

风暴的自动识别、跟踪与预报

肖艳姣¹⁾ 汤达章¹⁾ 李中华¹⁾ 蒋义芳²⁾

(1) 南京气象学院大气物理学系, 南京 210044; 2) 江苏省气象台, 南京 210008)

摘要 利用多普勒雷达体扫描资料对风暴进行实时地自动识别、跟踪、结构分析和临近预报。风暴的识别基于某个连续区域的体积和雷达反射率大于给定的体积阈值和反射率阈值;用矩心跟踪法匹配相邻两时刻的风暴,对风暴的合并与分裂进行了处理;根据风暴在过去各个时刻的中心位置和体积,利用最小二乘法进行线性外推来预报其在下一时刻的位置和面积。结果表明本方法能较好地识别、跟踪和警戒强对流性天气。

关键词 风暴的自动识别,跟踪与预报,矩心跟踪法

分类号 P446, P406

自然界降水中对流云降水占了相当大的比例,这是一种局地性天气,但由于它生消变化快,降水强度大,往往又会导致山洪、冰雹、泥石流等自然灾害。随着气象雷达技术的发展和计算机在雷达系统中的应用,利用雷达系统对强对流天气进行自动识别、跟踪和警戒越来越受到人们的重视并成为可能。在与跟踪技术相结合的短时预报方面,国外已做了大量工作,提出了多种方法,如相关系数法、模式识别法,矩心跟踪法等。Austin 和 Bellon^[1]利用矩心跟踪法进行了三维风暴的跟踪,Zittel^[2]提出了利用雷达反射率在连续的三维区域大于给定的反射率阈值来识别风暴的方法,并利用被识别的风暴在过去与现在的位置来估计它的运动速度,以此速度来预报它在下一时刻的位置,Dixon 和 Wiener^[3]等人又先后改进了这种方法。在我国随着多普勒雷达的普遍安装与运转,利用多普勒雷达开展强对流天气的自动识别、跟踪与预报的研究,提高预报天气的能力是很有必要的。这一工作对下世纪初我国全面实施多普勒雷达业务化也有重要意义,本工作就是这方面的一些尝试。

1 风暴识别

风暴的识别基于某个连续三维区域的体积 V 和雷达反射率 Z 大于给定的体积阈值 T_V 和反射率阈值 T_Z ,其中也可包含一定数量的比反射率阈值 T_Z 小不到 5 dBZ 的点。文中假设风暴由体扫内各个仰角时的二维风暴分量构成,而每个风暴分量又是由方位上连续的风暴段构成。

反射率阈值 T_Z 的大小,根据不同的风暴类型来给定,可分成以下几类

※ 收稿日期: 1997-07-03; 改回日期: 1997-10-15

第一作者简介: 肖艳姣,女,1971年3月生,硕士

- | | |
|-------------|--------------------------------|
| 1) 超级单体风暴 | $T_z = 40 \sim 50 \text{ dBz}$ |
| 2) 对流风暴 | $T_z = 30 \sim 40 \text{ dBz}$ |
| 3) 中尺度对流复合体 | $T_z = 25 \sim 30 \text{ dBz}$ |
| 4) 雪带 | $T_z = 15 \sim 20 \text{ dBz}$ |

体积阈值 T_v 的使用是为了排除噪声和小区域的地物回波的干扰,文中 $T_v = 50 \text{ km}^3$,即略去体积小于 50 km^3 的风暴。

1.1 风暴段

在风暴段的算法中引入下面另外3个阈值:

