

李建通, 高守亭, 郭林. 2011. 基于雷达回波最大重叠率的一种临近降水预报方法 [J]. 大气科学, 35 (3): 519–530. Li Jiantong, Gao Shouting, Guo Lin. 2011. The nowcasting method of precipitation based on the maximum overlap rate of radar echo [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 519–530.

基于雷达回波最大重叠率的一种临近降水预报方法

李建通^{1,2,3} 高守亭³ 郭林¹

1 厦门市气象局, 厦门 361012

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

摘 要 基于天气雷达的临近降水预报是雷达短时预报业务系统的重要组成部分, 本文在回顾雷达临近降水预报技术发展的基础上, 充分考虑新一代天气雷达高时间、空间分辨率的优点, 提出两个相邻时刻雷达回波具有最大重叠率的移向、移速是与降水系统整体的移向、移速密切相关的论点, 再用此移向、移速对当前雷达回波进行平移, 最后采用九点平均的回波生消模型进行订正, 形成逐次外推预报, 利用时间权重合成法对每 6 分钟的逐次外推预报合成 1 小时的临近降水预报场。文中使用合肥、厦门和南昌雷达站的数据进行计算、预报和检验, 结果表明: 两个时刻的最大重叠率移向、移速可以反映降水系统整体的移动特征, 移向、移速的计算结果和熟练预报员的主观预报相一致; 利用生消模型对平移后的降水回波进行订正可以反映实际降水中心和分布情况; 采用时间权重合成法, 对每 6 分钟的降水预报合成的 1 小时的降水分布场和实际的降水分布场也具有较好的一致性。

关键词 最大重叠率 临近降水预报 时间权重合成 初值场

文章编号 1006-9895 (2011) 03-0519-12

中图分类号 P456

文献标识码 A

The Nowcasting Method of Precipitation Based on the Maximum Overlap Rate of Radar Echo

LI Jiantong^{1,2,3}, GAO Shouting³, and GUO Lin¹

1 Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storm, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The nowcasting method of precipitation based on the maximum overlap rate is an important part of short-term forecast radar system. On the basis of recalling the development of the radar nowcasting technology of precipitation, considering the merits of a new generation of weather radar with high spatial and temporal resolution, this paper proposes that within a short time interval, the moving direction and speed of the two adjacent radar echoes with the greatest overlap rate are also the moving direction and speed of the precipitation system. The current radar echoes are translated by calculating the moving direction and speed, and are revised by use of nine-point average change amounts of echo dissipation model to form extrapolation forecasting; by use of the time weights synthesis method, the extrapolation forecasting every six minutes is synthesized to form the precipitation nowcasting field. In order to

收稿日期 2010-06-02, 2010-10-15 收修定稿

资助项目 科技部社会公益研究专项 2002DIB200640

作者简介 李建通, 男, 理学博士, 主要从事大气探测与大气遥感。E-mail: qxjxmljt@xm.gov.cn

test the above-mentioned methods, the data at Hefei, Nanchang, Xiamen radar stations are used to carry out the calculation and prediction. The results show that: the moving direction and speed with the maximum overlap rate at two moments may reflect the overall movement characteristics of precipitation system, the calculation result is consistent with the subjective forecasting of forecasters and moreover it is objective, fine, and stable; using the growth and decay model to revise the translated echo can reflect the actual precipitation change; the 1-hour precipitation distribution which is synthesized by using precipitation forecasting every six minutes with the time weights synthesis method is in good agreement with the actual one.

