

风暴的多普勒雷达自动识别*

胡 胜^{1,2} 顾松山¹ 庄旭东² 罗 慧³

1 南京信息工程大学, 南京, 210044

2 广州中心气象台, 广州, 510080

3 陕西省气象局, 西安, 710015

摘 要

3 种基于雷达的风暴自动识别方法: (1) 美国 WSR-88D Build 7.0 风暴算法, 它利用多个预设阈值来检验回波的强度和连续性, 以构造具有三维连续结构的风暴, 该方法在风暴合并、分裂以及多个单体相距较近时误差较大。(2) 为美国 WSR-88D Build 9.0 风暴算法 (B9SI), 它用 7 个反射率因子识别阈值替代此前唯一的一个反射率因子阈值, 增加了特征核抽取和相近单体处理技术, 并保留远距离上的强的 2D 分型。该方法在面对成串或成簇多单体时, 能够识别出多个单体核, 并准确定位。B9SI 没有考虑反射率因子纹理结构和空间梯度的变化, 也没有利用径向速度资料, 因此无法描述风暴对流的发展状况。(3) CSI 方法, 它在降低 B9SI 反射率因子识别阈值的基础上, 利用模糊逻辑技术对 B9SI 输出结果和雷达基资料做进一步的处理, 以计算描述风暴对流发展强弱的对流指数。CSI 首先提取一组最能描述风暴对流性特征的物理量, 包括反射率因子纹理结构、反射率因子空间变化率、垂直积分含水量和径向速度标准方差, 并分配权重; 其次, 利用每一个物理量的统计结果, 结合其物理意义, 设计出相应的隶属函数, 以计算风暴与该物理量描述的对流性特征相匹配的概率; 最后对多个概率值进行加权平均即得对流指数。此外, 计算了 2004 年 8 月 11 日发生在广州的超级单体演变过程中的对流指数, 分析表明: 对流指数两次加大对应了超级单体的合并增长和辐合增长过程; 风暴最强盛时对流指数为 0.744; 随后对流指数减小, 雷达观测到的最大反射率因子对应高度明显降低, 地面上开始出现大范围的强降水。

关键词: 风暴识别, 核抽取, 模糊逻辑技术, 对流指数。

1 引 言

20 世纪 70 年代以来, 国内外雷达气象学者在用雷达探测强对流天气领域做了大量的工作, 他们深入地分析了风暴发生、发展、成熟和消亡的物理机制, 提出了一些风暴的识别方法: Rinehart^[1]应用模式来识别风暴单体; Rinehart 等^[2]利用相关技术分析对整幅回波图像做处理; 刘黎平^[3]以面积较大的回波块为研究对象, 在等高面中计算云体的中心、面积、强度等, 称其为二维矩心识别法; 此外还有矩不变量法、边界层探测法、模糊聚类法等。以上方法是在二维反射率因子场中处理的, 没有考虑风暴的垂直结构, 因此无法给出其三维立体结构信息, 许多

学者对此作了一些改进。

1982 年 Austin 等^[4]提出了三维矩心识别方法, 即把每一个风暴单体看作是一个具有三维连续结构的整体, 计算相关物理特征量。Rosenfeld^[5], Michael 等^[6]对这一方法进行改进和应用, 他们提出了描述风暴特征的量 C_{ij} , 并通过风暴形状的几何推理来处理分裂和合并, 而风暴识别过程是在直角坐标系中完成的。改进后的风暴系列算法在美国 NEXRAD (WSR-88D Build 7.0) 业务系统中得到广泛应用, 并取得了良好的效果; 当然, 用户在使用过程中反映当出现多个风暴相距较近、风暴移动不规则以及风暴出现了合并和分裂时, 误差较大。鉴于此, Mansur^[7], Arthur 等^[8]对原有识别技术做了详

* 初稿时间: 2005 年 7 月 27 日; 修改稿时间: 2006 年 5 月 2 日。

资助课题: 广东省科学计划项目 (2004B32601007) 和广东省自然科学基金 (5001121)。

作者简介: 胡胜, 男, 1974 年生, 博士, 广州中心气象台工作。guyuesheng@tqyb.com.cn

细分析,发现在面对大尺度的风暴单体时,该识别算法不能够完整的识别出,却常常给出多个小单体的识别结果,这样就导致关于风暴单体的一些特征物理量的计算出现了误差,于是他们通过改进其中的垂直相关处理技术来克服这一缺陷。肖艳姣等^[9]在利用反射率因子三维连续结构识别出每一个单体的前提下,用椭圆拟合带状风暴系统的位置和覆盖范围,该方法在一定程度上解决了风暴带上多单体拥挤带来的追踪困难。1997年,Johnson等^[10]进一步提出利用7个反射率因子识别阈值来替代此前唯一的阈值,同时采取特征核抽取技术,并对空间相距较近的多个风暴单体进行合并或者删除处理,而且允许远距离上的二维风暴单体存在,该算法被WSR-88D的Build 9.0所采用。

2 风暴自动识别方法

文中介绍了3种风暴自动识别算法:第1种是美国WSR-88D的Build 7.0风暴算法(称之为B7SI),它采用了风暴具有三维立体结构的思想,在识别时利用多个阈值来检验其强度和连续性,目前中国新一代多普勒天气雷达大多使用这种版本。第2种是美国WSR-88D的Build 9.0风暴算法(B9SI),它在B7SI的基础上增加了多阈值、核抽取、相近单体处理等新技术,以解决成串成簇排列风暴

或多个风暴相距较近时造成的误差。文中还设计了第3种方法,它在降低B9SI识别阈值的前提下,利用其输出结果,提取多个最能描述风暴对流性特征的物理量,利用模糊逻辑技术计算风暴对流指数,以给出风暴对流发展信息(CSI)。

2.1 美国 WSR-88D Build 7.0 风暴系列算法 (B7SI)

B7SI风暴识别算法分为风暴段识别和风暴质心提取。表1给出了风暴段识别参数,从径向始端开始搜索,当某点的反射率因子超过一定阈值(T_Z),将其归于一组,并继续处理,直到反射率因子小于该阈值 T_Z ;若该点反射率因子仍大于或等于淘汰反射率因子阈值(T_{DZ}),且这样点的连续个数小于淘汰反射率因子数目(N_{DZ}),将它们也归于该组,直到点数大于 N_{DZ} 或者反射率因子小于 T_{DZ} ,结束搜索并创建风暴段,如果风暴段长度大于长度阈值(L_S),则保存这个风暴段(图1中A部分)。随后,进行风暴质心的提取识别参数(表2):先根据水平相关性将同一仰角上的风暴段组合成为风暴分量,由相邻方位阈值(T_{AZI})和重叠距离库阈值(T_{BIN})来确定(图1中B部分);其次根据垂直相关性将不同仰角上的分量组合成一个单体(图1中C部分)。在一个体扫描中,允许识别出的单体不能超过最多风暴阈值(N_{STORM})。

