

多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用^{* 1)}

王改利¹⁾²⁾ 刘黎平¹⁾ 阮征¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学,南京 210044)

摘 要

强暴雨、台风暴雨等灾害性暴雨天气是造成洪涝灾害最主要的降水天气系统。以广州雷达和梅州雷达的拼图资料以及温州单站雷达资料为基础,讨论了 TREC 方法中时间步长、网格大小及雨强阈值等参数变化对跟踪结果的影响,并对 TREC 矢量场进行了平滑处理,这在一定程度上减少了 TREC 矢量场中由于地物回波和回波梯度变化造成的一些明显错误的矢量,得到较为连续的矢量场,并将得到的矢量场用于暴雨的临近预报。个例分析及预报结果的验证表明:通过选择合适的参数,雨强 CAPPI、反射率因子 CAPPI 和 CR 3 种资料得到的 TREC 矢量场一致性好,能够反映我国的强暴雨、台风暴雨等灾害性暴雨的移动方向。CR 资料的外推预报结果稍差于其他两者,3 种资料预报的准确性都随着预报时间的递增而降低,对连续时刻的 TREC 矢量进行拟合,有助于提高预报准确率。TREC 方法对于结构比较复杂、不易识别的台风暴雨等灾害性暴雨天气,在预警方面具有一定应用价值。

关键词: TREC; 临近预报; 外推预报

引 言

新一代多普勒天气雷达可以获得高时空分辨率的降水强度信息,是监测暴雨,并进行临近预报的重要手段之一。美国建立临近预报系统的重要资料来源就是多普勒天气雷达。目前,我国也正在建立新一代多普勒天气雷达观测网,其探测覆盖面、探测能力和探测资料将会迅速增加。因此,可以利用多普勒天气雷达对暴雨进行实时监测,分析暴雨的一些重要特征,对其进行预警和临近预报,以减少气象灾害的发生。

利用雷达资料进行暴雨的临近预报,主要是对雷达回波的跟踪及外推。在国外,最普遍的方法是质心跟踪法,质心跟踪法对雷暴进行识别并计算其特征值,通过对相邻时刻的雷暴进行匹配,进行雷暴的跟踪^[1-2]。另一种技术是利用神经网络将反射率因子模拟成神经元来预报将来时刻反射率的位置^[3]。第 3 种方法是利用矩形网格在搜索半径内寻找最大相关系数的方法来跟踪雷达回波(TREC)^[4-5]。此外还提

出了预报此类问题的另外一种方法——物理概念模型法(CM)^[6],其定性地描述了一些气象现象的结构、形成机制和生命周期的相互联系。

暴雨是我国主要的灾害性天气之一。长江流域(含淮河流域)历次特大洪水的原因都是持续性暴雨天气过程所致。因此,国内各个省市气象局都非常重视暴雨的临近预报,并做了一些工作,如新疆、山东的冰雹短时预报分析^[7];江西的飑线雷达回波特征分析^[8]。上海市气象局还以中尺度数值预报模式预报产品为基础,人机交互方式为工作平台,综合使用了卫星、雷达、自动站及高空地面观测等资料,结合预报员经验建立了上海地区强对流天气短时预报系统^[9]。肖艳姣等^[10]利用多普勒雷达体扫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。陈家慧等^[11]讨论了利用 BP 模型进行临近预报的方法,并与傅立叶描绘方法作了比较,说明了人工神经网络方法用于临近预报的可行性。汤达章等^[12]分析了矩不变量法和相关亮度综合分析法跟踪雷达回波的精度。但我国的临近预报技术与国外的先进水平相比,还存在一定的差距。

* 国家自然科学基金项目(40375008)和科研院所社会公益研究专项国家科技基础条件平台工作重点项目“暴雨灾害的监测与预警业务应用平台研究”共同资助。

2006-05-25 收到,2007-01-11 收到再改稿。

暴雨是我国影响范围最大、造成的洪涝灾害最严重的天气系统,台风暴雨也是我国沿海地区洪涝灾害发生的主要原因之一。这两种系统的暴雨云团结构都比较复杂,尺度多为 β -中尺度系统,现在普遍应用的质心法主要适用于 γ -中尺度单体的识别,对于上百公里的 β -中尺度对流云团效果不理想,神经网络方法需要对神经元进行大量的资料训练。基于以上原因,在本研究中选择 TREC 方法作为回波跟踪方法,进行暴雨的临近预报研究。TREC 方法是 Rinehart 等 1978 年首先提出的^[4],香港天文台的临近预报系统“小涡旋”^[13]和 NCAR 的临近预报系统“Auto-Nowcast”^[14]都采用了 TREC 方法构造回波运动矢量场。在这些系统中都是通过回波反射率因子的 CAPPI 来构建运动矢量场,在研究中,不仅采用回波反射率因子的 CAPPI 来构建回波运动矢量场,同时还通过雨强的 CAPPI 和垂直最大回波强度(CR)来构建运动矢量场,并讨论了这 3 种方式的预报结果。

