用要注意以下几点：1) 图1是根据美国Oklahoma中部伴有强雹和龙卷的中气旋统计结果绘出的，按照Burgess等^[12]的统计结论，Oklahoma中部地区伴有强雹或龙卷的中气旋成熟阶段时的核半径平均为2.75km，旋转速度平均为23.3m·s⁻¹。由图1可知，该旋转速度对应为强中气旋；而根据我国的统计^[13]，中气旋成熟阶段时的平均核半径为3.085km，平均旋转速度为18.945m·s⁻¹。由图1可知，在距雷达150km范围内，仅对应为中等强度中气旋。因此在我国使用图1时，要考虑到我国中气旋的平均强度比Oklahoma中部地区伴有强雹或龙卷的中气旋要弱的事实，适当降低对旋转速度值的要求；2) 图1是主观估计中气旋强度的工具，对无经验的预报员，可以起指导作用。但要注意图中中气旋的特定直径是6.5km，对直径明显小于或大于6.5km的中气旋，该图会过低或过高地估计了中气旋的强度；3) 根据NSSL中气旋第三阶段判据，中气旋要有一定的垂直伸展厚度，而图1仅考虑了旋转速度，并没有考虑厚度。由于单层中气旋有可能是没有意义的，因此，在雷达探测单仰角上旋转速度满足阈值后，还要确定一下所探测到的旋转速度区是否满足垂直伸展厚度大于3km的要求。

2 中气旋客观算法的发展

由第一节可知，Donaldson^[7]首次提出了用单多普勒雷达识别中气旋的判据，即径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，垂直伸展厚度等于或大于其直径的2倍。其后，NSSL算法开发人员对Donaldson的判据进行了改进，并开发了中气旋切变算法来自动识别是否存在满足阈值的中气旋切变区域。目前我国CINRAD WSR-98D SA/SB使用的中气旋算法是NSSL对中气旋切变算法的改进。因此，本节按照NSSL对中气旋客

观算法改进的过程，分别介绍中气旋切变算法、中气旋算法、中气旋探测算法。

2.1 中气旋切变算法

图2为中气旋切变算法流程图，图中一些术语定义如下：

- 1) 类型矢径 (pattern vector)：指在常定距离圈上寻找到的速度增加的长度。
- 2) 角动量：类型矢径的速度差和方位角距离的乘积。
- 3) 切变：类型矢径的速度差除以方位角距离。
- 4) 2D特征：一个类型矢径与其他类型矢径在方位角和距离圈距离小于阈值时，则可以组成一个2D特征。
- 5) 对称特征：2D特征切向和径向长度之比在阈值范围内，则认为是对称特征。