Key words maximum overlap rate, precipitation nowcasting, time weight synthesis, initial field

1 引言

半个多世纪来,基于天气雷达观测的临近预报提出了很多理论和方法。Ligda (1953) 提出使用雷达回波数据线性外推预报(也称为拉格朗日持续性预报)降水的概念。拉格朗日持续性预报是在一个预报区域内以定常速度和方位来平移当前的雷达图像,从而获得下一时次雷暴位置的预报。Rinehart and Garvey (1978) 提出使用交叉相关法跟踪雷达回波,并给出了交叉相关的回波跟踪方法(Tracking Radar Echoes by Correlation),称为 TREC 算法。该算法在两个连续的反射率场中寻找在一个规定大小的矩形区域内最大相关系数或最小绝对误差的最佳匹配,从而获得风暴体回波内部各个子区域的移动矢量。该方法要求流场变化缓慢,但实际回波由于变化快和受地物遮挡等原因,导致 TREC 分析的速度场经常存在不连续等现象。在 TREC 的基础上, Li et al. (1995)、Bellon and Zawadzki (1994) 提出了以连续性方程约束的 TREC 算法,称为 COTREC (Continuity of TREC Vectors) 算法。此算法是以二维连续方程作为强约束条件,利用观测距离和计算位移构造价值函数,采用变分技术,通过连续时刻图像中平均反射率的差异分析回波的发展和衰减。Lai (1999) 则在 TREC 算法得到运动矢量的基础上,使用半拉格朗日法进行外推预报。

在国内,张沛源(1991)开展了雷达在短时预报中应用的研究,并给出了外推预报和相似预报两种短时预报方法的具体步骤。肖艳娇等(1998)通过对风暴形状的几何推理来处理外推过程中的分裂和合并。陈家慧和张培昌(2000)探讨了人工神经网络方法用于临近预报的可行性。针对中国长江中下游的梅雨锋暴雨,王改利和刘黎平(2005)进一步改进交叉相关法,使算法的各种参数配置更加适合梅雨锋暴雨的特点。在 TREC 技术基础上,张亚

萍等(2006)发展了一种利用雷达反射率差分图像(时间梯度图像)追踪回波运动的方法(DITREC)。陈明轩等(2007)通过对交叉相关外推预报算法进行质量控制,使得回波移动矢量追踪的质量得到明显改善。

上述的外推都是基于对两块区域的相关分析,与此同期一起发展的还有基于前后两个时次回波块质心的质心跟踪法。与交叉相关法相比,单体质心法能较好地识别和追踪较小的孤立单体,并且能够提供单体更详细的特征数据。20 世纪 70 年代起,美国国家强风暴实验室(NSSL)开发了一系列关于质心的算法,它先从雷达反射率数据中识别出风暴单体,后追踪和外推单体质心的运动。Crane (1979) 通过多张平面扫描(PPI)数据的二维识别结果,再做三维空间关联运算,形成三维体积元(Volume Cells),将单体质心法的研究往前推进了一大步。Bjerkaas and Forsyth (1979)、Austin and Bellon (1982)、Rosenfeld (1987)、Einfalt et al. (1990)、Brémaud and Pointin (1993)、Ding et al. (1993)、Dencœux and Rizand (1995) 从独立降水回波单体的速度、形状、强度、大小等特征参数进行单体的跟踪。

Dixon and Wiener (1993) 结合交叉相关法和质心法用于雷暴识别跟踪分析和预报(Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting, 简称 TITAN 方法)。Wilson et al. (1998)、Johnson et al. (1998) 在回波的分裂和合并处理方面作了大量的工作,进一步深化了这些算法,并开发了在业务上广泛应用的 TITAN 和 SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) 算法。Stumpf (2003) 提出了一个在风暴识别、追踪前实施的自适应中值滤波算法,并应用到 SCIT 中。在国内,梁明珠等(2005)首先利用多普勒天气雷达体扫数据资料计算垂直累积液态含水量

(VIL), 用逐步增大初始阈值法识别 VIL 中心区, 然后利用动态预测面积比法、分类跟踪法以及中心区面积守恒原则相结合的方法对中心区进行跟踪, 最后运用线性最小二乘法、线性集成法和线性外推法对中心区的重心位置进行临近预报。陈明轩等 (2006) 也利用 TITAN 方法对天津新一代天气雷达回波资料进行了分析。