1 预报方法

1.1 资料预处理

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,因此在研究中,将雷达坐标转换成笛卡尔坐标。在笛卡尔坐标系中,

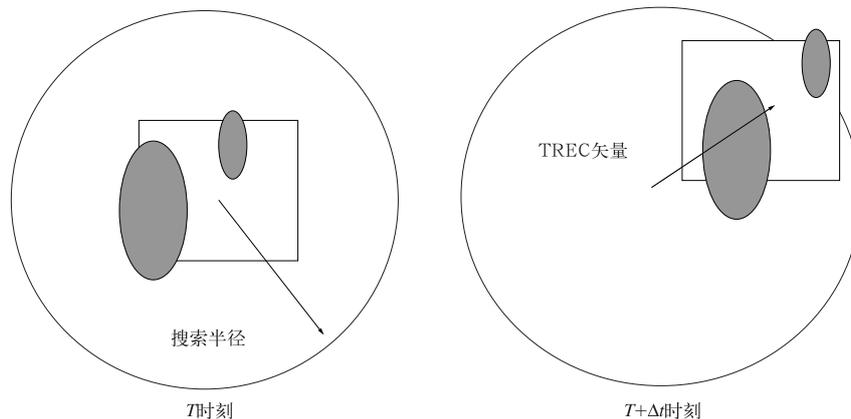


图 1 TREC 方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TREC

将第 1 时刻的回波图像中的一个矩形网格,在搜索半径内向任一方向移过一定的距离,然后计算此矩形网格与第 2 时刻相同大小的矩形网格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,具有最大

将资料处理成以下 3 种数据:回波强度的 CAPPI、雨强的 CAPPI 和垂直最大回波强度显示(CR)。

回波强度的 CAPPI 由于预报的对象为暴雨,因此选取 4 个仰角较低的 PPI 数据,应用测高公式,用线性插值的方法得到选定高度上的数据。对于距雷达距离小于 20 km 的格点,选用 3.5° 仰角的 PPI,距雷达距离大于 20 km 而小于 35 km 的格点,选用 2.5° 仰角的 PPI,距雷达距离大于 35 km 而小于 50 km 的格点,选用 1.5° 仰角的 PPI,距雷达距离大于 50 km 的格点,选用 0.5° 仰角的 PPI。

雨强的 CAPPI 将回波强度的 CAPPI 经 Z-R 关系转换成雨强,得到雨强的 CAPPI。这里采用的 Z-R 关系为 $Z = 200I^{1.6}$ 。

垂直最大回波强度显示(CR) 应用体积扫描获取的回波强度数据,以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 为底面积,直到回波顶的垂直柱体中,对所有位于该柱体中的回波强度资料进行比较,挑选出最大的回波强度,从而得到最大回波强度的分布图像。

1.2 跟踪方法

选取相关法跟踪雷达回波(TREC),这种方法是交叉相关法的一种发展。交叉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,而 TREC 方法将回波区域划分成若干个矩形网格,跟踪每个网格的移动。TREC 方法如图 1 所示。

相关系数的移动就是 TREC 矢量,即用作外推预报的位移矢量。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum Z_1(i)Z_2(i) - n\bar{Z}_1\bar{Z}_2}{[(\sum Z_1^2(i) - n\bar{Z}_1^2)(\sum Z_2^2(i) - n\bar{Z}_2^2)]^{1/2}} \quad (1)$$

式(1)中, Z_1, Z_2 分别为 T 时刻和 $T + \Delta t$ 时刻反射率(雨强)的矩阵。 n 为矩阵的数据点数。那么, 通过上式就可以求出间隔 Δt 时间的两个矩阵的相关系数, 重复这个过程, 直到找到最大的相关系数, 此时, 从 T 时刻矩形网格的中心位置指向 $T + \Delta t$ 时刻矩形网格的中心位置的矢量即为 TREC 矢量。据此外推 $T + N \cdot \Delta t$ 时刻暴雨的位置。

