

多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用

王改利^{1,2} 刘黎平¹

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学)

提 要

以天气雷达体积扫描的资料为基础, 采用交叉相关法建立了一种对暴雨的临近预报方法。该方法的基本思路是: 将第一时刻取得的雷达回波图像, 向任一方向移过一定的距离, 然后计算此图像与第二时刻图像之间的交叉相关系数, 直到找到极大值, 利用该极大值所对应的位移来预报下一时刻降水的位置。并利用“973”中国暴雨试验获得的观测资料对该方法进行了验证, 验证结果表明: 交叉相关法对暴雨有一定的预报能力, 预报雨带的移动方向与雷达实际观测的移动方向相吻合, 但其预报能力随着预报时间的增加而减弱。

关键词: 交叉相关 临近预报 多普勒雷达

引 言

梅雨锋暴雨是我国长江中下游地区夏季汛期的主要气象灾害。1991年江淮暴雨和1998年长江中下游的暴雨都是中尺度对流系统造成的。目前, 随着我国新一代多普勒天气雷达观测网逐步投入业务运行, 多普勒雷达探测覆盖面、探测能力和探测资料迅速增加。因此, 如何利用多普勒天气雷达探测暴雨的一些重要特征, 对暴雨进行临近和短时预报, 以减少其引发的气象灾害, 已经成为一项重要的工作。

国外早期的临近预报基本上是以雷达的观测结果为依托用外推方法制作的。1990年Tuttle和Foote将数据区域按特征进行划分, 通过计算当前数据与前一时刻数据的最大相关系数, 来确定回波的运动矢量^[1]。与此同时质心跟踪法也得到了发展, 1982年Austin和Bellon采用了一种将雷暴看作三维实体的质心跟踪法^[2], 质心跟踪法对雷暴进行识别并计算其特征量, 通过对相邻时刻的雷暴进行匹配, 进行雷暴的跟踪。质心跟踪法的优点在于更加完全的采用了可得到的信息。对流单体可以引起非常大的暴雨事件, 对其预报是非常重要的, 但目前的临近预报技术笼统地处理所有的降水类型而不加以区分。目前的中尺度NWP模式, 对于对流雷

暴发展演变的预报还是无能为力(Lilly 1990)。1986年Browning提出了预报此类问题的另外一种方法——物理概念模型法(CM)^[3]。一个物理概念模型将一个单体分为以下6个较为明显的阶段——早期的发展单体、发展单体、早期的成熟单体、完全成熟单体、早期消散阶段、消散阶段。作为一种预报工具, 物理概念模型法通过对气象现象演变过程的描述, 克服了外推法的一些局限性。

国内在临近预报方面也做了一些工作, 北京市气象局分析了暴雨过程中的中尺度系统, 如低空急流、暖平流、暖切变、冷切变、逆风区的雷达回波特征。通过对它们的识别及与降水特征、暴雨落区的比较研究, 表明这些中尺度系统对暴雨的先兆作用^[4]。北京市气象台对一次稳定性降水过程的多普勒雷达资料的强度场、速度场及VAD产品的分析, 得出对降水过程不同阶段临近预报有指导意义的结论^[5]。但对我国危害最严重的梅雨锋暴雨的临近预报, 所做的工作还相当有限。我们的工作就是针对长江中下游梅雨锋暴雨的临近预报, 进行了初步研究。

1 临近预报方法简介

由于梅雨锋中的大雨和暴雨几乎全部是由混合型降水回波产生的, 降水回波面积较大, 针对混合型降水的这种特点, 我们选取交

叉相关方法作为预报方法。

交叉相关算法是研究较早的跟踪算法之一,相关法将整幅图像上的回波作为一个整体处理,跟踪整个回波区域的移动,并且假设全体回波具有一致的移动方向。其具体方法是^[6]:将第一时刻取得的回波图像,向任一方向

$$R_{(p,q)} = \frac{\left\{ \sum_i \sum_j [m(i+p, j+q, t+\Delta t) - \bar{m}(t+\Delta t)][m(i, j, t) - \bar{m}(t)] \right\}}{\left\{ \sum_i \sum_j [m(i+p, j+q, t+\Delta t) - \bar{m}(t+\Delta t)]^2 \sum_i \sum_j [m(i, j, t) - \bar{m}(t)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