前面所述的方法都是基于平流 (advection methods) 的方法, 物理过程的概念不够明确, 它们所提供降水场未来的动力发展信息是非常有限的, 预报效果依赖于降水的类型。从物理学的角度, 数值天气预报方法是较好解决物理过程的方法。Pierce et al. (2000)、Fox et al. (2001) 提出把数值天气预报的信息与气旋生命周期相结合单体跟踪法; Boudevillain et al. (2006) 提出了一个基于雷达体扫数据生成的 VIL 数据和回波生消的模式进行临近预报的方法。

Wolfson et al. (1999) 提出了一个“风暴增长衰减追踪器”, 设计了一个椭圆滤波器来识别和追踪风暴包络 (Storm Envelope), 并结合交叉相关追踪器, 给出风暴系统的增长和衰减趋势。Handwerker (2002) 开发了一个三维风暴跟踪器 (TRACE3D), 该方法先利用一些特征判据进行单体识别, 然后根据前后两次观测得到的特征参数判断单体的合并和分裂, 利用平均权重计算各单体的移动速度, 新生单体的移速由其它单体的平均移速确定, 而下一时次各单体位置由各自的移速估计确定。Lakshmanan et al. (2003) 提出了一种使用邻域均值聚类法进行风暴识别的新方法, 针对不同尺度的风暴进行识别、追踪和预警。Xu et al. (2005) 和 Lakshmanan (2007) 提出了用统计方法的时空动态模型来预报风暴的移动、演变。

综上所述来看, 基于天气雷达的临近降水预报, 核心问题是如何从两个相邻时刻的雷达观测数据获取降水系统的移向和移速, 并结合回波的生消规律做出临近预报。本文提出利用前后两个时刻回波场的重叠率信息获取降水系统的移向、移速, 并结合九点生消模型开展临近降水预报。

2 基本原理

2.1 基本假定和重叠率

假设有两个时刻的雷达回波, 将前一时刻雷达

回波按一定的移向、移速平移到当前时刻回波上, 在同一空间点上, 如果这两个时刻在该点上都有雷达回波数据, 那么定义该点为重叠点。两张回波所有重叠点个数和当前时刻回波总个数的比, 称为两个时刻回波的重叠率。

为了开展较大范围的天气尺度背景下的临近降水预报, 采用做如下两点假设:

(1) 在一个比较小的时间间隔内, 大气中空气微团和液态降水的水平运动是在天气背景下的流场推动下完成的。

(2) 在某一几何面上 (如雷达低仰角的圆锥扫描面、组合平面或 3 km 的等高平面), 在有限的时间间隔里 (1 个小时), 雷达观测面内的回波生消量对总量来说是比较小的, 对移向、移速不构成重大影响。

当降水回波不存在生消时, 当前时刻回波可以由前一时刻回波平移得到, 平移后两张回波图完全吻合 (重叠率为 100%), 平移的方位和距离就是降水系统的移向、移速。也就是说最大重叠率信息是与降水系统的移向、移速密切相关, 具有最大重叠率的移向、移速是与降水系统的移向、移速完全一致的。当然, 雷达降水回波随时间推移, 其生消总是存在的, 但在较短时间的间隔内, 其生消总量是有限的, 所以在降水系统的移向、移速上的重叠率无法达到 100%。尽管如此, 降水系统的移向、移速和具有最大重叠率的移向、移速也是基本一致的。因此, 通过计算两个时次雷达回波的最大重叠率, 就可以获取降水系统的移向、移速。

为此, 本文研究中把最大重叠率作为获取降水系统移向、移速的依据, 同时也是作为临近外推降水移向、移速的依据。

2.2 移向、移速计算及外推

提取最大重叠率以及获取降水系统移向、移速的具体计算过程如下:

(1) 从两个相邻时刻的雷达体积扫描 (VOL) 数据提取经过质量控制的低仰角扫描 (PPI) 数据 (本文为 1.5 度仰角), 并计算两个观测时刻的时间差 ΔT 。