(1) 最小反射率阈值 D_z : 它比 T_z 小5 dBz, 满足 $D_z < Z < T_z$ 的一定数量的点可包含在风暴段中。

(2) 数量阈值 N : 当满足 $D_z < Z < T_z$ 的连续点数小于 N 时,这几个点可包含在风暴段中。

(3) 长度阈值 L : 风暴段的最小长度为 L 。

风暴段的算法为: ①沿径向搜寻反射率 Z 第一次大于 T_z 的点,在同一条径向上,把这个点以后的连续满足 $Z > T_z$ 的点归入到一个风暴段中,直到遇到 $Z < T_z$ 的点,如果这个满足 $Z > T_z$ 的点的 Z 值大于 D_z ,则开始记下满足 $D_z < Z < T_z$ 的连续点数,如果满足 $D_z < Z < T_z$ 的连续点数小于 N ,那么把这几个点也归入到这个风暴段中,并且这个风暴段的搜寻继续进行;如果满足 $D_z < Z < T_z$ 的连续点数大于或等于 N ,那么这个风暴段的搜寻终止,另一个新的风暴段的搜寻重新开始。②对于搜寻到的风暴段,如果其长度小于 L ,则被删除。③对于保留下来的同一径向上的首尾距离不超过两个距离库的任两个风暴段,将其合并成一个风暴段。

对于保留下来的每一个风暴段记录以下几个特征量,以备后用。

首尾径向距离及其径向所在方位角;最大反射率因子及其所在高度;最大、最小径向速度;以反射率为权重的风暴段的中心径向距离和风暴段长度;风暴段的几何中心径向距离。

1.2 风暴分量

风暴分量的算法为: 在同一个 PPI 中沿切向搜寻连续的风暴段。多个风暴段要合并成一个风暴分量必须同时满足以下3个条件:

- (1) 在同一个风暴分量中,相邻的风暴段的方位间距为 1° ;
- (2) 在同一个风暴分量中,相邻的风暴段的首尾距离至少重叠 1.5 km;
- (3) 一个风暴分量至少包含 12 个风暴段。

对每一个风暴分量计算下面几个特征量,以备后用。

以反射率为权重的风暴分量中心和面积;风暴分量的几何中心和面积;最大反射率因子及其所在高度;最大、最小径向速度。

如果同一个 PPI 的风暴分量的个数超过 20,则把它们按反射率权重面积排序,只保留反射率权重面积最大的 20 个风暴分量,其余的则被删除。

1.3 风暴立体结构

风暴的算法为: 搜寻不同仰角层(即不同 PPI)垂直相关的风暴分量。从第二个仰角开始,每个仰角层的风暴分量都和它下面相邻的仰角层的风暴分量进行比较,它可分成以下几个步骤:

(1) 搜寻相邻仰角层的风暴分量的反射率权重中心之间的水平距离(也称为搜寻半径)小于 5 km 的风暴分量为垂直相关的风暴分量。

(2) 步骤(1)后,如果没有垂直相关的风暴分量,则把搜寻半径改为 7.5 km,继续搜寻。

(3) 步骤(2)后, 如果还没有垂直相关的风暴分量, 则把搜寻半径改为10 km, 继续搜寻。

如果同时有几个风暴分量与其相邻仰角的一个风暴分量垂直相关, 那么选择相邻仰角的风暴分量的反射率权重中心之间的水平间距最小的一个。

多个风暴分量要合并成一个风暴, 必须满足条件: 同一个风暴中至少要有两个仰角相邻且垂直相关的风暴分量, 并且风暴的体积必须大于 50 km^3 。

对每一个风暴可先计算以反射率为权重的风暴中心和体积, 风暴的顶高和底高, 以备后用。

有时, 一个风暴可能被隔成几个靠得很近的小单体, 为此, 把满足下面条件的任二个风暴合并成一个: 二个风暴的反射率权重中心之间的水平距离小于10 km, 它们不包含同一仰角的风暴分量, 并且一个风暴的顶与另一个风暴的底之间垂直距离小于4 km。对于合并后的风暴, 上面几个特征量要重新计算。

如果同一个体扫内的风暴个数大于20, 那么把它们按反射率权重体积排序, 保留反射率权重体积最大的20个, 其余的则被删除。

2 风暴结构

风暴结构的算法是求风暴的一些结构参数:

以反射率为权重的风暴中心、顶高、底高和几何体积; 风暴的最大反射率及其所在高度; 风暴底的最大、最小径向速度; 风暴的倾斜方向与悬挂距离; 风暴投影面积的形状。

由于风暴中的上升气流从风暴的右前侧进入风暴后, 沿逆切变方向倾斜到达云顶, 在下风方离去, 因而在强的上升气流区会形成弱回波区, 在主要回波核心的下风方伸展出砧状云, 所以从垂直结构来看, 就会出现风暴向其移向的右后方倾斜, 并且高层回波超出低层回波一定的距离而出现悬挂。

所谓倾斜是指风暴底层的风暴分量的反射率权重中心和中上层的风暴分量的反射率权重中心之间的连线与 z 轴之间有一定的夹角。在具体的计算过程中, 风暴的垂直倾斜度是这样计算的: 首先算出底层的风暴分量与其上层所有的风暴分量的反射率权重中心的连线与 z 轴的夹角, 然后找出各个夹角的最大值作为风暴的垂直倾斜度, 在此基础上可算出风暴的水平倾斜方向。

所谓风暴的悬挂是风暴的中上层风暴分量的边缘超出最底层风暴分量边缘一定的距离。在具体计算过程中, 风暴的悬挂方向与风暴的水平倾斜方向的求法一致, 而风暴的悬挂距离是这样计算的: 算出所有中上层的风暴分量相对于底层的风暴分量的悬挂距离, 然后取其中最大值作为风暴的悬挂距离。

在 xy 平面上, 风暴投影面积的形状可以用椭圆来近似^[4], 如图1所示: 椭圆的中心坐标为 (\bar{x}_e, \bar{y}_e) , 长轴和短轴分别为 r_{major} 、 r_{minor} , 长轴与 x 轴的夹角为 θ , 根据 Wilson^[5]给出的椭圆参数计算公式可求出椭圆各参数的值。

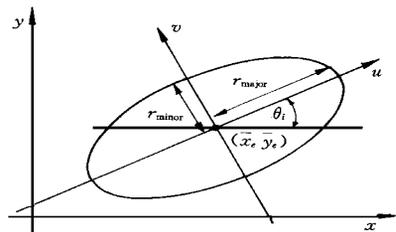


图1 椭圆参数示意图

Fig. 1 Schematic of elliptical parameters

3 风暴的跟踪与预报

3.1 风暴的跟踪

重心跟踪法最初是由强风暴实验室提出的,该方法比较简单,计算时间短,特别适应微型计算机。此方法计算出相邻时刻的两组风暴的中心位置,利用最大速度作控制,用最佳组合匹配这两组风暴。

3.1.1 用最佳组合匹配相邻两时刻的风暴

图2显示了 t_1 、 t_2 相邻两时刻的两组风暴以及 t_1 时刻的风暴在 Δt 时间间隔内可能的移动路径,即 t_1 时刻的任一风暴与 t_2 时刻的各个风暴作出连线。匹配相邻两时刻的风暴就是确定哪一组可能的路径最接近真实路径,如果在连续的时间间隔内重复这个工作,那么就可对风暴的整个过程进行跟踪了。由图2,可以作以下直观的假设:

(1) 正确的匹配将包含那些较短的路径。

(2) 正确的匹配将连接那些具有相似特征(如尺度、形状等)的风暴。

(3) 在 Δt 时间间隔内,风暴移动的距离将有一个上限,可以用风暴最大运动速度来控制(平流速度加风暴侧面的发展速度)。

正确匹配问题可以用最佳组合来解决,假设最佳组合路径就是风暴的真实运动路径。设 t_1 时刻有 n_1 个风暴,其中第 i 个风暴的状态为 $s_{1i} = (\bar{x}_{z1i}, \bar{y}_{z1i}, \bar{v}_{1i})$, t_2 时刻有 n_2 个风暴,其中第 j 个风暴的状态为 $s_{2j} = (\bar{x}_{z2j}, \bar{y}_{z2j}, \bar{v}_{2j})$, 定义函数 C_{ij}