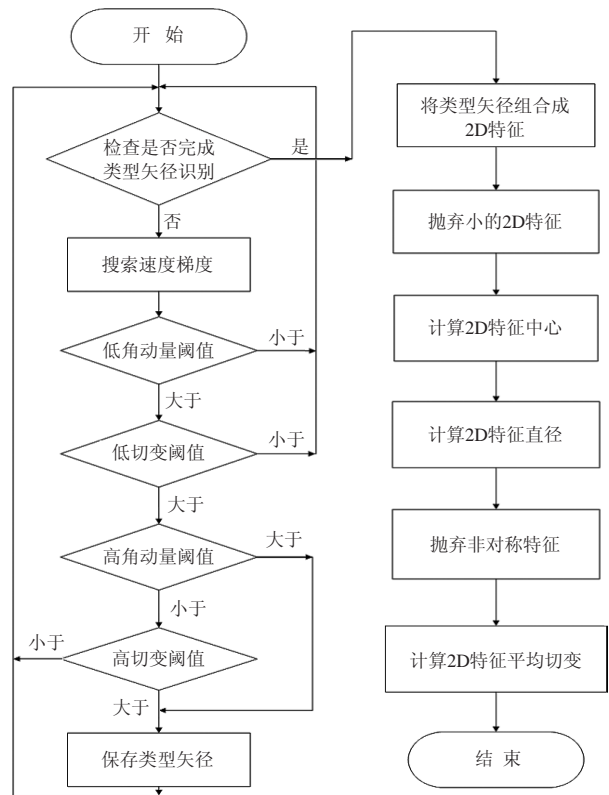


图2 中气旋切变算法流程图 (引自Zrnic等^[14])
Fig. 2 Flow chart of mesocyclone shear algorithm

1985年，Zrnic等^[14]依据1977年春季美国联合多普勒业务项目 (JDOP) 观测，利用位于Norman的多普勒雷达所观测到的Oklahoma中部40个中气旋例子 (伴随强雹和强龙卷天气的中气旋)，给出了中气旋切变算法中参数的阈值：如低切变取为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，高切变取为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，低角动量取为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，高角动量取为 $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。这些值是根据这40个中气

旋主观确定的，原则上使用这些阈值，可以保证40个中气旋没有一个被遗漏。

对比图1发现，低切变取为 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，意味着强度在弱切变以上的中气旋，在中气旋切变算法中都给予保留。这样算法识别的中气旋能完全涵盖由图1识别的弱切变以上的中气旋。

2.2 中气旋算法及产品应用

2.2.1 中气旋算法

NSSL对中气旋切变算法进行改进后，将其命名为中气旋算法，1996年秋季开始正式用于全美布网的165部S波段多普勒雷达。目前我国CINRAD WSR-98D SA/SB使用的即是中气旋算法。

中气旋切变算法考虑的仅是单层中气旋，中气旋算法增加了对垂直连续性的检验，即考虑中气旋有一定的伸展厚度。中气旋算法第一步是由中气旋切变算法探测2D特征（对称或不对称）；第二步是通过对垂直连续性的检验将中气旋切变分成三种类型。其流程图见图3。

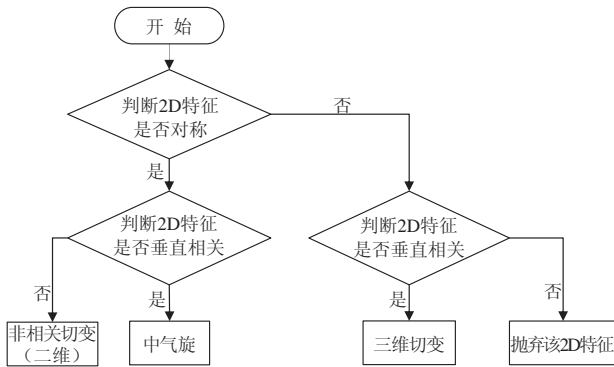


图3 中气旋算法流程图

Fig.3 Flow chart of mesocyclone algorithm

2.2.2 中气旋产品应用

由图3可见，中气旋算法通过对2D特征做垂直相关性检验，最终得到三种类型：非相关切变、三维切变、中气旋。在目前的CINRAD WSR-98D SA/SB中气旋图形产品（M，60号）中，中气旋用深黄色的圆圈（线的宽度为4个像素）显示，并带有离它最近的被识别的风暴单体的标识号；三维切变用浅黄色的圆圈（线的宽度为1个像素）显示，不带有风暴单体的标识号；非相关切变在图形产品上不显示，但在中气旋文本产品（M，60号；中气旋文本产品是中气旋图形产品的匹配产品，共用一个产品号）中有显示。

中气旋图形产品可以叠加到反射率因子或径向速度图形产品上，与强单体相伴随的中气旋伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生，要充分引起

注意。图4出示了2013年3月23日14:53（北京时间）1.5°仰角百色雷达反射率因子图叠加中气旋图形产品（黄色圆圈），此超级单体风暴维持了较长时间的中气旋，并造成沿途经过的田林县定安镇、八渡乡、八桂乡出现了直径为20~30mm的冰雹、强风和雷电等强对流天气。