表1 B7SI算法中风暴段的识别参数

Table 1 Operational parameters of storm segment in the B7SI algorithm

序号	参数	意义(单位)	缺省
1	淘汰反射率因子数目(N_{DZ})	识别风暴段时,允许小于反射率因子识别阈值但大于淘汰反射率因子阈值的连续库点的最大数目(个)	2
2	淘汰反射率因子阈值(T_{DZ})	识别风暴段时,若某点反射率因子小于该值,结束处理(dBz)	25
3	反射率因子阈值(T_Z)	处理风暴段时的反射率因子识别阈值(dBz)	30
4	风暴段长度阈值(L_S)	组成一个风暴段的最小长度(km)	4.2

表2 B7SI算法中风暴质心的识别参数

Table 2 Operational parameters of storm centroid in the B7SI algorithm

序号	参数	意义(单位)	缺省
1	相邻方位阈值(T_{AZI})	定义一个风暴分量两相邻风暴段之间的最大方位间距(°)	1
2	重叠距离库阈值(T_{BIN})	组合分量时两相邻风暴段在径向上重叠的最少距离库数(个)	2
3	最多风暴阈值(N_{STORM})	一个体扫描内最多可被定义的风暴数目(个)	20

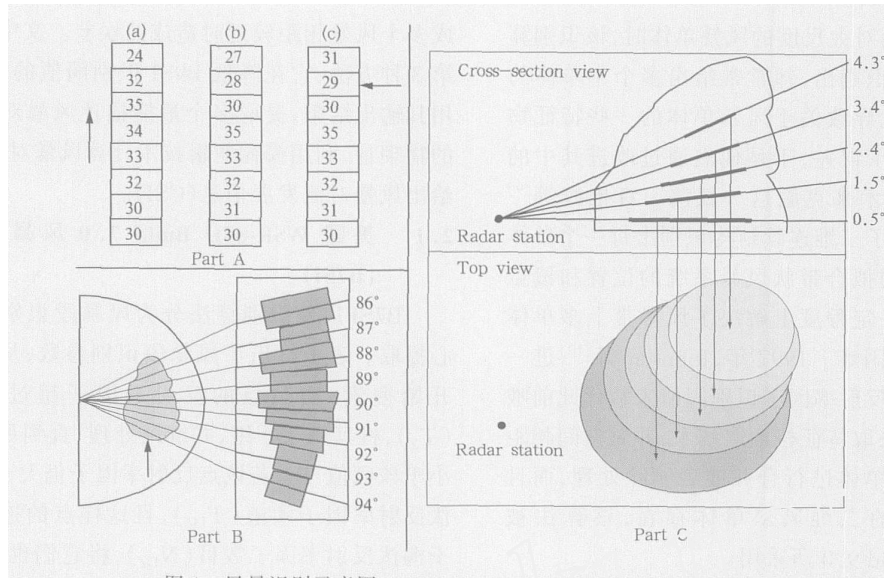


图 1 风暴识别示意图(A, 风暴段处理; B, 组合风暴分量; C, 组合风暴体)

Fig. 1 A general schematic for storm identification (Part A, identifying storm segments; Part B, defining a storm component; Part C, constituting a storm cell)

2.2 美国 WSR-88D Build 9.0 风暴系列算法 (B9SI)

B7SI 在处理成串或成簇排列多单体时面临许多困难,为了解决这个问题, B9SI 采用了一些新技术:多反射率因子阈值识别技术、特征核抽取技术、对垂直重叠单体处理、远距离 2D 风暴单体的识别和相近多单体处理(增加的参数见表 3)。

(1) 多阈值识别: B9SI 使用 7 个反射率因子阈值 (Z_{1-7}), 对于成串或成簇排列的风暴群, B7SI 只识别出一个大单体, B9SI 可以分辨出多个单体核, 并准确定位。在识别时, 沿用前面方法利用 7 个阈值重复处理, 并对风暴段和风暴分量按识别阈值分类保存并允许重叠(图 2)。

(2) 特征核抽取: 当同一层内有多风暴分量重叠时, 只保留最大反射率因子识别的分量。

(3) 2D 单体识别和相近单体处理: 首先允许远距离存在 2D 风暴, 即考虑到雷达测距限制, 超过一定距离阈值 (R_{LONG}) 的 2D 分量虽无与其垂直相关的分量, 但仍可能是强风暴的一部分, 予以保存; 其次, 将垂直方向上相距较近、水平投影重叠的上、下两单体进行合并; 最后, 多个距离相近的风暴常造成视觉拥挤并产生追踪误差, 故作如下处理: 若两单体质心相距小于距离阈值 (R_{DELETE}), 且两者厚度之差超过一定阈值 (D_{DELETE}), 则删去弱单体。

表 3 B9SI 算法中增加的风暴识别参数

Table 3 Operational parameters added in the B9SI

序号	参数	意义(单位、缺省值)
1	Z_{1-7}	7 个反射率因子识别阈值(dBz) 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60
2	R_{LONG}	远距离上允许二维风暴单体的存在(km) 175
3	R_{DELETE}	处理相近两单体的质心水平距离阈值(km) 5.0
4	D_{DELETE}	处理相近两单体的厚度差阈值(km) 4.0

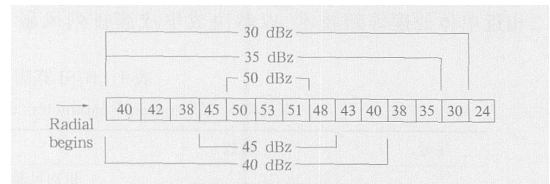


图 2 用 30, 35, 40, 45, 50 dBz 识别出的不同长度的风暴段

Fig. 2 Storm segments of different lengths identified using thresholds of 30, 35, 40, 45, and 50 dBz, respectively, along a radial

2.3 新的计算对流性强度的风暴识别方法(CSI)

B9SI 与 B7SI 相比可以更好地处理那些紧密连接的多个风暴。但是, 它们都只考察反射率因子的强度和空间连续性, 没有计算纹理结构和梯度, 而且没有利用多普勒径向速度信息, 因此对于识别出的风暴不能够给出其内对流发展的程度, 常导致遗漏了反射率因子强度较弱的、但对流活跃的单体。为了解决这个问题, 本文在调整 B9SI 识别阈值的基础

上,建立一个对流指数(I_c),以衡量风暴的对流性强弱。流程图如下:

具体计算时:首先将 B9SI 的 7 个反射率因子识别阈值降低一个等级(25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 dBZ),以识别出更多单体;其次从风暴三维结构形态学角度出发,提取一组最能描述对流性特征的

物理因子并分配权重;最后,利用模糊逻辑技术计算单体与每个因子所描述的对流性特征相匹配的程度(也就是一组介于[0, 1]之间的概率值),进行加权平均获取 I_c (图 3)。对流指数可以反映风暴瞬时的对流发展状况。

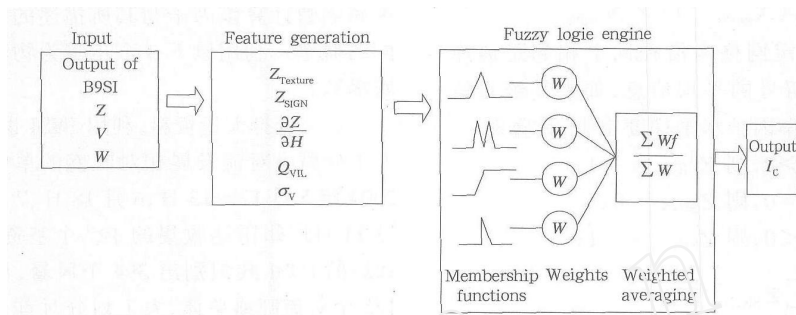


图 3 CSI 算法流程图(包括输入资料,计算特征,模糊逻辑技术处理,输出结果)