式中 $m(i, j, t)$ 为 t 时刻横坐标为 i 、纵坐标为 j 的网格上回波值。在 t 时刻回波的分布为 $m(i, j, t)$, 在 $t + \Delta t$ 时刻为 $m(i, j, t + \Delta t)$ 。如果把后者看作是前者在 i 方向移动 p , 在 j 方向移动 q , 那么, 通过上式就可以求出间隔 Δt 时间的两个回波相关系数, 通过改变 p 、 q 值, 就可以得出一组相应 $R(p, q)$ 的值, 从中找出相关系数最大值 $R_{\max}(p_{\max}, q_{\max})$, 则 $p_{\max}$ 、 $q_{\max}$ 可以作 Δt 时间回波移动的位置, 据此外推 $t + \Delta t$ 时刻回波的位置, 其中 Δt 为两幅雷达图像的时间间隔。

我们可以选取不同的反射率阈值 T_z , T_z 的值确定了将被预报的风暴类别。在本研究中, 由于我们的目的是对长江流域梅雨锋暴雨进行预报, 梅雨锋暴雨几乎全部由混合型降水回波产生的, 针对这种特点, 我们选取反射率阈值为 30、35dBz, 进行试验研究。

为了防止噪音或小范围地物杂波的影响, 使用面积阈值是必要的, 在本研究中我们选取的面积阈值为 30km^2 。由于风暴的移动有一个最大期望速度 $s_{\max}$ (这里采用 $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), 这就约束了在计算最大相关系数时, 回波图像向任一方向移动的距离, 要满足以下条件: $\sqrt{p^2 + q^2}/\Delta t < s_{\max}$, 这样既可以保证回波图像移动的方向可信, 又节省了计算机在时间上的花费。

一般情况下, 连续雷达图像的时间间隔 Δt 为 6 分钟, 为了使预报的结果更加平滑, 我们分别计算出时间间隔为 Δt 、 $2 \times \Delta t$ 、 $3 \times \Delta t$ 、 $4 \times \Delta t$ 、 $5 \times \Delta t$ 的 5 个位移矢量进行最小二乘法拟合, 位移矢量的拟合, 就是以时间间隔 Δt_i 对应的位移的 u 、 v 分量分别为自变量, 分别进行最小二乘曲线拟合, 拟合后的

向移过一定的距离, 然后计算此图像与第二时刻图像之间的交叉相关系数 R 。对于不同的移动位置, 会得到不同的相关系数值, 直到找到极大值 $R_{\max}$ 为止。具体做法:

u 、 v , 进行合成即为递推矢量, 以此来预报下一时刻风暴的位置。

2 试验研究

2.1 资料准备

我们选取 2002 年 6 月 20~24 日和 6 月 27~28 日合肥的暴雨资料进行研究, 数据类型为 VPPI 资料。雷达坐标是以斜距、方位角和高度角表达, 由于笛卡尔坐标的几何表达比较简单, 因此我们将雷达坐标转换成笛卡尔坐标。由于本研究要应用于国家 973 “中国暴雨试验与研究”, 必须考虑计算机的计算时间, 因此我们利用仰角为 0.5° 和 1.5° 的 PPI 资料插值成距地面高度为 2km 的 CAPPI, 网格距为 2km。虽然合肥雷达的最大可测距离为 460km, 但有效扫描半径为 150~200km, 因此我们选取 CAPPI 的半径为 200km, 这样我们得到的是一个 200×200 的矩阵, 最大相关系数就是在每两个这样的矩阵之间计算的, 最大相关系数所对应的位移就是递推位移, 为了得到一个比较稳定的递推矢量, 我们对前面 5 个时刻的递推位移进行最小二乘拟合, 以此外推 15 分钟、30 分钟、60 分钟的暴雨位置及降水强度。

