

张家国,王珏,王平.一种暴雨回波识别算法研究[J].暴雨灾害,2010,29(1):44-48

一种暴雨回波识别算法研究

张家国,王珏,王平

(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘要:基于我国新一代多普勒天气雷达反射率因子资料,推导 β 中尺度暴雨回波最大降水量算法;利用该算法,开发暴雨回波客观定量识别产品,其实现步骤包括 β 中尺度回波系统的分割、跟踪和最大降水量计算等。选取湖北省江汉平原以东地区 4 次强降水过程,对武汉单站多普勒天气雷达暴雨识别结果进行暴雨、大暴雨和特大暴雨分级评估。评估结果表明,该产品对暴雨回波定量监测、预警有一定参考作用,暴雨、大暴雨、特大暴雨分级识别临界成功指数范围分别为 0.73~0.85、0.63~0.71、0.20~0.52。

关键词:多普勒雷达;暴雨回波;暴雨识别

中图分类号:P412.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2010)01-0044-05

1 引言

暴雨是一种中尺度现象,由于其时空尺度特征,天气雷达在暴雨监测、短临预警中起到重要作用。预报员从天气雷达观测图像上能否快速、准确地辨识暴雨回波是做好暴雨监测、短临预警的关键问题之一。我国新一代多普勒天气雷达在强风暴跟踪以及冰雹、龙卷灾害性天气识别方面具有较强能力^[1],但缺乏对暴雨回波的识别、跟踪产品。目前,暴雨(或强降水)回波的客观、定量识别尚属空白。产生暴雨的中尺度对流系统类型,有研究表明^[2-6],一是孤立风暴尺度的对流系统,二是由多个对流风暴组成的 β 中尺度对流系统,后者具有普遍性。在雷达反射率因子图像上,与孤立风暴尺度的暴雨回波不同, β 中尺度暴雨回波系统具有多尺度结构特征:若干分离的或连续的较小风暴尺度普通对流单体组成尺度较大的回波团或回波带,多个回波带、团再构成大的带状或涡旋状的回波结构等,较大的累积降水通常是由这些普通对流单体串或回波带簇共同产生的。因此,暴雨回波识别应重点关注 β 中尺度回波的基本特征,而不是某个孤立的普通单体。所以,诸如 WSR-88D 等对孤立的对流风暴的识别追踪方法不适应 β 中尺度暴雨回波的自动识别、追踪和预警,研究一个基于多普勒天气雷达、以 β 中尺度暴雨回波系统为目标的暴雨回波计算机自动识别方法十分必要。

大气环境气象条件和多普勒雷达反射率因子、速度等均可用于暴雨回波的识别。Doswell 等^[7]指出,雷达

反射率因子强度以及回波系统的尺度、移动和移动方向与回波带(团)长轴的夹角等是暴雨回波的几个重要特征,当回波强度较强、回波尺度较大、移动速度较慢且移动方向与回波带长轴夹角较小时,有利于连续性强降水产生。由于中尺度回波系统的生消变化,实际工作中考虑的因素要复杂得多。所以,基于多普勒天气雷达观测资料,识别暴雨回波有两条思路:一是根据 Doswell 总结的与持续性强降水相关的一些回波特征参数(也可包含垂直结构特征参数和大气环境物理量等)作为识别判据来建立强降水回波定性识别模型;另一种思路是利用雷达观测的低层降水回波瞬时分布、移动特征等,通过估计雷达回波的最大降水量,定量判断暴雨回波的存在。考虑到第一种思路仅适合于定性识别模型的建立,所以本文以 β 中尺度对流系统为对象,基于雷达观测的低层反射率因子,采用后一种思路研究暴雨回波定量识别算法。

2 最大降水量算法推导

为便于推导,图 1 给出一种带状 β 中尺度对流降水回波反射率因子水平结构示意图。

假设该回波系统影响其前方某一地方,影响时间为 $T \in [t_1, t_2]$,则未来该地累计降水量 P 为

$$P = \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \quad (1)$$

$R(t)$ 为 t 时刻回波系统经过该地时的降水强度,由雷达反射率因子 Z 经过 $Z-R$ 关系转换得到。显然,雷达观测到的某个对流回波系统能否在此产生大的累