Fig. 3 Flow chart for the CSI algorithm

(Steps of processing include: inputting the radar base data and the output of the B9SI, generating the features derived from the base data fields, using a fuzzy logic engine to determine the initial interest output, and finally outputting the convection index)

2.3.1 特征量的提取

对流单体一般表现出结构紧密,边界清晰,强度较强,体内垂直运动明显,核区较厚,反射率因子水平梯度较大等特征。许多专家在利用雷达基资料提取回波对流性特征这一领域做了大量的研究工作。1995 年 Steiner 等^[11]运用 BET 技术处理二维反射率因子资料,以分离对流云和层状云降水,如果格点上的反射率因子超过 40 dBZ 或者大于选定区域内的非零反射率平均值,则认为该格点是对流性回波,并分配一个影响半径。2000 年 Biggerstaff^[12]充分考虑了反射率因子三维结构特征,利用 3 个特征量对这一方法做了改进:首先选择垂直方向上最大反射率因子上方的 3 km 厚度层,计算该层内反射率因子垂直递减率,统计结果表明对流云在这一层内的递减率约为 2.0 dBZ/km;其次计算了 BBF 以衡量零度层亮带的影响程度;最后,获取反射率因子水平梯度。上述两种方法主要着眼于反射率因子空间梯度,没有考虑垂直运动以及液态水含量。2002 年 Seo 等^[13]为 WSR-88D 设计的 CSSA (Convective/Stratiform Separation Algorithm) 算法中,使用了垂直方向上的最大反射率因子、该最大值的空间分布、

回波核顶的位置分布以及垂直积分液态含水量来划分对流云和层状云降水。另外,2002 年由 Kessinger 等^[14]设计的 WSR-88D 回波分类器在识别降水回波、奇异回波、昆虫晴空回波和海浪杂波时,使用了包括反射率因子水平梯度和纹理结构等物理量,对分离与降水回波混合在一起的奇异回波非常有效。近年来,中国一些学者也利用新一代雷达资料和数值模式探讨了风暴的对流性特征^[15]和云微物理参数^[16]等,并与临近预报业务相结合,以提高预报准确率^[17]。

本文在借鉴上述研究成果的基础上,综合考虑对流云特征,提取反射率因子纹理结构(Z_{Texture})、反射率因子水平梯度信息(Z_{SIGN})、反射率因子垂直梯度($\frac{\partial Z}{\partial H}$)、垂直积分液态含水量(Q_{VIL})和径向速度标准方差(v),并分配了权重,以度量风暴单体的瞬时的对流性强弱(表 4)。

表 4 模糊逻辑器中用到的特征量及权重系数

Table 4 Characteristic quantities and their weight coefficients used in the fuzzy logic engine

特征量	Z_{Texture}	Z_{SIGN}	$\frac{\partial Z}{\partial H}$	Q_{VIL}	v
权重系数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

反射率因子纹理结构 (Z_{Texture}) 表示选定网格内沿径向上的相邻距离库的反射率因子均方差,用下式计算 (N_{beams} 和 N_{gates} 分别表示选定网格的径向束和库点的数目):

$$Z_{\text{Texture}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{beams}}} \sum_{i=2}^{N_{\text{gates}}} (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})^2}{(N_{\text{gates}} - 1) \times N_{\text{beams}}} \quad (1)$$

Z_{SIGN} 计算了选定网格内沿径向上相邻距离库的反射率因子差的符号的平均信息,如果其绝对值接近于 1,表示反射率因子水平梯度很大,计算时:

若 $(Z_{i+1} - Z_i) > 0$, 则 $Z_{\text{SIGN}i} = +1$;

若 $(Z_{i+1} - Z_i) = 0$, 则 $Z_{\text{SIGN}i} = 0$;

若 $(Z_{i+1} - Z_i) < 0$, 则 $Z_{\text{SIGN}i} = -1$;

$$Z_{\text{SIGN}} = \left| \sum_{i=1}^N Z_{\text{SIGN}i} / N \right| \quad (2)$$

鉴于强风暴拥有较厚的反射率因子核区,在垂直方向上核区内的反射率变化较小,因此文中计算了反射率垂直递减率 ($\frac{\partial Z}{\partial H}$)。由于风暴在不同生命阶段,其核区的高度和强度是变化的,为此选择在单体内最大反射率因子上方 3 km 的厚度层内进行计算,而不是一个固定的高度层。具体计算时,首先确定最大反射率因子 P_0 点的位置并利用雷达测高公式计算高度 H_0 ;其次取 P_0 点上方紧邻的第 1 层和第 2 层,计算相应的 P_1 和 P_2 所对应高度 H_1 和 H_2 ;最后,若 $H_2 - H_0 \geq 3 \text{ km}$, $\frac{\partial Z}{\partial H} = -(Z_2 - Z_0) / (H_2 - H_1)$, 否则, $\frac{\partial Z}{\partial H} = -(Z_1 - Z_0) / (H_1 - H_0)$ 。

垂直积分液态含水量 (Q_{VIL}) 是在假设反射率因子均由液态水造成的前提下,利用雨滴谱理论和 $Z-R$ 经验关系,对各层反射率因子垂直积分而得来的,该参数有助于区分强雷暴和一般风暴,文中选用了风暴单体内的最大 Q_{VIL} 值。

文中还计算了径向速度的标准方差 (v):

$$v = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{beams}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{gates}}} (V_{i,j} - \bar{V})^2}{N_{\text{gates}} \times N_{\text{beams}}} \quad (3)$$

式中 $V_{i,j}$ 为网格点上的径向速度, \bar{V} 为网格内径向速度的平均值。

在系统输入雷达基资料之后,计算上面的 5 个特征量,其中 Z_{Texture} , Z_{SIGN} 和 v 的计算是在 0.5° PPI 中的选定网格内进行,该网格为雷达极坐标中

4 km × 4 的区域,中心为风暴体内最大反射率因子在 0.5° PPI 上的投影。

2.3.2 模糊逻辑技术

当完成了所有物理因子的计算后,将它们输入到模糊逻辑器中,以获取对流指数。在该模糊逻辑器中,根据每一个物理因子描述的对流性特征,利用隶属函数计算该因子与其所描述的对流性特征相匹配的概率。利用以下 3 个步骤为物理因子设计出隶属函数:

(1) 选择大量资料,利用 B9SI 识别风暴,并从中人工分离出对流发展相对旺盛的单体。文中选用了 2004 年 5 月 12—13 日、6 月 18 日、7 月 21—22 日和 8 月 11 日广州雷达收集的 127 个基资料,利用调整参数后的 B9SI 共识别出 394 个风暴,从中人工分离出 125 个对流旺盛单体,人工划分时首先选择造成灾害性天气的风暴,如出现直径超过 2 cm 的冰雹、超过 25 m/s 的大风、龙卷、或 1 h 降水量达到 20 mm;其次选择这些风暴对流旺盛的时刻,如最大反射率因子超过 60 dBz,最大垂直积分含水量超过 40 kg/m²,或者同时刻出现了与该风暴相对应的中尺度气旋、逆风区、近地层辐散等多普勒特征。