搜索半径根据最大期望速度计算:

$$S_{\text{半径}} = V_{\text{max}} \times \Delta t \quad (2)$$

式(2)中, V_{max} 为雨带移动的最大期望速度(这里采用 60 km/h), Δt 为时间间隔。

1.3 平滑处理

为了消除一些错误的移动方向, 提高 TREC 矢量场的连续性, 采取了以下两步进行连续性检查: ① 如果一个 TREC 矢量与其周围矢量的平均方向相差超过 20° , 则用其周围 8 个点的平均矢量来替代这个 TREC 矢量, 零矢量也采用这种办法。② 对 TREC 矢量进行客观分析, 得到连续的位移矢量场。

对 TREC 矢量的 u, v 分量分别进行客观分析, 客观分析采用公式如下^[15]:

$$\alpha^*(i, j) = \alpha_0(i, j) + \Delta\alpha(i, j) \quad (3)$$

$$\Delta\alpha(i, j) = \frac{\sum_k w^2(i, j, k) \times \Delta\alpha(k)}{\sum_k w(i, j, k)},$$

$\alpha_0(i, j)$ 为变量 α 在格点 (i, j) 处的估测值, 这里取 TREC 矢量场分量的平均值; $\alpha^*(i, j)$ 为变量 α 在格点 (i, j) 处的校正值; $\Delta\alpha(k)$ 为目标点 k 处的差值, 这里为该点 TREC 矢量的分量与估测值之差; $w(i, j, k)$ 为目标点 k 在格点 (i, j) 处的加权函数

$$w(i, j, k) = \begin{cases} \frac{R^2 - d_m^2}{R^2 + d_m^2}, & d_m^2 < R^2 \\ 0, & d_m^2 > R^2 \end{cases} \quad (4)$$

d_m 为分析点与格点之间的距离与 TREC 矢量的函数, R 是影响半径。

1.4 预报及结果评价

1.4.1 预报

预报是以运动估算、反射率因子的增长、减弱信息以及当前数据为基础, 进行外推。对于每一个矩形网格来说, 通过计算其均值的变化可以得到云团反射率因子增长消亡的信息, 以此预报反射率因子的趋势变化。通过文中所描述的跟踪方法得到回波的移动方向和速度, 预报回波的位置。也可以拟合连续 5 个时刻的 TREC 矢量场, 作为回波的移动方

向和速度。

对台风暴雨预报时, 由于台风雨带作旋转移动, 如果预报时效较长, 线性外推必然引起较大的误差, 本研究中采用两个时间层的半拉格朗日方法(图 2), 半拉格朗日一维平流公式为

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial t} + U(x, t) \frac{\partial Z}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$U(x, t)$ 为 TREC 矢量的一个分量, x 方向与 TREC 矢量分量的方向相同, 根据半拉格朗日平流公式, 在图 2 中 $Z_j^{n+1} = Z_j^n$, $x_* = x_j - U(x, t)\Delta t$ 。

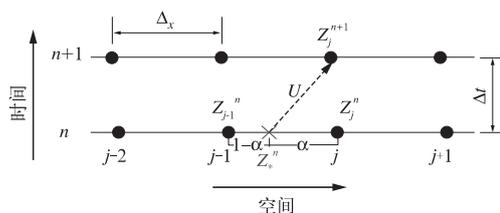


图 2 两个时间层的半拉格朗日方法
Fig. 2 Schematic diagram for two-time-level semi-Lagrangian

在对台风暴雨的外推预报中, 在 TREC 矢量的 u, v 分量上分别应用半拉格朗日一维平流公式, 时间步长为 6 min, 分别计算出 u, v 分量上的位移, 每 6 min 输出 1 次预报结果, 该时刻每个格点上的雨强值及移向、移速用作下一连续时刻的积分。