2.2 天气过程

2002 年 6 月 20~24 日, 梅雨锋持续维持在 30°N 以北的长江流域, 先后有几个较强的 MCS 在中下游地区发生发展, 造成了大范围强降雨。6 月 22 日 13 时, 在南阳盆地有直径大约为 50km 的中尺度对流系统生成, 14 时 MCS 在原地发展为直径约 80km 的中系统。15 时以后, MCS 强烈发展, 22 日 18 时已经发展为一个 $500\text{km} \times 300\text{km}$ 的中 α 尺度云团, 湖北北部开始出现降水, 18~22 时降水一直维持在南阳盆地。随后, MCS 缓慢向东北移动, 消亡时间为 23 日 11 时, 消亡

地点为安徽、江苏。此对流系统将作为本临近预报试验研究的个例进行介绍。

2.3 图像分析

我们对2002年6月20~24日的合肥雷达资料进行暴雨临近预报试验,为了比较雷达实测与预报雨强分布的异同,我们选取6月22日18时03分的雷达资料作为起始时刻(图略)进行预报,外推30分钟、60分钟的暴雨位置及雨强,如图1(见封三)所示。我们以6月22日15时57分的雷达资料为初始图像计算递推矢量,共9张图像,其时间间隔为6分钟、12分钟、18分钟、24分钟、30分钟、6分钟、12分钟、18分钟,计算出的递推矢量为 $45\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,离差是 $2\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。实测图像是由雷达实测反射率图像经 $Z-R$ 关系转换而来,由于梅雨锋暴雨多为积层混合型降水,因而我们选用的 $Z-R$ 关系为:

$$Z = 200I^{1.6} \quad (1)$$

当然,外推的时间可以任意选取,我们这里是考虑到预报结果的验证,故而希望预报的时间与雷达实测资料的时间同步,同时也考虑预报时间对于业务的应用性。图1a为预报时效为30分钟的预报雨强分布图像,图1b为与图1a相同时刻的雷达实测雨强分布图像,从这两幅图中可以看出,整幅图像的雨强分布形状大体相似,位置基本相同,但还是可以看到一些细微的差异:图1a中第四象限210度径向与240度径向之间的强降水区域(红色区域),而在图1b中有所散开,同时在图1a中第一象限30度径向与60度径向之间、距离圈的最外圈有较强的降水,而图1b中相同位置的降水也向周围散开,说明云团已经开始消散。这说明在这30分钟的过程中,存在着暴雨云团的消散,引起雨强的变化。随着预报时间的增加,预报的雨带继续向东北方向移动,图1c为预报时效为60分钟的预报雨强分布图像,图1d为与图1c相同时刻的雷达实测雨强分布图像,从这两幅图中可以看出,整幅图像的雨强分布形状大体还是相似的,移动的方向一致,但实测图像的部分强降水云团进一步分散。从以上的图像变化可以看出:我们预报的暴雨雨带的移动方向与实际的天气过程相吻合,但随着预报时间的增加,降水云团在不断地生消变化,

预报的雨带分布不能充分反映这些变化。其根本原因在于交叉相关法将整幅图像上的回波作为一个整体处理,并且假设全体回波具有一致的移动方向,但随着预报时间的增加,风暴在不断的生消变化,这必然导致预报能力随着预报时间的增加而减弱。这在本文的第4节中可以看到具体的数据。

我们也对随后6月27~28日的暴雨过程进行了个例试验,试验结果发现,预报结果与6月20~24日的结果相似,基本能够预报降水分布的位置,但不能反映云团的生消变化。

3 预报结果评价

为了验证预报结果,要对预报结果进行评价。最简单的方法就是将所有雷暴的预报位置与实际观测到的位置进行比较^[8]。我们将预报风暴的位置和预报时刻雷达实际观测的位置(实测位置)标绘到一个 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 格点上,逐个格点进行对比。对于雷达实测的雨强分布图像,如果格点的雨强大于阈值,则认为格点是“活跃”的,反之,则认为格点不“活跃”;考虑到1~2个格点长度的空间预报误差,我们的评价程序对预报图像每个格点周围及四个相邻的格点进行扫描,如果有一个格点的雨强值超过阈值,则认为格点是“活跃的”;反之,则认为“不活跃”。