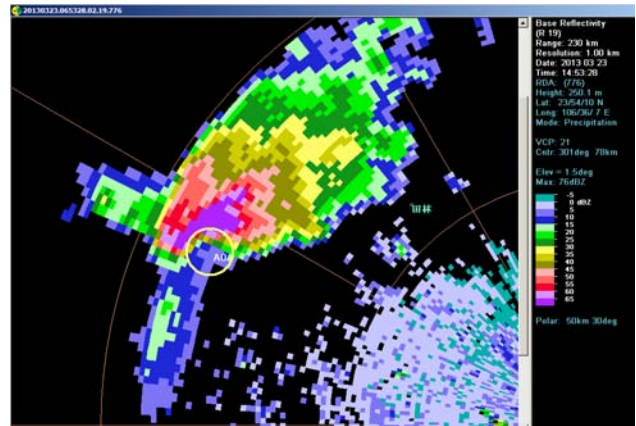


图4 2013年3月23日百色雷达强反射率因子叠加中气旋（黄色圆圈）

Fig.4 Strong reflectivity with mesocyclone product (yellow circle) in Baise radar on 23 March 2013

在中气旋图形产品上并不能确定中气旋最强2D特征的高度，但在中气旋文本产品中会显示最强切变值及其高度。可以利用文本产品中的最强切变值及其高度进一步区分强天气类型。

2013年3月23日午后，百色市田林县、右江区、田阳县、田东县、平果县的部分地区先后出现雷暴、冰雹、雷雨大风等灾害性天气。根据百色SB雷达探测，导致田林降雹的强风暴维持了一个持续较长时间的中气旋，图5即是中气旋最强切变高度演变图。由图5可见，强中气旋的最强切变维持在 0°C 层左右，这里称为中层中气旋，意味着旋转上升气流超过 0°C

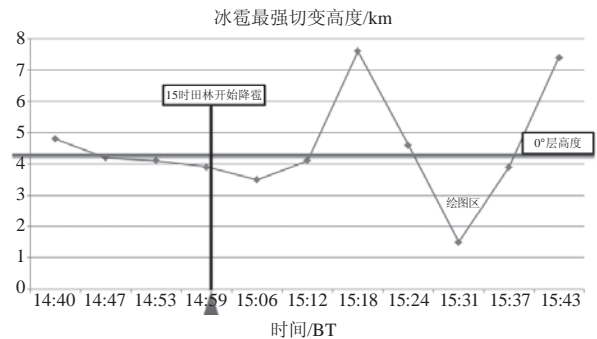


图5 2013年3月23日14:40—15:43百色雷达探测降雹单体中气旋最强切变高度

Fig.5 The height of the strongest shear in the hail cell detected by Baise radar at 14:40 to 15:43 BT on 23 March 2013

层。由冰雹形成和增长的概念模型，上升气流超过0℃层高度且持续时间足够长，说明冰雹胚胎在过冷却水累积区生长，冰雹则可以增长到很大的尺寸。

2013年7月7日午后，一个伴有短时强降水和龙卷产生的超级单体风暴维持了一个持续较长时间的中气旋，图6是中气旋最强切变高度演变图。由图6可见，强中气旋的最强切变维持在0℃层距地高度一半左右，可以称为低层中气旋，可以排除降雹可能。在环境中边界层相对湿度较高和0~1 km垂直风切变较强时，如果低层中气旋强度强、维持时间长，龙卷发生的可能则较大。

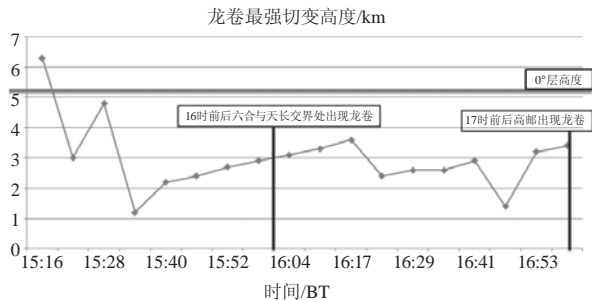


图6 2013年7月7日15:16—16:59南京雷达探测的龙卷单体中气旋最强切变高度

Fig.6 The height of the strongest shear in the tornado cell detected by Nanjing radar at 15:16 to 16:59 BT on 7 July, 2013