收稿日期:2009-05-12;定稿日期:2009-12-25

基金项目:中国气象局新技术项目预报员专项(CMATG2006Y04)、武汉区域中心科技发展基金项目(QY-Z-200904)共同资助

作者简介:张家国,男,1964 年生,高级工程师,主要从事短时预报技术方法研究。E-mail: wuhamzhangjiagu@sohu.com

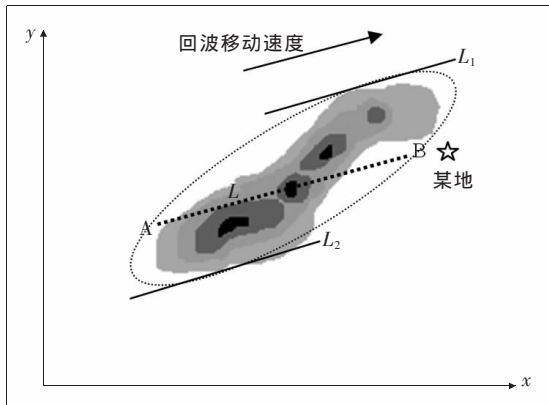


图 1 最大降水量算法推导示意图
 虚线椭圆为与回波面积等效的椭圆;箭头线为回波移矢;
 L 为任意的与移动速度平行的直线(虚线);
 A、B 为 L 与椭圆的交点;
 L₁、L₂ 是与移动速度平行且与椭圆相切的直线

计降水量,与回波强度、回波影响时间 T 有关。假设 T 时段内雷达所观测的中尺度对流系统的反射率因子回波状态稳定,即中尺度系统处于定常状态,则理论上通过该地的降水回波象元是确定的,这些象元应位于经过此地并与移动速度平行的一条直线 L 上(图 1 中虚线)。在雷达直角坐标系下,该直线方程为

$$y = x \tan \beta + \alpha \quad (2)$$

β 是直线和 x 轴的夹角, α 是截距。则 T 时段内直线上(A~B)所有降水回波象元经过该地的累计降水量为

$$P = \int_{t_1}^{t_2} R(x, x \tan \beta + \alpha) dt \quad (3)$$

若回波的移动速度为 C , 某地降水量 P 可通过时空转换($dt = dl/C$, dl 为直线上的线元)后求出。即

$$P = \frac{1}{C} \int_A^B R(x, x \tan \beta + \alpha) dl \quad (4)$$

其中 $dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$ (5)

$$R = 10^{(Z - 200)/1.6} \quad (6)$$

这里, $Z = 200R^{1.6}$ 。经时空转换后,累计降水量的计算将雨强对时间的积分转化为对空间线段的积分。显然,通过直线方程截距 a 的变化改变积分路径(A~B),如从截距为 α_1 的切线 L_1 扫描到截距为 α_2 的直线 L_2 ,可找出回波系统最大降水量 P_{\max} 。从式(4)也可看出,一个回波产生的降水量大小与回波反射率因子强度、移动速度及尺度有直接关系,这与 Doswell 暴雨回波特征定性分析基本一致。

3 识别步骤与算法

由式(4)可知, P 的计算涉及到中尺度回波系统范围、移动速度的确定等。因此,利用式(4)建立计算机暴

雨回波的自动识别程序时,需要对回波进行分割、跟踪;在此基础上,利用基本的数学方法完成式(4)运算。

3.1 β 中尺度回波系统分割

雷达观测到的对流单体风暴在水平方向上一般具有块状、椭圆形,反射率因子强度强、梯度大的特征。因此,从雷达反射率因子背景场中分割出强风暴比较容易,众多强风暴分离方法一般采用的是简单阈值分割法。然而,对于一个 β 中尺度回波系统,这种方法不适合。如上所述,一个 β 中尺度回波系统常有多个对流风暴组成,这些对流风暴或呈集中状态,或呈分离状态;另外, β 中尺度回波系统相对稳定而其中小风暴生消变化迅速。如何提取一个 β 中尺度回波系统,文献[8、9]用的是层级聚类方法。以梅雨锋等大范围降水为主要研究对象,本文采用平滑滤波和阈值分割相结合的方法也可取得较好效果。首先,选取 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的模板,对 0.5° 仰角雷达回波反射率因子场进行平均滑动滤波得到平均场;然后,用阈值法分离出 β 中尺度回波系统,得到分离的不同强降水回波目标。从滤波效果来看, $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 模板平滑滤波的平均反射率因子场(分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$)可代表 β 尺度回波系统平均状况。