成功——实际和预报格点都是活跃的;

失败——实际格点活跃而预报格点不活跃;

虚假警报——实际格点不活跃而预报格点活跃。

探测概率(P_{OD})、虚假警报比(F_{AR})、临界成功指数(I_{CS})按以下定义计算^[7]:

$$P_{OD} = \frac{n_{成功}}{n_{成功} + n_{失败}} \quad (2)$$

$$F_{AR} = \frac{n_{虚假警报}}{n_{成功} + n_{虚假警报}} \quad (3)$$

$$I_{CS} = \frac{n_{成功}}{n_{成功} + n_{失败} + n_{虚假警报}} \quad (4)$$

我们选取2002年6月20日至6月24日合肥的暴雨资料进行验证,验证结果表明:评价结果与预报时间有关,预报的探测概率(P_{OD})、临界成功指数(I_{CS})是随着预报时间的增加而减小的,而预报的虚假警报比

(F_{AR})是随预报时间的增加而增加的。图2的曲线说明了预报结果的 P_{OD} 、 F_{AR} 、 I_{CS} 随预报时间变化的趋势情况。

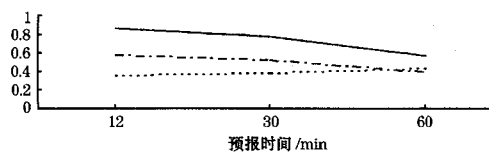


图2 P_{OD} (实线)、 F_{AR} (虚线)、 I_{CS} (点画线)随预报时间的变化趋势

在预报时间相同的情况下,预报结果还与评价的阈值有关。在预报时间相同的情况下,预报的探测概率(P_{OD})、临界成功指数(I_{CS})是随着评价阈值的增加而减小的,而预报的虚假警报比(F_{AR})是随评价阈值的增加而增加的。预报结果与评价阈值的关系如图3所示。

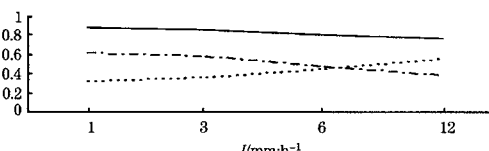


图3 P_{OD} (实线)、 F_{AR} (虚线)、 I_{CS} (点画线)随评价阈值的变化趋势

4 结 语

(1) 交叉相关法对暴雨有一定的预报能力,预报雨带的移动方向与雷达实际观测的移动方向相吻合。其 I_{CS} 评价结果与预报时间有关,随着预报时间的增加, I_{CS} 的数值在减少,而且 I_{CS} 评价结果与评价的阈值有关,

随着评价阈值的增加, I_{CS} 的数值在减小。

(2) 我们还选取了不同反射率的阈值(25dBz, 30dBz, 35dBz)进行预报。验证结果表明:对于积层混合型降水,选取较小的反射率阈值,预报结果要优于较大的反射率阈值。

(3) 应用交叉相关法进行梅雨锋暴雨的临近预报,在整个预报的过程中,没有考虑主要引发暴雨的中尺度对流系统的的发生、发展及消亡的过程,也没有考虑风暴的分裂及合并的情况,这是交叉相关法的局限性,也是我们今后工作需要解决的重点问题。

参考文献

- 1 Tuttle, J. D., and G. B. Foote, 1990: Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7, 218—232.
- 2 Austin, G. L., and A. Bellon, 1982: Very-short-range forecasting of precipitation by the objective extrapolation of radar and satellite data. *Nowcasting*, A. K. Browning, Ed., Academic Press, 177—190.
- 3 W. H. HAND and B. J. CONWAY. An Object-Oriented Approach to Nowcasting Showers, weather and forecasting. 1995:10(5), 327—341.
- 4 刘洪恩. 单多普勒天气雷达在暴雨临近预报中的应用. *气象*, 2001, (12): 17—22.
- 5 康玉霞, 王令, 李志楠. 北京地区一次降水过程的多普勒雷达资料分析. *气象*, 2002, (3): 25—30.
- 6 李建辉. 气象卫星雷达数字化图像的分析应用. 北京: 气象出版社, 1993: 39—41.
- 7 Michael Dixon and Gerry Wiener. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting Radar-based Methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1993: 10(6), 785—796.