1.4.2 预报结果评价

通过预报图像和雷达实测图像的比较, 可以得到预报结果的定性描述, 同时也可以对预报结果进行定量的分析。将预报的数据和预报时刻雷达实际观测的数据逐个格点进行对比, 如果实测的格点数据和预报的格点数据都大于阈值, 则认为该格点是成功, 如果实测的格点数据大于阈值而预报的格点数据小于阈值, 则认为该格点是漏报, 如果实测的格点数据小于阈值而预报的格点数据大于阈值, 则认为该格点是虚假警报。探测概率(P_{OD})、虚假警报比(F_{AR})、临界成功指数(C_{SI})按以下定义计算:

$$P_{OD} = \frac{n_{\text{成功}}}{n_{\text{成功}} + n_{\text{漏报}}} \quad (6)$$

$$F_{AR} = \frac{n_{\text{虚假警报}}}{n_{\text{成功}} + n_{\text{虚假警报}}} \quad (7)$$

$$C_{SI} = \frac{n_{\text{成功}}}{n_{\text{成功}} + n_{\text{漏报}} + n_{\text{虚假警报}}} \quad (8)$$

式(6)~(8)中 $n_{\text{成功}}, n_{\text{漏报}}, n_{\text{虚假警报}}$ 分别为预报图像中成功、漏报、虚假警报的格点数目。

2 资料来源

研究应用了 2 个天气过程资料,均为 S 波段新一代天气雷达(CINRAD WSR-98DSA)的观测结果,2 个天气过程分别为 2005 年 6 月 23 日广州、梅州的一次强降雨天气过程和 2005 年 9 月 11 日的温州雷达观测到的卡努台风暴雨过程。

对反射率因子资料,CINRAD/SA 雷达的最大可测半径为 460 km,库长为 1000 m,但由于距雷达较远半径处的回波距地面太高,对暴雨的研究意义不大,因此 CAPPI 的半径选为 250 km。

3 参数的敏感性试验及跟踪结果

变化参数值,以研究不同参数条件下 TREC 方法的跟踪效果和存在的问题。这里将雷达资料处理为雨强的 CAPPI,进行雨带的跟踪及参数的敏感性试验。

3.1 时间步长的影响

TREC 方法采用两个时次的雷达资料跟踪回波的移动,采用不同的时间步长,其跟踪结果会有所不同。以台风暴雨过程为例,对比时间步长分别为 6 min,12 min,18 min 的 TREC 移动矢量场(图略),发现时间步长为 6 min 的 TREC 移动矢量场方向一致性好,每个矩形网格移动速度的大小与周围网格的速度大小连续性好,变化比较均匀。时间步长为 12 min 的 TREC 移动矢量场,方向一致性虽然比较好,但在个别点上出现了杂乱的方向,每个矩形网格移动速度的大小与周围网格的速度大小连续性减弱,在某些区域变化较大。随着时间步长的增加,TREC 方法得到的移动矢量场,方向的一致性和速度大小的连续性均减弱。为了定量讨论时间步长的影响,通过不同时间步长的 TREC 矢量场之间的方差和相关系数(采用 TREC 矢量平滑之前的数据)来描述,时间步长为 6 min 时,方差为 2.05,时间步长为 12 min 时,方差为 2.41,时间步长为 18 min 时,方差为 2.54,时间步长为 6 min 时方差小于其他两者,说明 6 min 步长得到的 TREC 矢量场的波动程度小于其他两者,步长为 6 min 的 TREC 矢量场与步长为 12 min 的 TREC 矢量场之间的相关系数为 0.62,步长为 6 min 的 TREC 矢量场与步长为 18 min 的 TREC 矢量场之间的相关系数为 0.30,这说明选

择的时间步长不同,TREC 矢量之间的相关性比较差。同时随着时间步长的增加,计算 TREC 矢量的计算机时间增加。对广州、梅州 2005 年 6 月强降雨过程的分析结果与卡努台风的分析结果相似。因此,在条件允许的情况下,尽量选取连续两个时次(间隔为 6 min)的雷达资料。

3.2 矩形网格大小的影响

雷达图像上矩形网格的大小,受两方面制约,网格太小,由于包含的数据太少,就得不到稳定的相关系数,矩形网格太大,则给出的是一个平均的移动矢量,容易将一些小尺度的变化平滑掉。以 2005 年卡努台风为例,分析了不同大小矩形网格对 TREC 矢量场的影响,选择的矩形网格大小分别为 15 km × 15 km,20 km × 20 km,30 km × 30 km。从 TREC 矢量场来看,都能反映出台风的环流特征,但矩形网格为 15 km × 15 km 的矢量场,环流中杂乱的方向较多,其他两个矢量场的环流更加平滑,从矩形网格为 20 km × 20 km 的矢量场可以看到强回波区的合并特征,而矩形网格为 30 km × 30 km 的矢量场却将此特征平滑掉了。因此,在本研究中,矩形网格的大小设置为 20 km × 20 km,每个矩形网格的中心间隔为 10 km,这样相邻的网格之间的数据点有 1/2 是重叠的。当然,对于不同的暴雨系统,矩形网格大小的选择根据具体情况有所不同。