(2) 假设降水系统的 X 轴和 Y 轴方向分量的最大速度 ($V_{\max}$), 那么在 X 轴和 Y 轴方向的最大偏移量为 $X_X = Y_Y = \Delta T \times V_{\max}$ 。

由于临近预报的时效短, 为了提高预报速度,

减少不必要的计算,需事先给定降水在 X 轴和 Y 轴方向上最大移动速度。如果在 X 轴和 Y 轴上设定最大移动速度为 $V_{\max} = 50 \text{ km/h}$, 那么, 降水系统在 45° 方位上最大移动速度允许达到 70 km 左右。从大量数据计算结果来看, 以上的设定基本可以满足业务的需求。

(3) 在 $(-X_X < X_1 < X_X)$ 和 $(-Y_Y < Y_1 < Y_Y)$ 区域内, 分别取 (X_1, Y_1) 不同偏移量的组合作为系统移向、移速, 依次计算各种组合情况下两张回波图的重叠率, 保留最大重叠率时的最大的偏移量 (X_1, Y_1) 。

(4) 通过偏移量 (X_1, Y_1) 和时间差 ΔT , 计算移动速度和方位。

有了前后两个时刻降水系统的移向、移速, 就可以用当前的移向、移速外推相同时间间隔的雷达回波图位置。

外推预报回波各点的回波强度可以用回波生消模型进行预报。本文采用预报格点周围九个点前后时刻的反射率因子平均变化量作为当前格点反射率因子的生消变化订正量。那么, 预报反射率场中格点 (x, y) 的反射率值 $C_{(x, y)}$ 是将当前时刻格点的数值 $B_{(x, y)}$ 加上订正量获得。该订正值是预报格点 (x, y) 周围 (3×3) 网格九点上前后两个时刻相应反射率因子变化量的平均值。

$$C_{(x, y)} = B_{(x, y)} + \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 (B_{(x-i, y-j)} - A_{(x-i, y-j)}), \quad (1)$$

其中, $A_{(x-i, y-j)}$ 和 $B_{(x-i, y-j)}$ 是前一时刻和当前时刻坐标 $(x-i, y-j)$ 处的雷达观测值。

2.3 雷达估测降水量的逐时计算

地面雨量站测量的 1 小时降水量, 是该小时内雨量站处降水强度按时间积分而成。因此, 雷达估测雨量站处的小时降水量也应由该小时内雷达估测强度按时间积分获得, 但由于天气雷达观测该处是不连续的, 所以雷达估测的降水量只能由不同时刻的降水强度按时间权重累加获得。同理, 对于 1 小

时的临近降水预报, 就是将预报时段内不同预报时刻的降水强度按时间权重进行合成, 形成一个小时降水的临近预报。例如: 在某 1 小时内有三个时刻的雷达预报数据 (如图 1 所示)。其相应的预报时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 , 那么, 在该小时内的降水量是由三段 (A、B、C) 雷达预报值累积获得的, 其中 a 、 b 分别为 (t_1, t_2) 、 (t_2, t_3) 线段的中点。 t_1 时刻预报值用于预报 $(0, a)$ 时段的降水量, 即 t_1 的预报降水量为 A; t_2 时刻预报值用于预报 (a, b) 时段的降水量, 即 t_2 的预报降水量为 B; t_3 时刻预报值用于预报 $(b, 60)$ 时段的降水量, 即 t_3 的预报降水量为 C, 则一个小时预报的降水量为 $A+B+C$ 。类似的原理, 如果一个小时内有 N 次预报数据, 那么预报的降水量就是用 N 个时段的预报数据按时间权重进行平均而生成。

为了推导和说明的方便, 这里采用雷达回波上的一点进行讨论。 $t_1, t_2, t_3, \dots$ 代表雷达预报该点的时刻 (单位: min), $R_1, R_2, R_3, \dots$ 代表雷达预报该点的雨强值 (单位: mm/h), R 代表该点 1 小时的雨量值。