(2) 分别对 394 个风暴和 125 个对流旺盛风暴计算每一个物理因子,其分布情况见图 4。

(3) 根据特征量分布图,寻找所有风暴和对流旺盛风暴之间的差异。例如,风暴处于成熟阶段时,其典型特征之一是核区内反射率因子垂直递减率接近于零,因此适当的隶属函数将 0 垂直递减率对应于最大程度的匹配 1,而当递减率远大于 0 时(如 4.5),则隶属函数输出 0。确定隶属函数输出的 0 概率所对应的物理因子值依赖于该物理量的分布图。与此类似,对于所有风暴, Z_{SIGN} 分布较广,这是由于这些风暴可能处于其发展的各个阶段,对流性强弱变化较大。但分析对流较强的风暴时,发现 Z_{SIGN} 取值具有明显的倾向性:不存在 $Z_{\text{SIGN}} < 0.15$ 的单体, $Z_{\text{SIGN}} > 0.4$ 的单体占总数的 92.8%,而在所有 394 个单体中, $Z_{\text{SIGN}} > 0.8$ 的有 18 个,其中 17 个被认为对流旺盛。分析说明, Z_{SIGN} 特征量可以较好的表征风暴的对流性强弱,对流较强的风暴拥有较大的 Z_{SIGN} 值。根据其分布,设计出隶属函数: $Z_{\text{SIGN}} > 0.8$ 的风暴几乎都被认为对流旺盛,因此在隶属函数中,将超过 0.8 的 Z_{SIGN} 值对应于最大匹配 1;不存在 Z_{SIGN} 值小于 0.15 的风暴,此时隶属函数输出

0;绝大多数风暴(92.8%)的 Z_{SIGN} 超过了0.4,隶属函数将其确定为0.5。其他物理因子的隶属函数也

采取类似的方法进行设计。下面给出了物理因子的数学表达式和隶属函数分布(图5)。

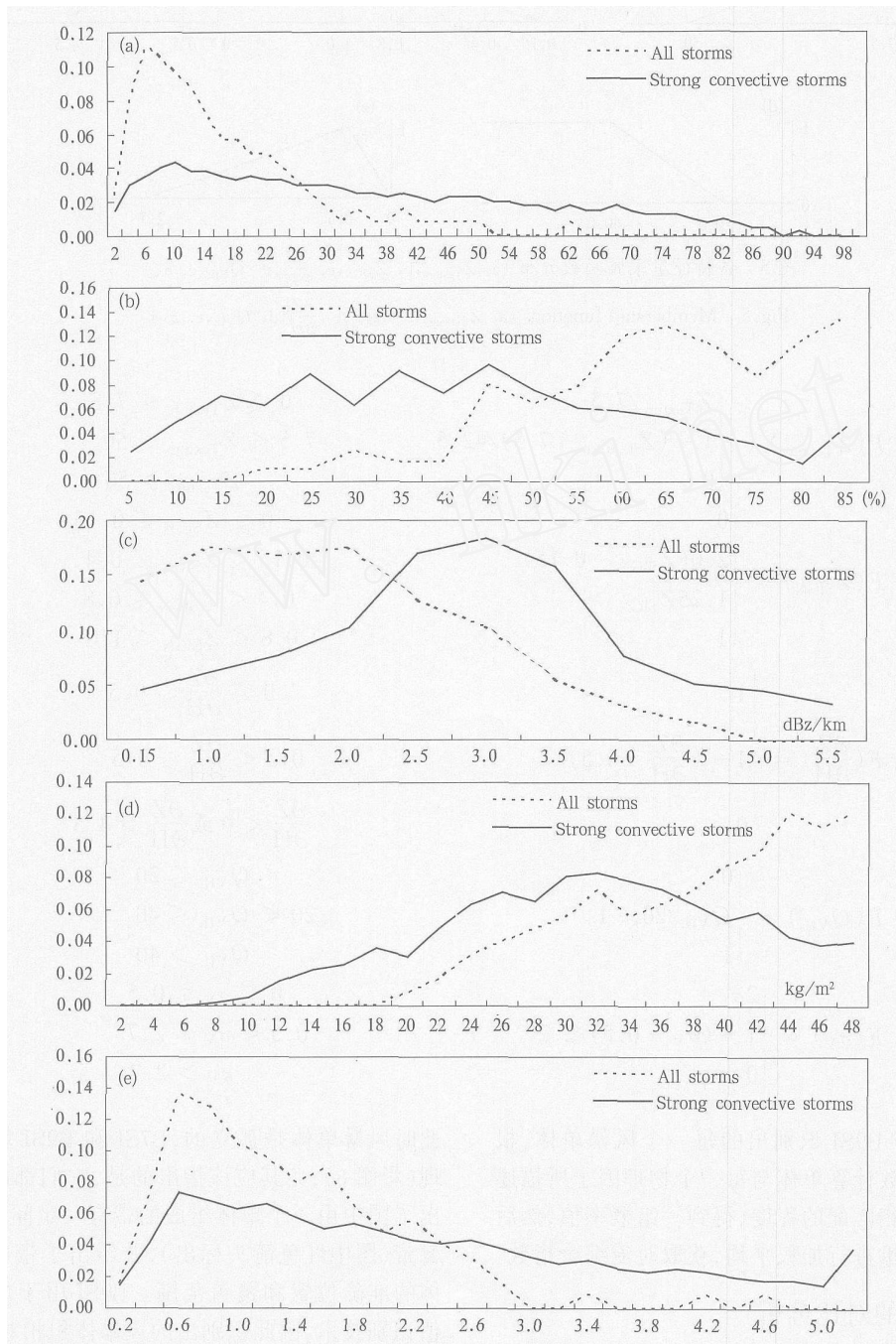


图 4 所有风暴和对流旺盛风暴各特征量的分布

(a. $Z_{Texture}$, b. Z_{SIGN} , c. $\frac{\partial Z}{\partial H}$, d. Q_{VIL} , e. v)

Fig. 4 (a) $Z_{Texture}$, (b) Z_{SIGN} , (c) $\frac{\partial Z}{\partial H}$, (d) Q_{VIL} , and (e) v patterns for all storms (solid line) and vigorously convective storms (dotted line)

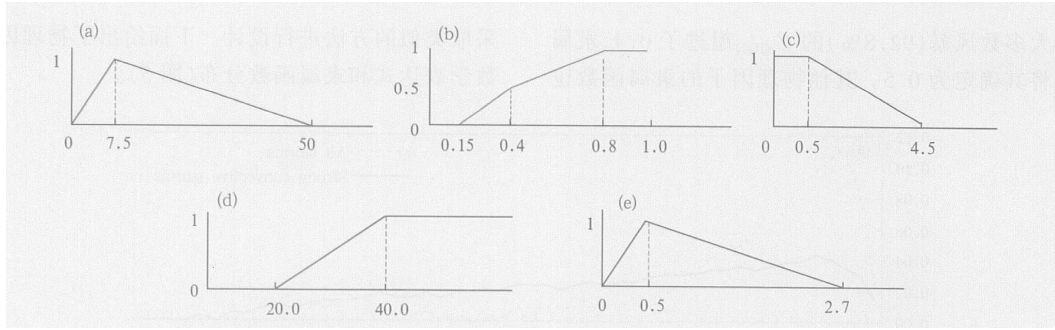


图 5 各特征量隶属函数分布 (a. $Z_{Texture}$, b. Z_{SIGN} , c. $\frac{\partial Z}{\partial H}$, d. Q_{VIL} , e. v)