2.2.3 中气旋产品应用中需要注意的问题

1) 注意剔除退速度模糊引起的虚假中气旋。在中气旋算法中，没有去除风暴运动，因此对退模糊算法有很大的依赖性，不正确的退模糊算法会导致不正确的中气旋识别。如图7所示的2006年4月9日湖南永州

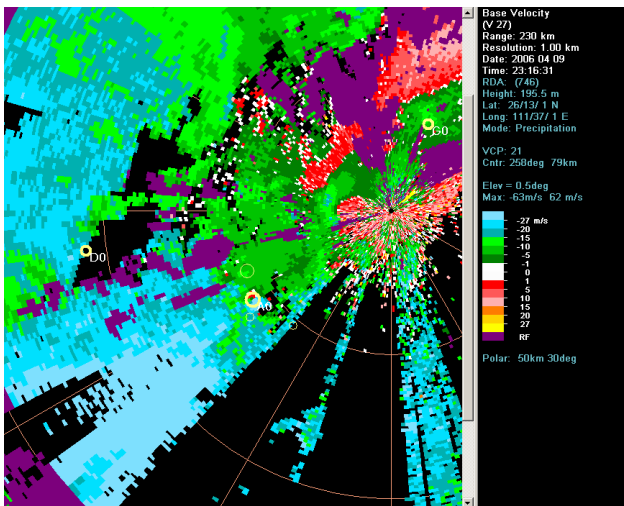


图7 2006年4月9日湖南永州叠加中气旋产品的径向速度图
Fig.7 Radial velocity and mesocyclone product in Yongzhou, Hunan on 9 April 2006

的例子，由于退速度模糊的影响，图中标识号为Do的深黄色圆圈（算法识别的中气旋）是虚假的中气旋。

2) 目前算法中的大部分缺省参数来源于中气旋方位切变算法开发使用的参数。由于资料集只有几个风暴过程时间只有几小时，且是20世纪70年代Oklahoma中部春季伴有强冰雹和龙卷的中气旋参数。因此在我国使用时可以适当对缺省参数做修改。如对于我国台风前部龙卷，可以适当调低缺省参数中的类型矢径(TPV)值。

2.3 中气旋探测算法

中气旋算法参数来源于中气旋切变算法参数，是以Norman多普勒雷达观测到的中气旋资料集建立的。随着美国多普勒雷达的布网，NSSL发现一些地区产生了龙卷等强天气的风暴尺度(2~10km)涡旋会被中气旋算法漏报。因此，NSSL又设计开发出了一个新算法，称为中气旋探测算法^[15]。根据算法过程，给出下列流程图(图8)。

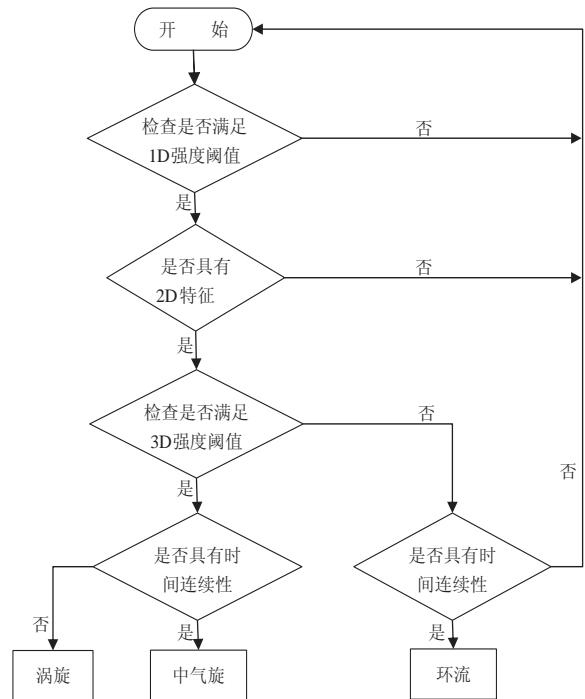


图8 中气旋探测算法流程图

Fig.8 The flow chart of mesocyclone detection algorithm

与目前使用的中气旋算法相比，中气旋探测算法使用了中气旋强度阈值来代替切变阈值；并使用多个不同距离的强度阈值，以识别更多的2D特征；增加了时间连续性测试，能够跟踪并预报中气旋的移动路径。图形产品中增加了随时间变化的最大切变高度显示等特征(图5、图6是根据目前中气旋文本产品的最大切变高度值和探空的0℃层高度做的，中气旋探测算法的图形产