3.3 阈值的影响

根据预报目的的不同,可以选取不同的阈值。本研究的目的是对暴雨进行预报,选取雨强阈值分别为 0.65 mm/h,1.3 mm/h,2.7 mm/h 进行试验研究,结果发现选择不同的雨强阈值对暴雨的跟踪结果有影响,为定量描述这种影响,以卡努台风为例,计算了不同阈值时 TREC 矢量之间的方差和相关系数,对应 3 个雨强阈值的方差分别为 2.04,1.90,2.01。阈值为 1.3 mm/h 时,TREC 矢量场的方差最小,说明波动程度最小,从相关系数的计算来看,不同阈值对应的 TREC 矢量场的相关性较好,相关系数均在 0.80 以上。因此,在本研究中选取 1.3 mm/h 为雨强阈值,对大于该阈值的数据进行暴雨跟踪及预报。

4 跟踪预报结果及分析

4.1 广州、梅州的强降雨过程

2005 年 6 月 23 日广州、梅州发生了一次强降雨天气过程。选取 6 月 23 日 00:07 和 00:13(世界

时,下同)连续两个时刻的广州、梅州雷达拼图资料(彩图3,左下方为广州雷达,右上方为梅州雷达)为例进行分析,从回波强度 CAPPI、雨强 CAPPI 和 CR 得到的 TREC 矢量场可以看出,3种资料得到的 TREC 矢量场的一致性非常好,暴雨雨带从西南向东北方向移动,移动方向和速度比较均匀,具有较强的组织性。以这3种 TREC 矢量场作为雨带的移动,可以预报未来时刻雨带的位置和强度,为了对这3种预报结果作出定量的比较,选取连续2h的雷达资料进行跟踪、预报,根据1.4.1所描述的方法,这3种资料预报结果的定量评价见表1,从表1可以看出,

以反射率因子 CAPPI 和雨强 CAPPI 得到的 TREC 矢量场作为雨带的移动方向,其预报结果的 P_{OD} , F_{AR} , C_{SI} 几乎没有差别,这与反射率因子 CAPPI 和雨强 CAPPI 之间存在转换关系密切相关。以 CR 的 TREC 矢量场预报雨带的移动,其预报结果的 P_{OD} , C_{SI} 比前两者的要稍微小一些, F_{AR} 稍微大一些,但差异并不大,这与 CR 的定义有关,不同高度上最强反射率因子随时间的变化要相对大一些,但其给出了未来时刻最强反射率因子的一些信息。从表1还可以看出,这3种预报结果的准确率均随着预报时效的增加在逐渐减小,虚假警报在逐渐增加。

表1 预报评价结果随预报时效的变化

Table 1 The forecast results of evaluation varying with lead time

预报时效/min	P_{OD} (反射率/雨强/CR)	F_{AR} (反射率/雨强/CR)	C_{SI} (反射率/雨强/CR)
6	0.95/0.95/0.94	0.14/0.14/0.14	0.83/0.83/0.81
12	0.91/0.92/0.90	0.18/0.18/0.18	0.77/0.77/0.75
30	0.88/0.88/0.85	0.26/0.26/0.28	0.67/0.68/0.64
60	0.81/0.81/0.77	0.33/0.32/0.35	0.58/0.58/0.53

彩图4为30min和60min的预报结果(大于阈值)和雷达观测图像,从彩4图可以看出,0~60min的预报时效,预报图像和雷达观测图像的暴雨强度和位置比较相似,随着预报时效的增加(如60min的预报),在梅州雷达正南方的雨带发生了分裂,而线性预报却没有预报出此分裂,这也是线性外推的局限性所在。

从彩图3可以看出,2005年6月23日广州、梅州强暴雨的移动方向与雨带的方向一致,这种特点易在一个地方形成长时间的降雨。图5为某一个格点在1h内雷达观测到雨强和预报雨强的变化曲线,实线表示雷达观测的雨强,虚线表示预报的雨强,从雷达观测雨强可以看出,在1h内,暴雨的强度较大,这验证了暴雨的落区会持续较长时间的暴雨,预报的雨强与观测的雨强在前30min吻合的比较好,在30~60min的时间段内,雷达观测的雨强变化较大,而预报的雨强比较平缓,这也说明了随着预报时效的增加,预报的准确率在降低,与彩图4的结果类似。通过对连续时刻雨强的积分,可以得到1h的累积雨量,从雷达观测的1h雨量和预报的1h雨量对比可以看出,1h累积雨量的预报图像与观测图像基本吻合,落区和雨量比较一致,但是在梅州雷达的南部地区1h累积雨量的预报值略大于雷