Fig. 5 Membership functions (a. $Z_{Texture}$, b. Z_{SIGN} , c. $\frac{\partial Z}{\partial H}$, d. Q_{VIL} , e. v)

$$F(Z_{Texture}) = \begin{cases} Z_{Texture}/7.5 & 0 \leq Z_{Texture} \leq 7.5 \\ 1 - (Z_{Texture} - 7.5)/42.5 & 7.5 < Z_{Texture} \leq 50 \\ 0 & Z_{Texture} > 50 \end{cases} \quad (4)$$

$$F(Z_{SIGN}) = \begin{cases} 0 & Z_{SIGN} \leq 0.15 \\ 2.0(Z_{SIGN} - 0.15) & 0.15 < Z_{SIGN} \leq 0.4 \\ 1.25 Z_{SIGN} & 0.4 < Z_{SIGN} \leq 0.8 \\ 1 & 0.8 < Z_{SIGN} \leq 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

$$F\left(\frac{\partial Z}{\partial H}\right) = \begin{cases} 1 & \frac{\partial Z}{\partial H} \leq 0.5 \\ 1 - \left(\frac{\partial Z}{\partial H} - 0.5\right)/4 & 0.5 < \frac{\partial Z}{\partial H} \leq 4.5 \\ 0 & \frac{\partial Z}{\partial H} < 0 \text{ 或 } \frac{\partial Z}{\partial H} > 4.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$F(Q_{VIL}) = \begin{cases} 0 & Q_{VIL} \leq 20 \\ Q_{VIL}/20 - 1 & 20 < Q_{VIL} \leq 40 \\ 1 & Q_{VIL} > 40 \end{cases} \quad (7)$$

$$F(v) = \begin{cases} 2v & 0 \leq v \leq 0.5 \\ 1 - (v - 0.5)/2.2 & 0.5 < v \leq 2.7 \\ 0 & v > 2.7 \end{cases} \quad (8)$$

随后,对于 B9SI 识别出的每一个风暴单体,根据上述隶属函数计算单体与每一个物理因子所描述的对流性特征相匹配的程度,得到一组概率值,然后利用给定的权重进行加权平均,获取对流综合指数。

3 3 种方法的对比分析

2004 年 8 月 11 日广东强对流过程由多个风暴的形成、发展、成熟和消亡所组成,期间出现了合并和分裂,还包含了单体之间复杂的相互作用,因此能够较为全面地检验上述 3 种方法的综合表现。

3.1 B7SI 和 B9SI 的比较

选取 2004 年 8 月 11 日 13:15 广州雷达资料,

此时风暴单体是孤立的, B7SI 和 B9SI 均有良好表现(彩图 6),尤其应该指出的是,它们都准确的识别出了图中由 4 个单体组成的带有一定间隔的弓形风暴带(图中红色箭头标出),并给出了带中每一个单体的准确位置和覆盖范围。B9SI 由于使用了多阈值识别技术,因此识别出的风暴体积相对较小。

离散多单体经过一段时间的发展、移动、合并、分裂后,许多单体相距很近,成团成簇排列,彩图 7 给出 14:51 B7SI 和 B9SI 的识别结果。首先,对于成簇排列的单体(黄色箭头标明),由于其核区外围的较弱回波已经连成一片,致使 B7SI 只能识别为一个大单体,而 B9SI 依靠多阈值和核抽取技术则可