(1) 当只有一个时刻的预报数据时, 则该点数值就是该小时的预报值,

$$R = R_1. \quad (2)$$

(2) 当有两个时刻预报数据时, 则一个小时的预报雨量值为:

$$R = \frac{\left[t_1 + \frac{1}{2} (t_2 - t_1) \right] \times R_1}{60} + \frac{\left[60 - t_2 + \frac{1}{2} (t_2 - t_1) \right] \times R_2}{60}. \quad (3)$$

(3) 当有三个时刻的预报数据时, 则一个小时的预报雨量值为:

$$R = \frac{\frac{1}{2} (t_1 + t_2) \times R_1}{60} + \frac{\frac{1}{2} (t_3 - t_1) \times R_2}{60} +$$

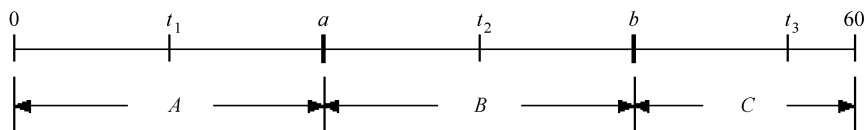


图 1 时间权重平均法合成示意图

Fig. 1 The sketch map of time-weighted average method

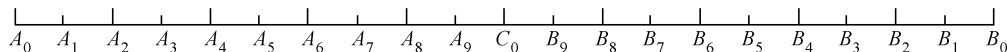


图 2 临近外推预报示意图

Fig. 2 The sketch map of extrapolation nowcasting

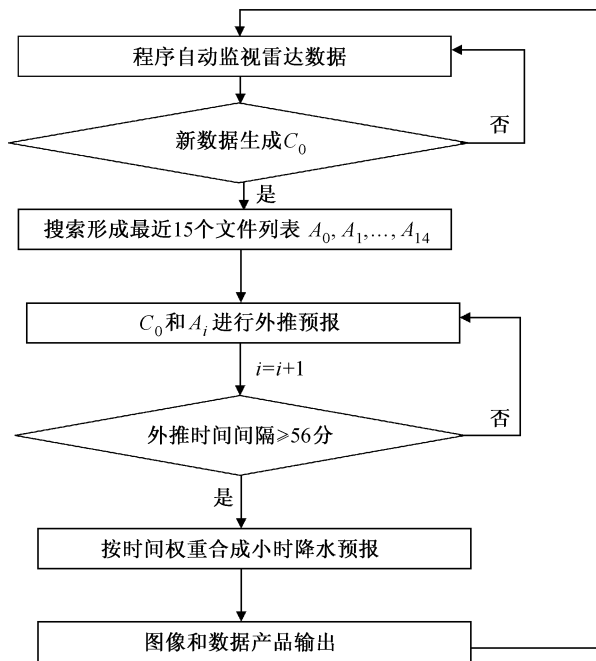


图 3 临近降水预报流程图

Fig. 3 Procedure map of precipitation nowcasting

$$\frac{\left[60-\frac{1}{2}\left(t_3+t_2\right)\right] \times R_3}{60} . \quad(4)$$

(4) 类似地, 当有 N 个 ($N \geqslant 3$) 时刻预报数据时, 则一小时的预报雨量值为:

$$R=\left\{\frac{1}{2}\left(t_1+t_2\right) R_1+\frac{1}{2} \sum_{n=3}^N\left[\left(t_n-t_{n-2}\right) R_{n-1}\right]+\left[60-\frac{1}{2}\left(t_{N-1}+t_N\right)\right] R_N\right\} / 60 . \quad(5)$$