$$C_{ij} = w_1 \cdot d_p + w_2 \cdot d_v$$

其中 t_1 时刻的第 i 个风暴的反射率权重中心 $(\bar{x}_{z1i}, \bar{y}_{z1i})$ 与 t_2 时刻的第 j 个风暴的反射率权重中心 $(\bar{x}_{z2j}, \bar{y}_{z2j})$ 之间的水平距离为

$$d_p = [(\bar{x}_{z2j} - \bar{x}_{z1i})^2 + (\bar{y}_{z2j} - \bar{y}_{z1i})^2]^{\frac{1}{2}}$$

t_1 时刻的第 i 个风暴与 t_2 时刻的第 j 个风暴之间的体积距离为

$$d_v = |V_{2j}^{\frac{1}{3}} - V_{1i}^{\frac{1}{3}}|$$

w_1 、 w_2 为权重系数,在本文中设为1。

假设风暴最大运动速度为 S_{\max} (在本章设为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), 那么, $d_p / \Delta t > S_{\max}$ 的路径就排除在最佳路径之外。

最佳组合就是求出一组路径使其客观函数 $Q = \sum C_{ij}$ 最小,其中 i, j 分别指 t_1 时刻的第 i 个风暴和 t_2 时刻的第 j 个风暴,一组路径的总条数应小于或等于 $n = \min(n_1, n_2)$, 它可以这样来描述:

已知一个 $n \times n$ 阶的矩阵 C_{ij} , 去寻找一个满足下面条件的另一个 $n \times n$ 阶矩阵 X_{ij} , 要求

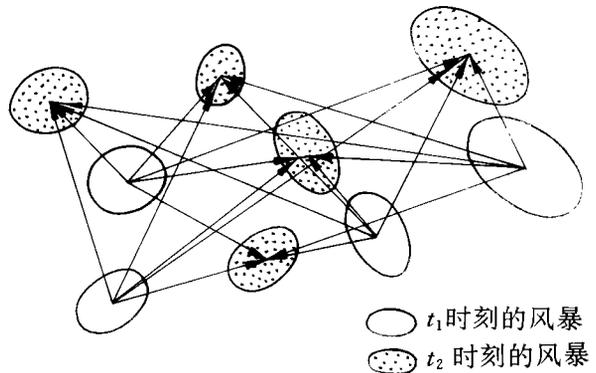


图2 连续时间间隔内风暴可能的运动路径示意图

Fig. 2 schematic of likely paths a storm took in a short period

X_{ij} 满足:

- (1) 在任何行或列上, x_{ij} 只能有一个非零元素, 并且它的值为1;
- (2) $\sum_{i,j} C_{ij} X_{ij}$ 最小。

采用 Hungarian 方法来寻找矩阵 X_{ij} 。首先找出 C_{ij} 中零元素最多的一组配置, 这些零元素不在同一行或列上, 那么 X_{ij} 中非零元素的位置能被确定来匹配这些零元素。如果有 n 个这样的零元素, 那么 X_{ij} 就找到了, 否则, 排除这些零元素所在的行和列, 在其他的行和列上加上某一个值, 把 C_{ij} 转换为 D_{ij} , 如果 D_{ij} 中还找不出 n 个不在同一行或列上的零元素, 那么继续转换 D_{ij} , 经过有限次的转换, 我们最终能找到 n 个不在同一行或列上的零元素, 从而找出 X_{ij} 来。

对于配对的风暴其移向与所有风暴的平均运动方向的偏差大于 90° ; 我们认为配对错误。

3.1.2 风暴的合并与分裂

在对流云发展过程中, 常常发生云体分裂或合并现象。如果 t_1 时刻的二个或多个风暴在 t_2 时刻的预报中心都落在 t_2 时刻的某一风暴的面积之内, 那么 t_1 时刻的这几个风暴在 t_2 时刻就合并成了一个风暴; 如果 t_2 时刻的二个或多个风暴中心都落在 t_1 时刻某一个风暴在 t_2 时刻的预报面积之内, 那么 t_1 时刻的这个风暴在 t_2 时刻就分裂成了几个风暴。