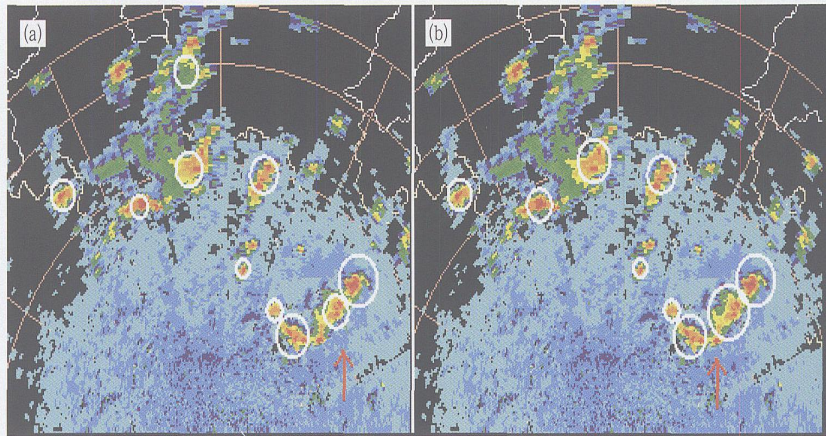


图6 13:15 B9SI(a)和B7SI(b)识别结果

Fig.6 The outputs of the B9SI (a) and the B7SI (b) at 13:15

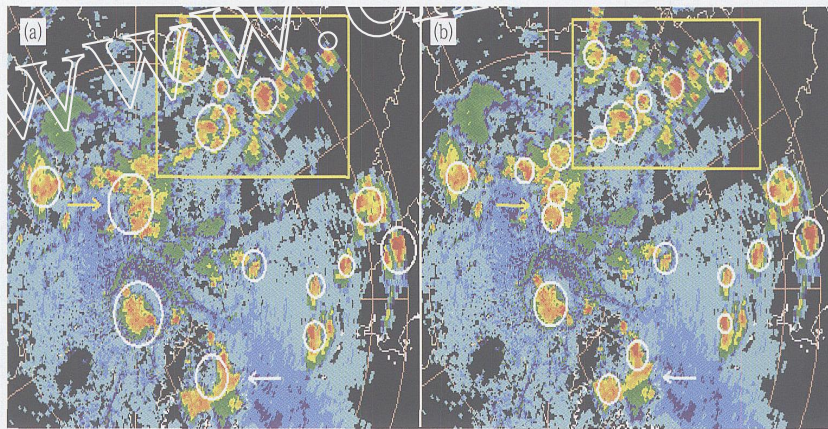


图7 14:51 B7SI(a)和B9SI(b)识别结果

Fig.7 The outputs of the B9SI (a) and the B7SI (b) at 14:51

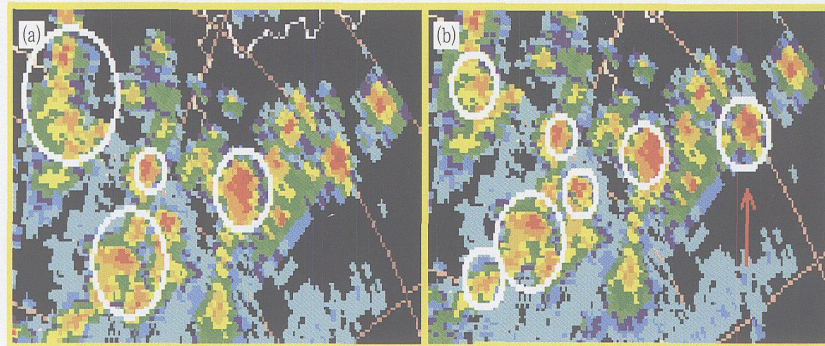


图8 B7SI(a)和B9SI(b)在图7黄色方框内识别结果的放大

Fig.8 Magnifying the yellow rectangle in Fig.7

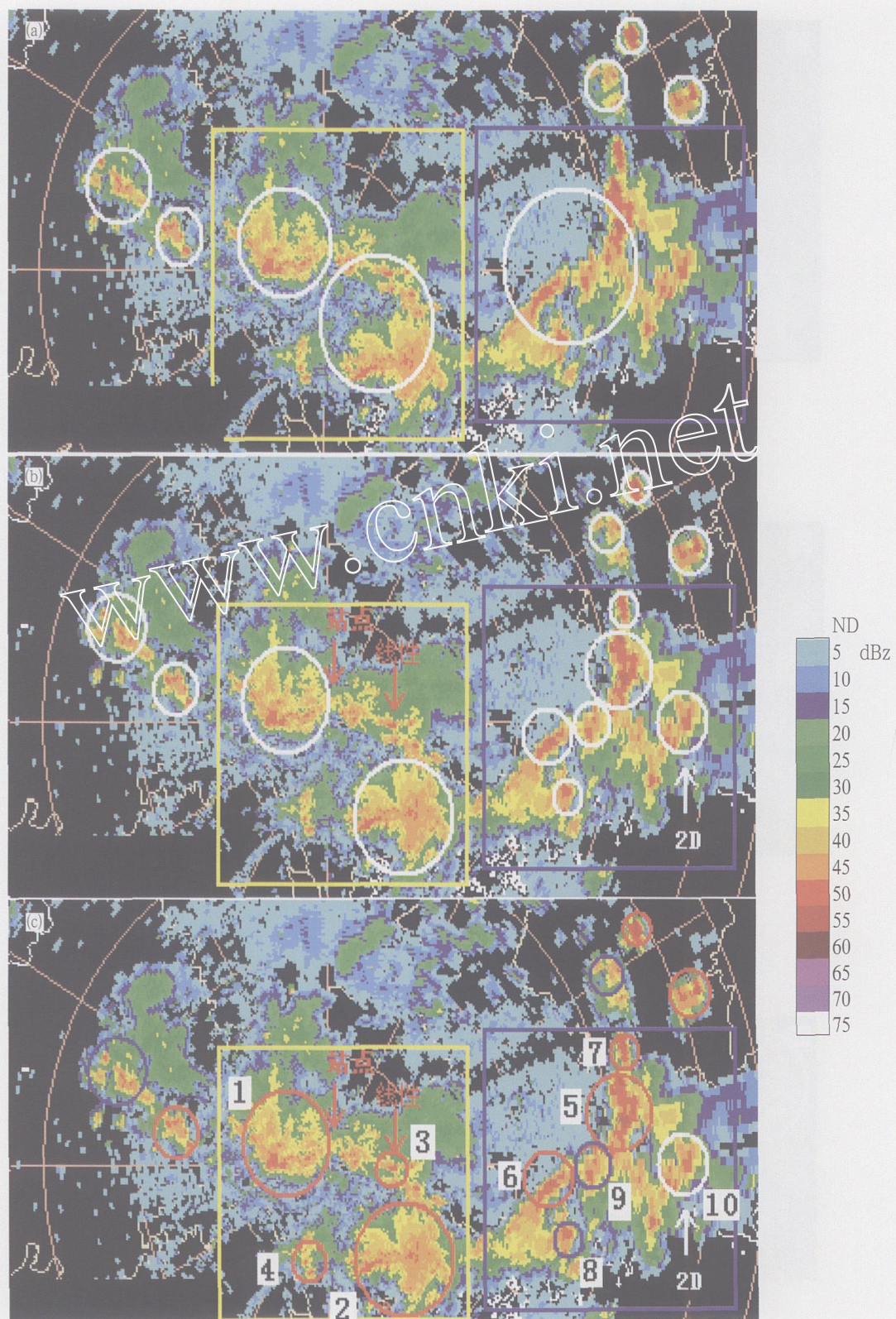


图9 16:09 (北京时) B7SI(a), B9SI(b)和CSI(c)识别结果
 Fig.9 The outputs of B7SI(a), B9SI(b) and CSI(c) at 16:09

以清楚的分辨出各个单体核。其次,在出现单体分裂时(见图中白色箭头所示),B9SI 准确给出了因分裂而形成的 2 个新单体的位置和范围,但 B7SI 依然认为这是一个单体,没有及时给出分裂信息。最后,图中黄色方框选定了一个由多单体成串排列的区域,彩图 8 给出了 B7SI 和 B9SI 在黄色方框区域内的识别结果:B9SI 能够分辨出成串排列的各个风暴,而 B7SI 无法作细致区分,这再次表明 B9SI 在处理相近多单体时具有明显优势;另外,B9SI 识别出的最右端的那个风暴单体(红色箭头指示)却无法被 B7SI 识别,通过检查基资料发现,两种方法在 0.5° PPI 上均识别出了这个二维风暴分量,但其上相邻 PPI 内没有分量与其相关,因此 B7SI 认为其不能组合为单体而丢弃,B9SI 作进一步的强度和距离检验后认为它属于远距离上的二维风暴予以保存。

3.2 B7SI, B9SI 和 CSI 识别结果对比

16:09,回波整体呈现出东西向的弓状特征,中间有空隙。将回波主体分为东、西两个部分,在图中对应为蓝色和黄色方框区域,彩图 9 分别给出 B7SI, B9SI 和 CSI 的识别结果(单体 1 严重影响了广州)。分析这 3 种方法在黄色方框内的识别效果, B7SI 和 B9SI 都只识别出 2 个孤立的单体,没有给出带状回波的整体框架;这是由于在识别风暴段时是从径向上的第 1 个距离库开始,黄色方框内的风暴带恰巧经过雷达站(红色箭头所指),于是算法就将该风暴带一分为二。CSI 算法虽然也没有给出带状特征,但由于降低了识别阈值,多识别出了两个风暴(风暴 3 和 4)。B9SI 不能识别风暴 3 和 4 原因在