2.4 1 小时降水量的预报

新一代天气雷达在降水观测模式 (VCP21) 下, 约每 5~6 分钟左右完成一次体积扫描数据 VOL。为了表述方便, 假设每 6 分钟完成一次 VOL 扫描, 那么对于当前观测时刻数据 C_0 , 在其前 1 个小时内共有 10 个 VOL 数据 ($A_0, A_1, A_2, \dots, A_9$)。这里, 将当前时刻和 A_9 构成一个相邻时刻回波的预报组 (C_0, A_9), 那么, 按照文中 2.2 节中的方法, 可以预报与 (C_0, A_9) 具有相同时间间隔的下一时刻回波反射率场 B_9 。当前时刻 C_0 分别和 $A_8, A_7, \dots, A_0$ 构成外推组, 可以生成相对应

不同间隔的 $B_8, B_7, \dots, B_0$ 的预报 (如图 2 所示)。

在获取每间隔 6 分钟的预报反射率场 ($B_9, B_8, \dots, B_0$) 后, 利用统计的反射率因子和降水量关系将其转化为降水分布场, 按照 2.3 节中的时间权重法合成一个小时的降水预报场。

图 3 给出程序自动监测数据到形成临近降水预报的业务流程。

3 临近降水预报方法应用分析

评估检验围绕三个方面进行比较, 最大重叠率计算的移向、移速与实际移向、移速的比较, 外推预报时刻的强度分布场和实际时刻观测强度分布场的比较, 以及外推预报 1 小时降水场和实际降水场的比较。

为了检验方法的适应性, 分别对合肥、南昌和厦门三个雷达站采集的不同降水过程数据进行检验, 三部雷达均为 CINRAD/SA 型号, 按本文 2.2 节中的方法计算移向、移速 (坐标原点为左上角, X 轴向东, Y 轴向南, 正北为 0 度, 顺时针增加)。

3.1 移向、移速的检验分析

图 4~6 是合肥、南昌和厦门三个雷达站计算初始时刻的雷达低仰角的平面扫描 (PPI) 图像。表 1~3 是三个雷达站相应的每间隔 6 分钟左右计算的移向、移速和重叠率的数据。为了说明方便, 这里取其中一个小时的计算情况进行说明 (其它计算时次的结果和该时次基本一致, 由于篇幅的关系, 从略)。

综合分析表 1~3 以及图 4~6 可知:

(1) 雷达回波的重叠率随两个观测时间间隔的增加总体呈减小的趋势, 但在 1 小时的间隔内, 其重叠率还是较高的。对于系统性较强的降水过程 (如图 4、5), 在有限的时间内 (不大于 1 小时), 前 10 分钟的重叠率可以达到 80% 左右, 1 小时间隔的重叠率依然较高, 达到 55% 左右, 且二者的重叠率变化幅度小, 小于 30%; 而对于系统性较弱 (如图 6), 前 10 分钟的重叠率在 75% 以下, 1 小时间隔的重叠率较低, 小于 40%, 且二者的重叠率变化幅度较大, 可以达到 35% 左右。从总的来看, 在一个小