Application of Doppler Radar Observation to Rainfall Nowcasting

Wang Gaili^{1,2} Liu Liping¹

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

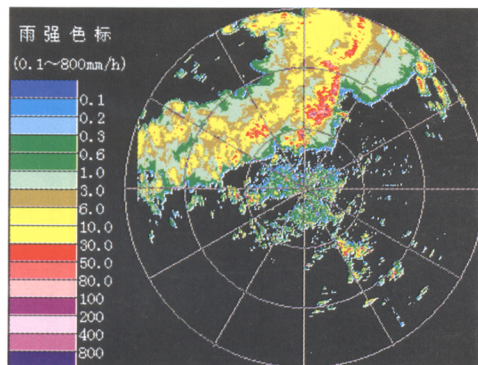
2. Nanjing University of Information Science & Technology)

Abstract

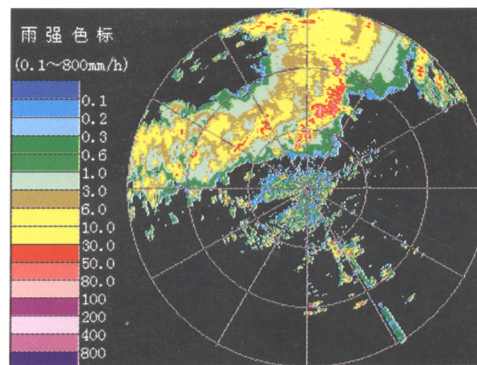
Based on the Doppler radar data, a technique is described with the cross correlation method to heavy rainfall nowcast. Similar patterns of radar echoes are detected by comparing tracking areas in consecutive scans. The best fit between the tracking area is found by optimizing the correlation coefficient. The displacement vector corresponding with the max correlation coefficient is used to extrapolation rainstorm for periods between ~quarter and one hour. The technique is validated by the use of observational data of "China Heavy Rain Experiment and Study CHeRES". It is showed that displacement directory of rainstorm nowcasted by cross correlation is consistent with that of radar observation, the forecast veracity is decreasing with forecast lead time.

Key Words: radar data cross correlation heavy rainfall nowcasting evaluation

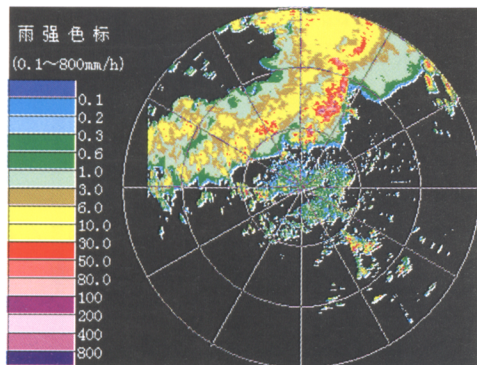
《多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用》附图



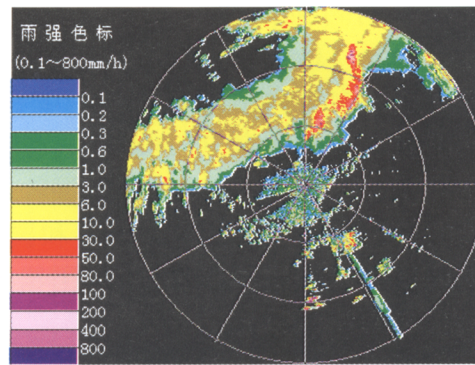
a 预报 30 分钟



b 实测图像 18:35



c 预报 60 分钟



d 实测图像 19:00

图1 预报雨强分布图像与雷达实测雨强分布图像之间的异同