于:强反射率因子核区呈较窄的线性排列,风暴 3 走向与所在径向近似平行,使得 B9SI 不能在多个径向上识别出风暴段,风暴 4 与径向有一定的夹角,但径向上被识别出的风暴段长度不够。由于线性强回波核区周围的反射率因子超过了 25 dBz,因此,当 CSI 将识别阈值降低到 25 dBz 时,就能够识别出风暴 3 和 4。表 5 给出了 CSI 方法计算出的每个风暴的对流指数和特征量,从对流发展的角度排列,风暴 2 和 4 应该优先关注,这是 B9SI 不能够给出的信息。风暴 4 与风暴 1 相比体积较小、强度也弱,但 CSI 方法考虑到其核区较厚(在 6.0° PPI 上,反射率因子仍然达到 45 dBz)、 Q_{vIL} 较大,因此给出的对流指数相对较大。随后观测资料表明,风暴 2 和 4 在进一步发展之后合并,形成另外一个强风暴,它严重影响的区域是东莞和深圳,而原先影响广州的单体 1 则在 16:09 很快减弱消亡。在蓝色方框内,B7SI 由于没有采用多反射率因子识别技术和核抽取技术,只能将图中的弓状回波识别为一个单体,且当其用圆来表示弓状回波的位置时,出现了明显的偏差。B9SI 和 CSI 的识别结果相似,下面计算了 CSI 识别出的风暴单体的对流指数,风暴 5 位于弓状回波顶端,发展最为充分,所以对流指数最大,表 6 给出了各单体的特征量和相应的对流指数,并按照对流指数的大小进行排列,风暴 5, 6, 7 的对流指数超过了 0.5,应重点关注。为了较为直观的给出每一个风暴的对流性强弱,在图中将对流指数大于或等于 0.5 的风暴用红色圆圈标明,小于 0.5 的则用蓝色,而无法计算对流指数的风暴仍然保留白色圆圈。

表 5 黄色框内 4 个风暴对应的特征量以及对流指数

Table 5 The features and the convection indices for four storms in the yellow rectangle

风暴序号	$Z_{Texture}$	Z_{SIGN}	$\frac{\partial Z}{\partial H}$	Q_{vIL}	v	I_c
1	3.81	0.40	3.38	32.5	1.35	0.505
2	5.55	0.59	2.14	27.8	2.02	0.554
3	8.05	0.40	2.20	23.6	2.01	0.511
4	13.31	0.28	2.57	36.4	2.15	0.535

表 6 蓝色框内 6 个风暴对应的特征量以及对流指数

Table 6 The features and the convection indices for six storms in the blue rectangle

风暴序号	$Z_{Texture}$	Z_{SIGN}	$\frac{\partial Z}{\partial H}$	Q_{vIL}	v	I_c
5	14.68	0.65	0.73	43.7	模糊 ⁽¹⁾	0.898
6	25.48	0.66	1.81	36.4	1.16	0.718
7	29.16	0.38	1.79	33.2	模糊	0.572
8	3.97	0.40	3.42	31.6	1.83	0.455
9	5.51	0.08	5.52	18.7	2.70	0.147
10	11.69	0.32	2D ⁽²⁾	22.5	模糊	无 ⁽³⁾

注:(1)多普勒径向速度模糊,导致 v 无法计算;(2)为远距离的 2D 单体, $\frac{\partial Z}{\partial H}$ 无法计算;(3)如果有两个或以上的特征量不能给出时,不对风暴做对流性检验

选择上述 10 个风暴中物理量计算完整的风暴 1, 2, 3, 4, 6 和 8 (风暴 9 因 I_C 值太小不予考虑, 序号与表 5 和 6 中保持一致), 设计以下 5 种试验方案, 对其物理参数做敏感性试验。

试验 A: 不计 Z_{Texture} , 讨论 Z_{SIGN} , $\frac{\partial Z}{\partial H}$, Q_{VIL} 和 v 对 I_C 的贡献;

试验 B: 不计 Z_{SIGN} , 讨论 Z_{Texture} , $\frac{\partial Z}{\partial H}$, Q_{VIL} 和 v 对 I_C 的贡献;

试验 C: 不计 $\frac{\partial Z}{\partial H}$, 讨论 Z_{Texture} , Z_{SIGN} , Q_{VIL} 和 v 对 I_C 的贡献;

试验 D: 不计 Q_{VIL} , 讨论 Z_{Texture} , Z_{SIGN} , $\frac{\partial Z}{\partial H}$ 和 v 对 I_C 的贡献;

试验 E: 不计 v , 讨论 Z_{Texture} , Z_{SIGN} , $\frac{\partial Z}{\partial H}$ 和 Q_{VIL} 对 I_C 的贡献。

试验结果如表 7。在试验 A 中, 除风暴 6 外, 其结果与原来 I_C 相比均偏小, 表明在利用模糊逻辑技术计算风暴对流指数时 Z_{Texture} 起到增强作用。试验 B 和试验 C 与原来 I_C 比其均方根误差最小, 即 Z_{SIGN} 和 $\frac{\partial Z}{\partial H}$ 最为稳定, 这是由于对流旺盛单体经过充分发展之后, 都具有较厚的强反射率因子核区, 其反射率垂直递减率较小, 而水平梯度却较大。试验 E 结果与原来 I_C 比波动很大, 其原因可能是, 风暴内最底层径向速度既可能代表了辐合入流也可能为辐散出流, 其标准方差变化较大。

表 7 敏感性试验给出的风暴对流指数

Table 7 The convection indices of the several sensitive experiments

风暴序号	原来 I_C	试验 A	试验 B	试验 C	试验 D	试验 E
1	0.505	0.505	0.507	0.562	0.476	0.478
2	0.554	0.507	0.507	0.544	0.594	0.614
3	0.511	0.392	0.514	0.495	0.574	0.561
4	0.535	0.453	0.604	0.548	0.464	0.607
6	0.718	0.754	0.692	0.731	0.694	0.724
8	0.455	0.436	0.444	0.501	0.424	0.470

3.3 超级单体演变过程中的对流指数变化分析

最后, 这次强对流过程中, 有一个南下风暴经过两次增长 (合并增长和与广州局地消亡单体低层辐散气流相互作用产生的强烈辐合增长) 形成为超级单体 (对应图 9 中的单体 1), 严重影响广州。文中计算了这个超级单体从形成到消亡整个过程中的对流指数 (14:15—16:27, 间隔 6 min, 见图 10)。对流指数在 14:15—14:45 和 15:09—15:27 内有明显的

增长, 这与利用多普勒雷达资料分析出的两次增长过程相对应。在 15:21, 对流指数最大, 为 0.744, 说明此时风暴对流最为强盛。之后, 对流指数减小, 风暴开始减弱, 雷达观测到的最大反射率因子对应高度明显降低, 表示风暴内下沉气流占据主导地位, 而且在这一时段内地面自动站记录到的强降水最集中。至 16:09, 风暴减弱明显。

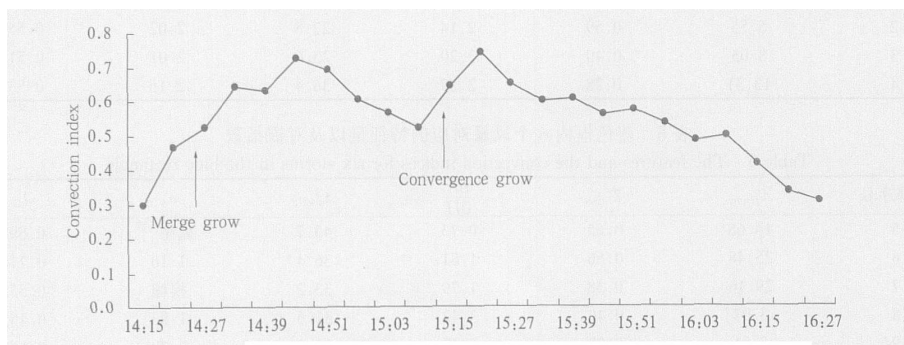


图 10 超级单体演变过程中的对流指数变化

Fig. 10 Temporal variations of the convection index of a supercell occurred in Guangzhou on August 11th, 2004, during its evolution