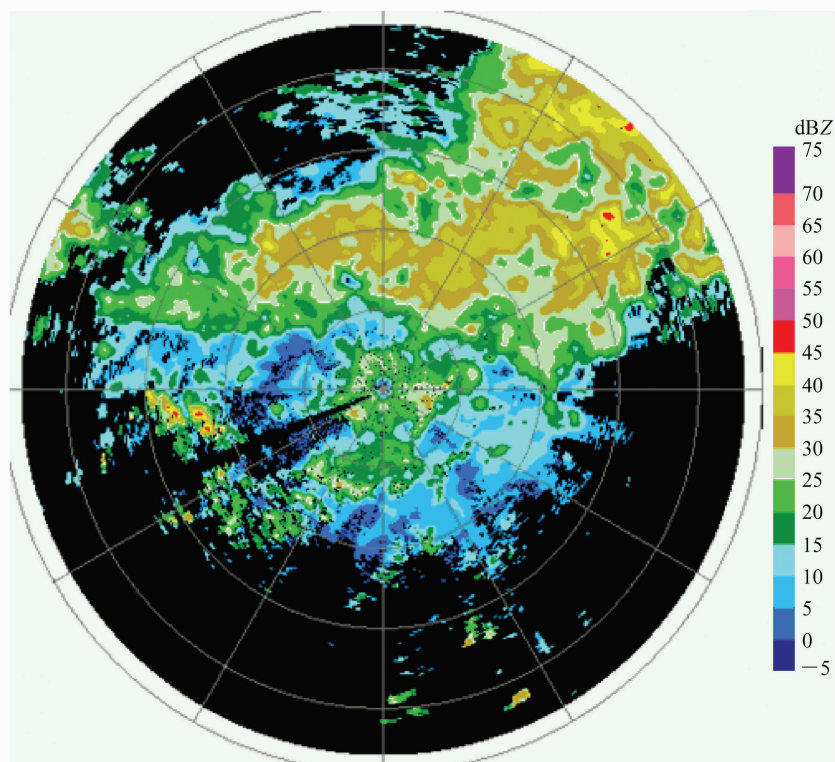


图 4 2003 年 6 月 29 日 22:58 合肥雷达观测图像

Fig. 4 Observation image of Hefei radar at 2258 UTC 29 Jun 2003

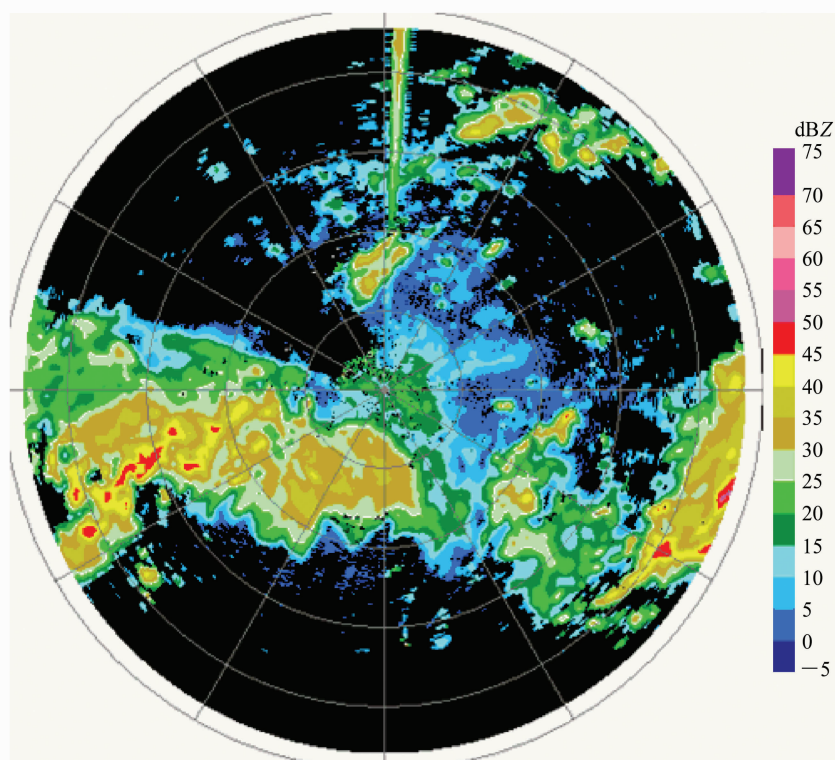


图 5 2002 年 6 月 28 日 00:02 南昌雷达观测图像

Fig. 5 Observation image of Nanchang radar at 0002 UTC 28 Jun 2002

表 1 2003 年 6 月 29 日 22:58 (协调世界时, 下同) 合肥雷
达回波计算移向、移速的结果

Table 1 Results of direction and speed of movement calculat-
ed by Hefei radar echo (2258 UTC 29 Jun 2003)