达的观测值,这与雨带强度的发展变化有关,线性外推还不能准确地预报雨强的变化规律。在今后的研究工作中,应该加强对引发暴雨的强对流云团的发展演变规律的研究。

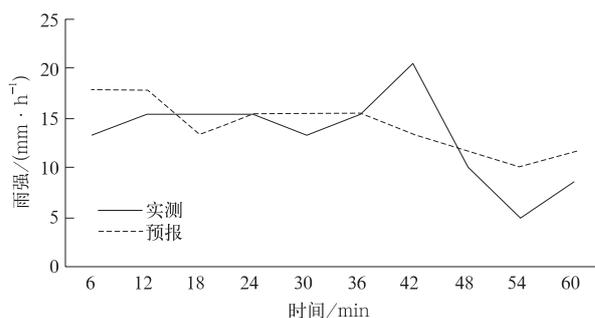


图5 格点的雨强变化

Fig. 5 Variation of rain intensity at one grid

将连续5个时次的 TREC 矢量场进行最小二乘拟合,得到雨带的移动矢量,以此进行暴雨的外推预报,不同时效预报结果与雷达观测图像的定量验证结果见表2,可以看出,TREC 矢量场的拟合,提高了预报的准确率,但提高的幅度不大。此外,采用不同时间步长的 TREC 矢量场来预报暴雨,与观测资料的对比发现,随着时间步长的增加,预报的准确率在降低。

表 2 拟合后 TREC 矢量的预报结果评价随预报时效的变化
Table 2 The forecast result of evaluation derived from fitted vector varying with lead time

预报时效/min	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}
6	0.97	0.16	0.82
12	0.94	0.20	0.76
30	0.90	0.28	0.66
60	0.84	0.34	0.58

4.2 台风暴雨过程

2005 年 9 月 11 日,卡努台风在我国浙江省登陆,以温州雷达探测到的资料为依据,研究台风的跟踪与预报。将 2005 年 9 月 11 日 03:01 与 03:07 连续两个时刻的雷达资料处理为雨强 CAPPI、反射率因子 CAPPI 及 CR,进行暴雨的跟踪、预报,3 种资料得到的 TREC 矢量场一致性很好,预报结果的 P_{OD} , F_{AR} , C_{SI} 差异不大,这与广州梅州暴雨过程的结果类似,彩图 6 为雨强 CAPPI 得到的 TREC 矢量场及 30 min 的预报结果,彩图 6a 的 TREC 矢量场反映出了台风的环流特征,中心处的速度为零,在某一特定半径范围内,随着半径的递增,速度在增加,在此范围外,速度减小,这类似于兰金(Rankine)的中尺度气旋模式中的描述^[16]。由于台风雨带作旋转移动,因此以 1.4.1 中所描述的拉格朗日积分方法进行预报,其 30 min 的预报结果与线性外推 30 min 的预报结果及雷达观测图像如彩图 6b~d 所示,按照拉格朗日积分方法进行预报(彩图 6b)的强对流雨带经过逆时针转动继续保持原来的形状,而线性外推预报结果(彩图 6c)的强对流雨带的形状发生了变化,与雷达观测图像(图 6 彩 d)的对比可以看出拉格朗日积分方法的预报效果好于线性外推,其定性评价见表 3。从表 3 也可以看出,拉格朗日积分方法的 C_{SI} 评分高于线性外推。同时也可以看出台风预报的准确率低于广州、梅州的强暴雨过程,这与其移动方向和速度的多变性相联系。

表 3 预报评价结果随预报时效的变化
Table 3 The forecast results of evaluation varying with lead time

预报时效/ /min	P_{OD} (拉格朗日 /线性)	F_{AR} (拉格朗日 /线性)	C_{SI} (拉格朗日 /线性)
6	0.91/0.91	0.26/0.26	0.69/0.69
12	0.87/0.86	0.33/0.35	0.61/0.60
30	0.81/0.78	0.37/0.40	0.55/0.52
60	0.73/0.68	0.40/0.45	0.50/0.46