4 小 结

B7SI认为风暴具有三维结构,识别时利用多个阈值检验其强度和连续性;B9SI在此基础上,增加了多阈值、核抽取、以及相近单体处理等多项技术,以解决成簇、成串排列的风暴或多个风暴相距较近时造成的误差;文中设计的CSI在降低B9SI识别阈值的前提下,利用其输出结果和雷达基资料,提取多个描述风暴对流性特征的物理量,采用模糊逻辑技术计算风暴对流指数,以描述风暴对流发展的强弱。

个例分析表明,面对离散单体时,B7SI和B9SI均表现良好。当多单体相互靠近或成簇成串排列时,B9SI表现很好,它能够清晰的分辨出每一个单体核,并准确定位,而B7SI只能将这一回波区域处理成为一个大单体。对于带状风暴,在大多数情况下,B9SI可以识别出该带上的每一个核,并给出风暴群呈带状分布的整体特征;而B7SI仍将其处理为一个单体,并在定位时会出现明显误差。B9SI还对远距离上识别出的2D风暴做强度和距离检验。

CSI降低了识别阈值,能够识别出更多的风暴单体,利用模糊逻辑技术对提取的多个特征量进行处理,获取对流指数;依据 I_C 的大小和时间变化,能够提醒业务人员关注对流发展旺盛的风暴。计算影响广州的超级单体演变过程中各个时刻的对流指数,分析表明, I_C 两次加大对应了超级单体的合并增长和辐合增长过程;风暴在15:21最为强盛,此时 I_C 最大为0.744;随后 I_C 减小,至16:09后 I_C 减小明显,而雷达观测到最大反射率因子高度明显降低,地面强降水也多集中在这一时段内。对流指数时间变化很好地给出了广州超级单体的对流发展过程。对于其他个例而言,CSI能否准确给出风暴对流发展的信息,还需要进一步的验证。另外,当 $\frac{\partial Z}{\partial H}$ 无法获取时,会影响模糊逻辑技术处理的效果。

参考文献

- [1] Rinehart R E. A pattern-recognition technique for use with convention weather radar to determine internal storm motion, recent progress in radar meteorology. *Atmospheric Tech*, 1981, 13: 119-134
- [2] Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 1978, 273:

287-289

- [3] 刘黎平,徐宝祥,王致君.利用矩心跟踪法跟踪、警戒强对流天气方法初探. *高原气象*,1991,10(3):317-324
Liu Liping, Xu Baoxiang, Wang Zhijun. A preliminary study of tracking and warning severe storms by the method of tracking echo centroids. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 1991, 10(3): 317-324
- [4] Austin G L, Bellon. Very short-range forecast of precipitation by the objective extrapolation of radar and satellite data. In: Broning K, Ed. *Nowcasting*. Academic Press, 1982. 177-190
- [5] Rosefeld D. Object method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar. *J Atmos Oceanic Tech*, 1987, 4: 422-434
- [6] Michael Dixon, Gerry Wiener. Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting. *J Atmos Oceanic Tech*, 1993, 10:785-797
- [7] Vance Mansur M. Examples of the strength and weakness of the WSR-88D storm tracking products. Preprints, 26th National Conventional Conference on Radar Meteorology, 1993. 144-147
- [8] Arthur Witt, Johnson J T. An enhanced storm cell identification and tracking algorithm. preprints, 26th National Conventional Conference on Radar Meteorology, 1993. 141-143
- [9] 肖艳姣,汤达章,李中华等.风暴的自动识别、跟踪与预报. *南京气象学院学报*,1998,21(2):223-229
Xiao Yanjiao, Tang Dazhang, Li Zhonghua, et al. Storm automatic identification, tracking and forecasting. *J Nanjing Institute of Meteor (in Chinese)*. 1998, 21(2):223-229
- [10] Johnson J T, Pamela L, Mackeen. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forec*, 1997, 13:263-276
- [11] Steiner M, Houze R A, Yuter S E. Climatological characterization of three dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J Appl Meteor*, 1995, 36:847-867
- [12] Biggerstaff M I, Listenna A. An improved scheme for Convective/Stratiform echo classification using radar reflectivity. *J Appl Meteor*, 2000, 39:2129-2150
- [13] Seo D J, Ding F, Fulton R. Final report interagency MOU among the NEXRAD program. The WSR-88D Radar Operation Center and the NWS Office of Hydrologic Development, Hydrology Laboratory, Office of Hydrologic Development, National Weather Service, Silver Spring, MD, 2002
- [14] Kessinger C. The radar echo classifier: a fuzzy logic algorithm for the WSR-88D. Preprints, 3rd Conf on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science, Amer Meteor Soc, 2003
- [15] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*,2004,62(3):317-328
Zheng Yuanyuan, Yu Xiaoding, Fang Chong, et al. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(3):317-328

- [16] 李永平,朱国富,薛纪善.应用雷达回波强度资料反演大气云微物理量.气象学报,2004,62(6):814-820
Li Yongping, Zhu Guofu, Xue Jishan. Microphysical retrieval from Doppler radar reflectivity using variational data assimilation. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2004, 62(6):814-820
- [17] 邱崇践,余金香.多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进.气象学报,2000,58(2):244-249
Qiu Chongjian, Yu Jinxiang. Use of Doppler radar in improving short-term prediction of mesoscale weather. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2000, 58(2):244-249

AUTOMATIC IDENTIFICATION OF STORM CELLS USING DOPPLER RADARS

Hu Sheng^{1,2} Gu Songshan¹ Zhuang Xudong² Luo Hui³

1 *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080*

3 *Shanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710015*

Abstract

Three storm automatic identification algorithms for Doppler radar are discussed. The WSR-88D Build 7.0 (B7SI) tests the intensity and continuity of the objective echoes by multiple-prescribed thresholds to build three-dimensional storms, and when storms are merging, splitting, or clustered closely, the detection errors become larger. The B9SI algorithm is part of the Build 9.0 Radar Products Generator of the WSR-88D system. It uses multiple thresholds of reflectivity, newly designs the techniques of cell nucleus extraction and close-storms processing, and therefore is capable of identifying embedded cells in multi-cellular storms. The strong area components at a long distance are saved as 2D storms. But, the B9SI can't give information on the convection strength of storm, because texture and gradient of reflectivity are not calculated and radial velocity data are not used. To overcome this limitation, the CSI algorithm is designed in this paper. By using the fuzzy logic technique, and under the condition that the levels of the seven reflectivity thresholds of B9SI are lowered, the CSI processes the radar base data and the output of B9SI to obtain the convection index of storm. Finally, the convection index is obtained from the weighted average of all the likelihood values. The CSI is verified with the case of a supercell occurred in Guangzhou on 11 August, 2004. The computational and analysis results show that the two rises of convection index match well with a merging growth and strong convergent growth of the supercell, and the index is 0.744 when the supercell is strongest, and then decreases. Correspondingly, the height of the maximum reflectivity, detected by the radar also reduces, and heavy rain also occurred in a large scale area.

Key words: Storm identification, Nucleus extraction, Fuzzy logic technique, Convection index.