3.2 β 中尺度回波系统跟踪

基于连续 2 个时次分割后的雷达回波图像,采用最大相关系数法跟踪雷达回波,求出每个 β 中尺度回波系统的移动速度。此方法与传统的 TREC 方法略有不同。传统的 TREC 方法是将雷达图像随意分成若干个矩形区域,对每个矩形区域求最大相关系数来实现回波的跟踪^[10]。本文以有任意多边形边界的雨团为区域划分,对每个雨团求最大相关系数实现雨团跟踪(或称 β TREC)。这里,假设 t_1 、 t_2 时刻两幅图像各有 m 、 n 块回波。为求得 t_2 时刻某块回波的移动速度,首先 t_2 时刻任一回波块均应与 t_1 时刻 m 块回波进行相关计算,然后再根据相关系数最大的两块回波确定回波移动速度。具体来,假设 t_2 时刻回波块 n 由 t_1 时刻回波块 m 移动而来,先将 t_2 时刻回波块 n 按反移动方向平移一定距离,与回波块 m 的质心重合,然后可方便进行两回波块相关计算。平移距离为两块回波的质心间距。因一般回波块的移动速度不超过 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,为节约计算时间,具体计算时确定一个合适的搜索半径,舍去一些不必要的相关计算。相关系数(r)计算公式^[11-12]如下

$$r(m, n) = \frac{\sum \sum (z_{i1}(i, j) - \bar{z}_{i1})(z_{i2}(i, j) - \bar{z}_{i2})}{[\sum \sum (z_{i1}(i, j) - \bar{z}_{i1})^2 \sum \sum (z_{i2}(i, j) - \bar{z}_{i2})^2]^{1/2}} \quad (7)$$

其中 $z_{i1}(i, j)$ 、 $z_{i2}(i, j)$ 分别表示 t_1 、 t_2 时刻某一点雷达反射

率因子强度值, 单位 dBz; \bar{z}_{t_1} 、 \bar{z}_{t_2} 分别表示 t_1 、 t_2 时刻某回波范围内所有点强度值的平均, 单位 dBz。为获得比较稳定的回波移动速度, 采用最小二乘法对回波半小时内 5 个速度值进行拟合, 因为回波的合并、分裂对移动速度的计算有较大影响。

3.3 最大降水量计算

上已提及, 在已知回波系统移动速度的基础上, 利用第 2 节中的方法可计算 β 中尺度回波系统的最大降水量 P_{max} 。由于上述所跟踪的回波系统的边界是一个复杂多边形, 当用一条与回波移动速度相平行的直线扫描整个 β 中尺度回波区域计算 P_{max} 时(如图 1 所示), 扫描直线方程截距 α 的起点和终点在数学上较难确定。这里, 首先将所跟踪的回波面积等效为一个椭圆面积, 然后确定和移动速度平行并与等效椭圆相切

的直线 L_1 、 L_2 的截距 α_1 、 α_2 , 通过计算截距在 (α_1, α_2) 内每一直线上的降水量, 即可找到最大降水量 P_{max} 。具体步骤如下:

(1) 求雷达直角坐标下等效椭圆的椭圆方程。由回波象元拟合的等效椭圆的特征参数长轴 a 、短轴 b 、回波质心坐标 $(x_0 = (\sum_{i=1}^n z_i x_i) / \sum_{i=1}^n z_i, y_0 = (\sum_{i=1}^n z_i y_i) / \sum_{i=1}^n z_i)$ 、长轴与 x 轴的夹角 θ ^[13] 求得等效椭圆方程为

$$[(x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta]^2/a^2 + [(y-y_0)\cos\theta-(x-x_0)\sin\theta]^2/b^2=1 \quad (8)$$