5 结束语

利用 TREC 方法分析了广州、梅州的强暴雨和卡努台风暴雨两个灾害性暴雨天气过程的临近预报结果及评价,结果表明:

1) 通过选择合适的参数,TREC 方法能够跟踪暴雨雨带的移动,该方法能够反映强暴雨、台风暴雨等灾害性暴雨雨带的移动方向和速度,通过线性外推,可以对暴雨进行临近预报,在暴雨的预警方面,能提供一些有益的帮助,但预报的准确性随预报时效的增加而降低。

2) 参数的选择对暴雨的跟踪、预报有一定的影响,在条件允许的情况下,尽量选取时间步长为 6 min 的两个时刻的雷达资料进行暴雨跟踪与预报,矩形网格的大小以 20 km × 20 km 为宜。

3) 利用反射率因子 CAPPI、雨强 CAPPI 和 CR 得到的 TREC 矢量场基本一致,前两者预报结果的定量评价几乎完全相同,CR 的预报结果稍差于前两者,但可以得到未来时刻最强反射率因子的一些信息。

4) 将连续 5 个时刻的 TREC 矢量场进行拟合作为雨带的移动矢量,其预报结果的准确性比采用一个时刻的 TREC 矢量场要高一些。预报误差同样随着预报时效的增加而增大,雨带强度和形状变化是造成预报误差的主要因素,对不同降水系统雨带的发展演变规律研究是今后临近预报工作的重点。

5) 雨带分布与移动方向一致的暴雨过程,在暴雨落区易形成较长时间的降水,1 h 累积雨量较大;台风暴雨的移动类似于兰金的中尺度气旋模式,由于台风暴雨移动方向和速度的多变性,其预报的准确性要低于组织性较强的暴雨过程。

需要指出的是,TREC 方法对雷达回波的矩形网格划分是随意的,其物理意义不够明确,往往将一个大的雨带分在几个网格内,或者将不同的降雨云团划分在一个网格内,从而破坏了暴雨结构的整体性,但这种方法只需要两个时刻的雷达回波资料,运行时间快,是一种简便的临近预报方法。利用多普勒雷达进行暴雨的预报预警是灾害性天气预报预警的重要组成部分,在今后的工作中,还应进一步研究 β -中尺度暴雨雨带的识别方法及其发展演变规律。

参考文献

- [1] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm Identification, tracking, Analysis, and Nowcasting radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 1(6):785-796.
- [2] Johnson J, Mackeen P A, Witt E M, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13:263-276.
- [3] French M, Krajewski W. Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *J Hydrology*, 1992, 137:1-31.
- [4] Rinehart R, Garvey E. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 1978, 273: 287-289.
- [5] Tuttle J D, Foote G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *J Atmos Ocean Tech*, 1990, 7:218-232.
- [6] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展. *应用气象学报*, 2004, 15(4):754-766.
- [7] 杨传风. 强降雨回波系统与地面中尺度系统的分析. *山东气象*, 1994, 14(4):13-16.
- [8] 应冬梅, 郭艳. 江西省颯线的雷达回波特征分析. *气象*, 2001, 27(3):42-45.
- [9] 杜秉玉, 官莉, 姚祖庆, 等. 上海地区强对流天气短时预报系统. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2):242-250.
- [10] 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.
- [11] 陈家慧, 张培昌. 用天气雷达回波资料作临近预报的 BP 网络方法. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2): 284-287.
- [12] 汤达章, 周咏梅, 胡明宝. 雷达回波跟踪的两种方法及精度比较. *应用气象学报*, 1994, 5(3):304-311.
- [13] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS—an Evolving Nowcasting System. Technical Note, No. 100, Hong Kong Observatory, 2000.
- [14] Mueller C K, Saxen T, Roberts R D, et al. NCAR auto-nowcast system. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [15] 庄微, 刘黎平, 王楠. 新疆地区一次对流性降水的三维中尺度风场研究. *应用气象学报*, 2006, 17(4):444-451.
- [16] Zmic D S, Burgess D W, Hennington L D. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 1985, 2(4): 424-438.