品则将会直接显示随时间变化的最大切变高度), 这样可以使预报员更快地判断中气旋的强度值和高度值, 为相应强天气预警提供宝贵的提前时间。

3 结语

中气旋探测与强天气预警密切相关。中气旋的判据发展经历了三个阶段, 目前国内业务中最常使用的中气旋判据是其中的第三阶段, 即使用与距雷达站距离有关的旋转速度和厚度阈值。对没有内置中气旋算法的多普勒雷达, 预报业务人员依据图1来识别中气旋及其强度, 要注意其阈值不一定完全适用于国内中气旋的实际状况, 因此需有更多的统计结果, 才能由权威部门对图1的阈值做修订。此外, 在雷达探测单仰角上旋转速度满足阈值后, 还要确定所探测到的旋转速度区是否满足垂直伸展厚度大于3km的要求。对满足垂直伸展厚度的真实中气旋要立即发布强天气警报。

中气旋客观算法的发展也经历了三个阶段: 中气旋切变算法、中气旋算法和中气旋探测算法。对目前有中气旋算法的CINRAD WSR-98D SA/SB多普勒雷达, 对与强单体相伴随的真实中气旋要引起高度注意。由于目前我国多普勒雷达业务中使用的速度退模糊算法效果不够显著, 因此对算法识别的中气旋要人工剔除由退速度模糊算法引起的虚假中气旋。同时要充分关注文本产品中切变值大小和高度。根据中气旋文本产品中的最大2D切变高度与环境0℃层高度的比较, 可以将中气旋分成中层中气旋和低层中气旋, 通常在环境边界层相对湿度较高和0~1km强垂直风切

变时, 如果低层中气旋强度强、维持时间长, 则要优先发龙卷预警; 对直径较大的低层中气旋, 优先发短历时强降水预警; 对中层强中气旋, 优先发冰雹预警。

参考文献

- [1] Brooks E M. The tornado cyclone. *Weatherwise*, 1949, 2: 32-33.
- [2] Fujita T T. Analytical mesometeorology: a review. *Meteor Monogr*, 1963, 5: 77-125.
- [3] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. *高原气象*, 2009, 28(3): 617-625.
- [4] 蒋义芳, 吴海英, 沈树勤, 等. 0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析. *气象*, 2009, 35(4): 68-75.
- [5] 方翀, 郑媛媛. 新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析. *气象*, 2007, 33(11): 16-20.
- [6] 冯晋勤, 汤达章, 俞小鼎, 等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析. *气象*, 2010, 36(8): 47-52.
- [7] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1970, 9: 661-670.
- [8] Burgess D W. Single Doppler radar vortex recognition. Part I: Mesocyclone signatures. Preprints, 17th Conf on Radar Meteorology, Seattle, WA. Amer Meteor Soc, 1976.
- [9] JDOP Staff. Final report on the Joint Doppler Operational Project (JDOP), 1979.
- [10] Forsyth D E, Burgess D W, Mooney L E, et al. DOPLIGHT 87 program summary. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-101. National Severe Storms Laboratory, Norman, OK, 1989.
- [11] Andra D L. The origin and evolution of the WSR-88 D mesocyclone recognition nomogram. Preprints, 28th Conf on Radar Meteorology, Austin, TX. Amer Meteor Soc, 1997.
- [12] Burgess D W, Wood V T, Brown R A. Mesocyclone evolution statistics. Preprints, 12th Conf on Severe Local Storms, San Antonio, TX. Amer Meteor Soc, 1982.
- [13] 周小刚, 王秀明, 俞小鼎, 等. 逾量旋转动能在区分我国龙卷与非龙卷中气旋中的应用. *高原气象*, 2012, 31(1): 137-143.
- [14] Zrnic D S, Burgess D W, Hennington L D. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 1985, 2: 425-438.
- [15] Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D W, et al. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 304-326.