(2) 根据回波移动速度方向, 求与回波移动速度方向相平行的直线方程族

$$y=xtg\beta+\alpha \quad (9)$$

(3) 确定扫描直线截距 α 的变化范围 $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$

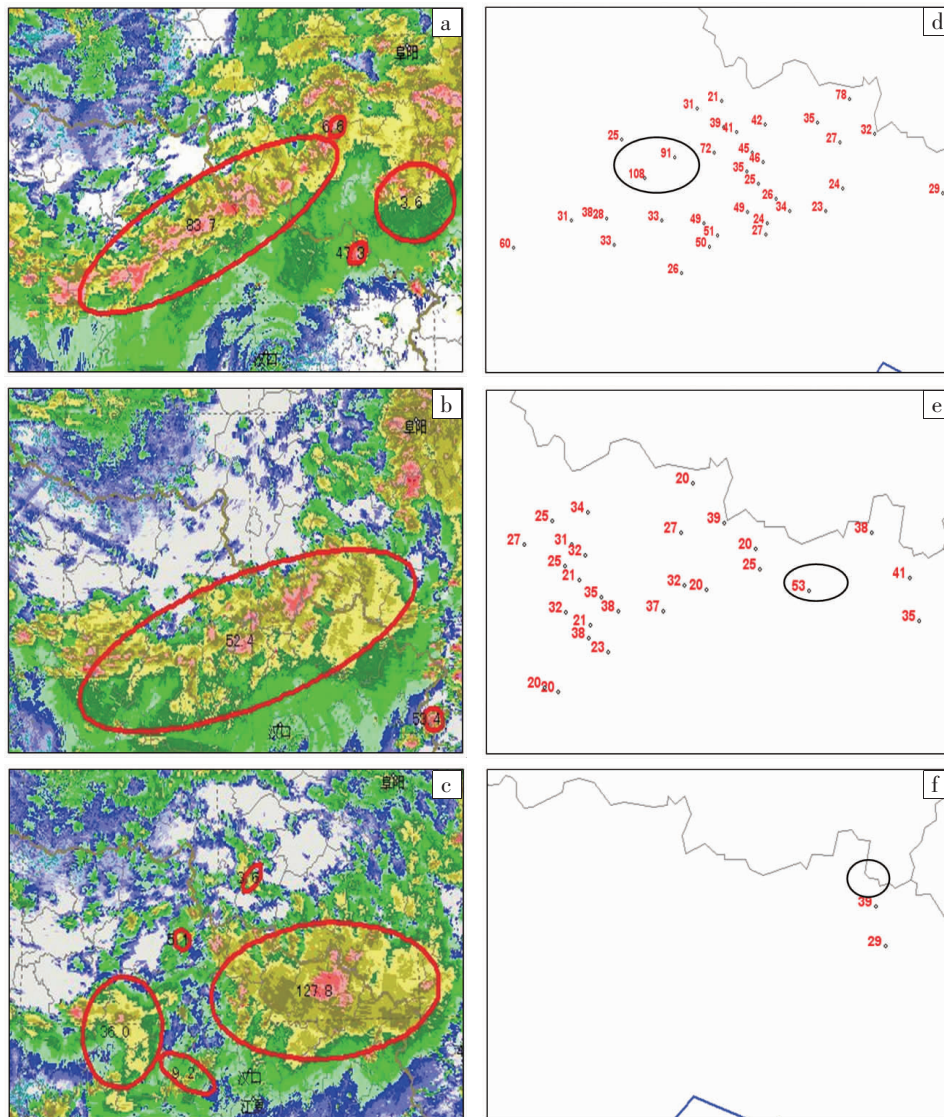


图 2 2007 年 7 月 8 日 18:00(a)、20:00(b)、23:00(c)暴雨回波识别结果以及湖北东部 18:00—21:00(d)、20:00—23:00(e)、23:00 至 9 日 02:00(f) 3 h 降水量分布图

(a)、(b)、(c)中, 椭圆圈表示与跟踪回波面积等效的几何面积;
(d)、(e)、(f)中, 椭圆圈表示实际最大雨量出现位置

$$\alpha_{1,2} = \{kx_0 + y_0 - x_0 \operatorname{tg}\theta - ky_0 \operatorname{tg}\theta \pm \sqrt{(a^2k^2 + b^2)\cos^2\theta}\} / (1 - k \operatorname{tg}\theta) \quad (10)$$

其中 $k = \operatorname{tg}\beta$

(4)从 $\alpha_i = \alpha_1$ 开始,求直线 $y = x \operatorname{tg}\beta + \alpha_i$ 与椭圆的交点 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$

(5)求线段 AB 上降水象元累计降水量

$$P \approx \frac{1}{C} \sum_{l} R(x_i, x_i \operatorname{tg}\beta + \alpha_i) \times \nabla l \quad (11)$$