3.2 风暴的临近预报

根据风暴在过去各个时刻的反射率权重中心位置和体积, 利用最小二乘法进行线性外推, 来分别预报下一时刻风暴的所在位置和面积。如果预报的风暴体积小于 50 km^3 , 就认为风暴在下一时刻消散了。利用最小二乘法来预报, 避免了因为短时间云体变化而产生的误差, 其结果比较稳定。

对于风暴的分裂与合并, 作如下规定: (1) 对于分裂现象, 将旧单体和分裂生成的大云体配对, 小云体作为新生云体; (2) 对于合并现象, 将两个旧单体看成一个单体, 求出其公共的反射率权重中心位置, 并以此和新生单体配对。

4 应用分析

根据上述算法, 用 Microsoft C/C++ 7.0 语言 编制成一套软件。该软件利用多普勒雷达体扫资料完成对风暴的自动识别、跟踪与预报。对探测结果不仅有较直观的屏幕显示, 还对其位置、结构参数等有定量的数字说明, 此外, 还有一个体扫中所有 PPI 资料的同屏显示和单幅显示。整个处理过程在 486 微机(主频 100 MHz) 上运行不超过 3 min, 足以达到业务使用中的实时要求。

由于缺少资料, 本文只用厦门的 1996 年 4 月 19 日的一个暴雨过程中的三幅体扫资料检验了本软件的可行性, 它们是 19 时 11 分 (t_1), 19 时 32 分 (t_2), 19 时 58 分 (t_3) 的三幅体扫资料。

在 t_1 时刻识别到了 6 个风暴, 它们的位置与实测资料的强回波块位置是一致的, 它们的结构参数如表 1 所示。在 t_2 时刻探测到了 8 个风暴, 它们的结构参数如表 2 所示。

t_2 时刻跟踪到了 t_1 时刻的三个风暴, 分别是: t_1 时刻的风暴 2 与 t_2 时刻风暴 4; t_1 时刻风暴 3 与 t_2 时刻风暴 6; t_1 时刻风暴 6 与 t_2 时刻风暴 8。此外, t_1 时刻的另外 3 个风暴在 t_2 时刻消散了, t_2 时刻又新生了 5 个风暴。

表1 t_1 时刻的风暴结构参数

Table 1 Structure parameters for the identified storms at 191IBST, April 19, 1996

	几何 体积 (km^3)	中心 距离 (km)	中心 方位 ($^\circ$)	中心 高度 (km)	最大反 射率 (dBz)	最大反射率 所在高度 (km)	底高 (km)	顶高 (km)	风暴底的最 大径向速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风暴底的最 小径向速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	倾斜 方向 ($^\circ$)	悬挂 距离 (km)
1	141	125	211	3.4	39	4.2	2.5	4.3	0	-7	256	4
2	130	58	286	3.6	39	4.3	3.4	3.8	0	-14	16	-3
3	104	46	325	3.6	38	3.7	3.2	3.9	-1	-9	183	9
4	76	47	89	0.7	56	0.1	0.1	1.4	6	0	47	3
5	73	21	153	0.7	59	0.0	0.1	1.3	8	-5	25	12
6	54	43	284	3.8	40	4.0	3.6	3.9	0	-8	66	13

表2 t_2 时刻的风暴结构参数

Table 2 Structure parameters for the identified storms at 1932BST, April 19, 1996

	几何 体积 (km^3)	中心 距离 (km)	中心 方位 ($^\circ$)	中心 高度 (km)	最大反 射率 (dBz)	最大反射率 所在高度 (km)	底高 (km)	顶高 (km)	风暴底的最 大径向速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风暴底的最 小径向速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	倾斜 方向 ($^\circ$)	悬挂 距离 (km)
1	178	98	196	1.2	42	0.0	0.6	1.8	12	-4	27	-4
2	156	98	178	1.3	62	2.3	0.8	1.8	11	-11	351	10
3	158	29	256	2.6	37	0.3	1.6	3.6	6	-8	309	14
4	129	50	300	2.5	46	0.3	1.6	3.1	2	-1	89	15
5	88	24	172	1.6	40	2.8	1.1	2.8	8	-10	194	8
6	79	34	328	3.4	42	3.6	3.1	3.8	8	-8	133	5
7	74	37	152	1.8	40	1.7	0.7	2.5	4	0	352	18
8	52	28	271	3.0	40	3.7	2.5	3.5	0	-14	356	7