Application of Doppler Radar Data to Nowcasting of Heavy Rainfall

Wang Gaili¹⁾²⁾ Liu Liping¹⁾ Ruan Zheng¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract

Severe rainstorm, typhoon heavy rain and so on are the main precipitation system causing disastrous flood. In order to reduce the occurrence of meteorological disasters, timely forecasting and warning of severe weather are needed. The development on rainstorm nowcasting with tracking radar echoes by correlation (TREC) is described, which is also applied in Hong Kong rainstorm nowcasting system SWIRLS (Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized System) and NCAR's ANC (Auto-NowCast). TREC technique is applied to two successive CAPPI reflectivity fields. The first field is divided into a number of equally sized two-dimensional arrays of pixels. The arrays of reflectivity values are then cross-correlated with the arrays in the second field. The correlation coefficient R is calculated repeatedly for all possible arrays found at the second field to determine which array results in the highest correlation, and the center of this second array is the end point of TREC vector. Based on the Doppler radar data from the mosaic by Guangzhou and Meizhou radar, Wenzhou single radar, effects on the tracking result are discussed which are produced by the parameters variation including interval between two CAPPI reflectivity fields, the size of the boxes, the threshold of rain intensity etc. In order to correct noisy TREC vectors and improve the consistency of the resulting vector field, a two-step procedure is used: The purpose of the first step is to minimize the influence of apparently incorrect TREC vectors. Vectors with zero velocity (often caused by ground cluster) are replaced by vectors that represent the average of the neighboring vectors. Objective analysis is used in the

second step to produce a continuous gridded vector field, which is used in rainstorm nowcasting. The nowcasting result is validated by making use of observational data of radar. The results show that the TREC vectors calculated from rain intensity CAPPI, reflectivity CAPPI and CR are consistent with each other, and they are capable of indicating the directory of rainstorm displacement. The result of extrapolation forecast from CR is slightly below the two others, and forecast accuracy of the three kinds of data are decreasing with forecast lead time, which can be improved by fitting the successive five TREC vectors. Though TREC technique segments radar imagery lacks of clear physical meaning, it is still valuable for forecasting of storm rainfall and typhoon rainstorm with complex structure and identified difficultly. Both single radar data and mosaic data are used in the research, which is helpful for forecasting severe weather utilizing Doppler weather radar observation net.

Key words: TREC; nowcasting; extrapolation forecast

国家 973 项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究” 专家组扩大会议和后 3 年启动会议在京召开

为了突出对 β -中尺度暴雨机理的研究,提高暴雨监测与预测水平,总结前两年研究工作进展,落实项目后 3 年工作任务并制定研究工作的总体目标,2007 年 5 月 22—23 日,国家 973 项目“我国南方致洪暴雨监测与预测理论和方法研究”专家组扩大会议和后 3 年启动会议在北京召开。会议全面研讨并落实了课题责任制,调整了课题任务书,突出了研究重点和有应用前景的创新成果的形成,并围绕项目的总体目标对后 3 年的研究工作做出了总体的部署。

项目首席科学家、中国气象科学研究院院长张人禾研究员介绍了前两年的研究进展和后 3 年的工作目标与任务。他说,突出对 β -中尺度强对流天气的研究是该项目的主要研究任务和研究目标,研究 β -中尺度强对流系统三维结构、形成和发展机理及其大尺度背景条件和可预报性等科学问题,将作为该项目后 3 年的研究重点,并给予重点支持。在我国南方实施先进的暴雨野外科学试验,获取 β -中尺度观测资料是本项目能否取得突破的关键。因此,后 3 年必将加大对野外试验与 β -中尺度强对流系统研究的支持力度,确保该项目最终目标与研究任务的完成。

会上,倪允琪教授介绍了项目正在组织和后 3 年将要实施的“我国南方暴雨野外科学试验(SChEX 计划)”,明确课题研究项目与项目组织野外试验之间的配合和相关协调工作。国家科技部基础司张峰处长、中国气象局科技发展司郭亚曦司长、专家组组长张人禾研究员、副组长周秀骥院士、陶诗言院士、吴国雄院士、李泽椿院士、陈运泰院士、赵柏林院士、黄荣辉院士、陈联寿院士、许健民院士及来自中国气象科学研究院、国家卫星气象中心、南京大学、中国科学院大气物理研究所、中国科技大学的课题负责人针对后 3 年的计划与目标进行深入讨论并提出了宝贵意见和建议。会议强调:项目后 3 年的工作重点要紧扣国家项目目标,围绕能在中尺度暴雨研究上取得国际一流的研究成果为突破口,加强各课题之间有机联接,融合多种探测资料,做好研究成果集成,力争在中国暴雨预报水平的提高上发挥重要作用。

(中国气象科学研究院 王德英)