由于回波可能向任意方向移动,假若是圆形回波象元, ∇l 就是其直径。然而,实际回波象元是正方形的,因此将一个实际边长为 a 的正方形象元等效为一个圆,取其直径,则

$$\nabla l \approx 2a / \sqrt{\pi} \quad (12)$$

(6)改变截距的取值,重复步骤(4)、(5),直到扫描完整个反射率因子回波区。

(7)给定暴雨回波的降水量阈值,最大降水量 P_{\max} 大于阈值的,即为暴雨回波。

4 暴雨回波自动定量识别产品的应用

在上述算法研究的基础上,开发出计算机暴雨回波自动定量识别产品,每 6 min 一次。该产品的表达形式以雷达组合反射率因子为背景,将描述中尺度回波系统范围的等效椭圆叠加其上,并标注最大降水量值。这里,举例分析降水过程暴雨回波的自动定量识别。

受高空槽东移和副热带高压外围西南暖湿气流共同影响,2007 年 7 月 8 日下午湖北东部出现一次大暴雨过程。该过程降水强度大,中尺度回波系统的强降水多集中在 2~3 h,强降水中心位于鄂东北,所以选用自动站 3 h 雨量作对比。图 2 给出暴雨回波识别结果和湖北东部加密自动气象站 3 h 累计降水量分布。

由图 2 可知,8 日 18—23 时,武汉多普勒雷达观

测到一个长约 200 km 的 β 中尺度降水回波系统,该回波是一典型带状暴雨回波。18 时(图 2a),识别算法计算的最大降水量为 83.7 mm,实况最大降水量达 108 mm(图 2d);另外,其它三个回波块最大降水量较小,并在湖北省外部或省边界处(无外省自动站雨量资料做比较)。这一中尺度系统在向偏东南方向移动过程中逐步减弱,20 时(图 2b), β 中尺度暴雨回波系统的最大降水量为 52.4 mm,实况最大降水量达 53 mm(图 2e);23 时(图 2c), β 中尺度暴雨回波分裂为几个回波块,其中最大回波块识别算法计算的最大降水量为 127.8 mm,实况最大雨量仅 39 mm(图 2f),出现在麻城站,识别的最大降水量与实况差异很大。其原因是多方面的,一是回波处在减弱期;二是回波产生的强降水位于东部大别山区,无自动站雨量资料观测。

5 暴雨回波定量识别精度的初步评估

5.1 资料与评估方法

选取 2007 年 7 月 1—14 日湖北省江汉平原以东地区 4 次强降水过程,即 7 月 1 日 15—18 时、7 月 8 日 16—23 时、7 月 13 日 08—18 时、7 月 14 日 02—07 时强降水过程,使用武汉多普勒雷达站监控区域内 56 个自动站逐时雨量资料,对每 30 min 的武汉单站多普勒天气雷达暴雨识别结果进行暴雨、大暴雨和特大暴雨分级评估。这里,采用估算、估算、估算、估算等 4 种方法进行评估(表 1)。其中,估算、估算、估算的自动站雨量累计时间分别取 1、2、3 h;估算的累计时间取 $T = L \cdot C^{-1}$,即最大降水量的累计时间, C 为回波移动速度, L 为沿移动方向上回波的长度。按气象部门现行短时和临近预报业务 1~3 h 以内降水量值为强降水划分标准,即大于 20 mm、大于 45 mm、大于 75 mm 分别为暴雨、大暴雨和特大暴雨。

表 1 最大降水量估计结果类型和实况结果类型

类型	最大降水量	实况
整点和整点后 30 分钟 2 个时次的最大降水量估算值的平均		回波影响区域内整点后 1 小时降水量最大的站点降水量
整点、整点后 30 分钟、整点后 60 分钟、整点后 90 分钟 4 个时次的最大降水量估算值的平均		回波影响区域内整点后 2 小时降水量最大的站点降水量
整点、整点后 30 分钟、整点后 60 分钟、整点后 90 分钟、整点后 120 分钟、整点后 150 分钟 6 个时次的最大降水量估算值的平均		回波影响区域内整点后 3 小时降水量最大的站点降水量
回波影响时段整点和半点最大降水量估算值的平均		回波影响时段和区域内站点的最大降水量