对跟踪到的风暴进行短时预报, 预报间隔为26 min, 结果结果 t_2 时刻的风暴6和风暴8在 t_3 时刻消散了, 而 t_2 时刻的风暴4在 t_3 时刻的预报位置和面积如表3所示。

表3 短时预报结果

Table 3 Results from short-range forecasting

	现在的风暴中心 距离 (km)	现在的风暴 方位 ($^\circ$)	现在的风暴 面积 (km^2)	移速 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	移向	预报的风暴中心 距离 (km)	预报的风暴 方位 ($^\circ$)	预报的风暴 面积 (km^2)
1	50	300	85	37	134	45	315	63

利用 t_3 时刻的资料对短时预报的结果进行了检验, t_3 时刻只探测到了一个风暴, 而且这个风暴不与 t_2 时刻的任何风暴匹配, 这说明 t_2 时刻的风暴在 t_3 时刻都消散了, 由此可见对 t_2 时刻的风暴6和风暴8的预报是正确的, 而对风暴4的预报是错的。

5 结 语

文中引入一整套关于风暴的自动识别、跟踪、结果分析与预报, 并且用实测资料检验了算法的可行性, 结果还是令人满意的, 必须指出的是: 算法中引用的各类阈值都是国外长期总结的结果, 并不一定适合我国的具体情况, 因此有必要在今后的业务使用中对软件的阈值进行调

试和改进。此外,在风暴分量算法中的第三个控制条件即一个风暴分量中至少包含12个风暴段对近距离和远距离的影响不一样,距离越远要满足这个条件越困难,在今后的业务使用中应不断总结一个面积阈值来替代,即把第三个条件改为:一个风暴分量的面积必须大于这个面积阈值。最后值得注意的是体积比较小的风暴其生命史一般都不超过30 min,因此预报时间间隔不宜太长,文中选择预报时间间隔为26 min 的目的是为了与实测体扫资料的时间间隔一致。

参 考 文 献

- 1 布朗宁 K A 编. 现时预报. 周凤仙等译. 北京: 气象出版社, 1982. 181 ~ 195
- 2 Zittel W D. Computer applications techniques for storm tracking and warning. in: Amer. Meteor. Soc., eds. Reprints of 17th conf on Radar Meteor. Boston: 1976. 514 ~ 521
- 3 Dixon M J, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and now casting—a radar based methodology. J Atmos oceanic Tech, 1993, 10(6): 785 ~ 797
- 4 Rosenfield D. Objective method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar. J Atmos oceanic Tech. 1987, 4(3): 422 ~ 434
- 5 Wilson J W, Schreiber. Initiation of convective storms at radar-observed boundary—layer convergence lines. Mon Wea Rev, 1986, 114(12), 2516 ~ 2536

STORM AUTOMATIC IDENTIFICATION, TRACKING AND FORECASTING

Xiao Yanjiao Tang Dazhang Li Zhonghua

(Department of Atmospheric Physics, NIM, Nanjing 210044)

Jiang Yifang

(Meteorological Observatory of Jiangsu Province, Nanjing 210008)

Abstract A methodology is presented for the real-time, automated identification, structure analysis, tracking and short-range forecasting of storms with Doppler weather radar volume-scan data. A “storm” is defined as a continuous region where the specified thresholds for both volumetric size and radar reflectivity are exceeded. The “centroid tracking” technique is employed to match the storms at one time with those at the following, and mergence and division have been taken into account. Based on the least square analysis on the time series of the central position and size of a storm, its new position and size within a short period can be predicted with linear extrapolation. The result shows that this method can be a useful tool for the identification, tracking and warning of severe convective weather.

Keywords storm automated identification, tracking and forecasting, centroid method