5.2 评估结果分析

表 2 给出采用 4 种评估方法得到的评估结果。从中可见,方法、方法、方法三种评估方法的评估结果基本一致,方法 4 的临界成功指数 CSI 偏小,其原因是方法

使用的是自动气象站 1 h 雨量,而一个中尺度回波系统的强降水大多数发生在 2~3 h。因此,评估精度下降。不考虑方法 4,就可初步确定,暴雨、大暴雨、特大暴雨识别 CSI 范围分别为 0.73~0.85、0.63~0.71、0.20~0.52。

表 2 四种评估方法的暴雨、大暴雨和特大暴雨
分级识别临界成功指数(CSI)

降水量级	方法	方法	方法	方法
暴雨	0.73	0.85	0.82	0.80
大暴雨	0.29	0.71	0.63	0.70
特大暴雨	0.00	0.20	0.50	0.29

6 结语

雷达观测到的一块降水回波能否产生强降水? 最大可能降水量有多大? 这是暴雨临近预警业务中受到重点关注的问题。本文基于我国新一代天气雷达二维反射率因子资料,在假设回波系统状态相对稳定的情况下,研究估计降水回波最大降水量算法,藉此开发出计算机自动暴雨回波定量识别产品。从算法实现过程可看出,主要影响这种暴雨回波定量识别精度的因素来源于三个方面:一是雷达测量降水估计精度,这会对雨强估计带来偏差;二是中尺度对流回波系统的强度变化,这是目前基于天气雷达观测下外推技术均难以克服的困难;三是回波的合并、分裂对移动速度稳定性的影响,这可通过算法改进得到一定提高,也是今后需进一步开展深入研究的重要方面。

参考文献:

[1] 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,2006:181-231.

- [2] 肖艳姣,张家国,万蓉,等.切变线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料分析[J].气象,2006,31(2):35-37.
- [3] 张家国,廖移山.“98.7”鄂东连续特大暴雨的中尺度分析[J].气象科学,2001,21(2):169-177.
- [4] 张家国,吴翠红,王珏,等.一次冷锋大暴雨过程的多普勒雷达观测分析[J].应用气象学报,2006,17(2):225-231.
- [5] 张家国,王珏,周金莲,等.暴雨多普勒天气雷达回波特征分析及临近预警[J].暴雨灾害,2008,27(4):326-329.
- [6] 张家国,王珏,谌伟,等.灾害性暴雨多普勒观测研究[C]//全国灾害性天气预报技术经验交流会文集.北京:气象出版社,2009.
- [7] Charles A, Doswell III, Harold E, et al. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Mon Wea Rev, 1996, 11: 561-571.
- [8] Lakshmanan V, Rabin R, DeBrunner V, et al. Multiscale storm identification and forecast [J]. J Atmos Res, 2003, 4: 367-380.
- [9] 王改利,刘黎平.暴雨云团的多尺度识别方法及其在临近预报中的应用.大气科学,2007,31(3):400-408.
- [10] 杨洪平,张沛源,程明虎,等.多普勒天气雷达短时预报技术研究进展[J].暴雨灾害,2007,26(2):184-190.
- [11] 万玉发,张家国,杨洪平,等.联合雷达网与卫星定量监测与预报长江流域大范围降水[J].应用气象学报,1998,9(1):94-103.
- [12] 王珏,张家国,万玉发.多尺度合成的降水临近预报技术[J].气象科技,2008,36(5):524-528.
- [13] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—a radar-based methodology [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 1993, 10(6): 785-796.

An Algorithm of Quantitative Identifying Rainstorm Echo

ZHANG Jia-guo, WANG Jue, WANG Ping

(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the two-dimensional reflectivity factor data of a new generation Doppler radar, an algorithm of maximum precipitation for the β mesoscale heavy rain echo is studied. The algorithm is used to develop the automatic rainstorm recognition products, which include the goal segmentation and tracking of β mesoscale heavy rain echo and the calculation of maximum precipitation. By selecting four heavy rain events occurred in the eastern part of Hubei province, the grading estimations on the rainstorm recognition results from Wuhan Doppler weather radar are performed according to different precipitation level (more than 20mm, 45mm, 75mm). The results indicate that the critical success index is in the range of 0.73 ~0.85, 0.63 ~0.71 and 0.20 ~0.52 respectively. The products play an important role in the rainstorm-echo quantitative monitoring and early warning.

Key words: Doppler radar; Rainstorm echo; Identifying algorithm