观测间 隔/min	偏移量/km		移动速度/ km·h ⁻¹	移动方 位/(°)	重叠率
	Y 轴	X 轴			
5	-1	5	61.2	78.69	85.2%
12	-2	12	60.8	80.54	79.2%
18	-3	18	60.8	80.54	73.4%
24	-5	24	61.3	78.23	69.5%
29	-7	29	61.7	76.43	66.3%
35	-8	35	61.5	77.12	64.6%
40	-8	40	61.2	78.69	61.7%
46	-9	46	61.1	78.93	58.4%
51	-9	51	60.9	79.99	56.4%
57	-13	57	61.5	77.15	55.4%

表 2 2002 年 6 月 28 日 00:02 南昌雷达回波移向、移速计
算结果

Table 2 Results of direction and speed of movement calculat-
ed by Nanchang radar echo (0002 UTC 28 Jun 2002)

观测间 隔/min	偏移量/km		移动速度/ km·h ⁻¹	移动方 位/(°)	重叠率
	Y 轴	X 轴			
5	0	3	36.0	90.00	88%
11	0	7	38.2	90.0	81.8%
17	1	10	35.5	95.71	76.7%
22	1	14	38.3	94.59	73.5%
28	2	17	36.7	96.71	70.7%
33	4	19	35.3	101.89	69.2%
39	6	18	29.2	108.43	67.7%
44	7	23	32.8	106.93	65.6%
49	8	20	26.4	111.80	64.5%
54	8	23	27.1	109.18	63.8%
60	9	26	27.5	109.09	62.0%

时内, 具有最大重叠率的移向、移速和降水系统移向、移速密切相关, 把重叠率作为判断降水系统移向、移速的依据在客观上可行的。

导致重叠率随时间增加而降低的原因主要有两个: 一是该方法无法预报背离移动方向的新降水回波, 二是由于系统的移动, 一些降水回波移出雷达覆盖区域。

(2) 从三张表上可以看到: 无论对哪一部雷达, 在一个小时内, 不同时间间隔的系统估计的移向和移速数值大小略有变化, 但总体是基本是一致

表 3 2006 年 3 月 25 日 22:30 厦门雷达回波计算移向、移
速的结果

Table 3 Results of direction and speed of movement calculat-
ed by Xiamen radar echo (2230 UTC 25 Mar 2006)

预报类型	观测间隔/min	移动速度/ km·h ⁻¹	移动方 位/(°)	重叠率
客观外推	6	53.9	68.20	73.7%
	12	52.2	73.30	56.8%
	18	52.7	71.57	45.7%
	24	50.6	98.53	41.1%
	30	50.4	83.16	37.8%
	0~30 平均	52	79	/
	36	50.2	84.29	37.0%
	42	38.0	109.80	37.8%
	48	41.2	104.04	39.5%
	54	42.9	100.44	39.9%
	60	50.0	101.53	39.1%
	30~60 平均	44.5	100	/
	0~60 平均	48.2	89.5	/
	主观外推 0~60	50	85~90	/

的。说明此方法计算的结果是稳定的, 可以反映整体降水回波移动的一致性。另外, 每间隔 6 分钟左右的计算会发生一些小的变化, 这是与降水中不同回波块和系统移向、移速的不完全相同的客观事实相一致, 也可以反映实际降水移动过程中的一些变化。总体而言, 该方法计算的移向、移速客观、细致反映了降水的演变趋势。

一般而言, 在降水系统发展和成熟阶段, 系统的移动速度较为稳定, 且移动速度也较消亡阶段快。因此, 通过比较前后不同时间间隔的移向、移速变化, 特别是最近一个小时中前半小时和后半小时移向、移速的变化, 也可以作为对整个降水系统的增强和减弱的一个判据。

(3) 在实际的短时预报业务中, 短时预报员往往通过估算参考点在相邻时次雷达回波中位移和时间间隔进行主观外推预报。不同的预报员采用参考点也不尽相同, 有的以强回波中心为判据, 有的以回波前沿或后端等作为判据。同时, 由于时间的限制, 预报员无法精确测量参考点的距离变化, 也使得预报的结果主观性较大, 不同预报员的预报结果往往也是不一样的。实际业务表明, 熟练短时预报员的主观预报结果是比较可信的。

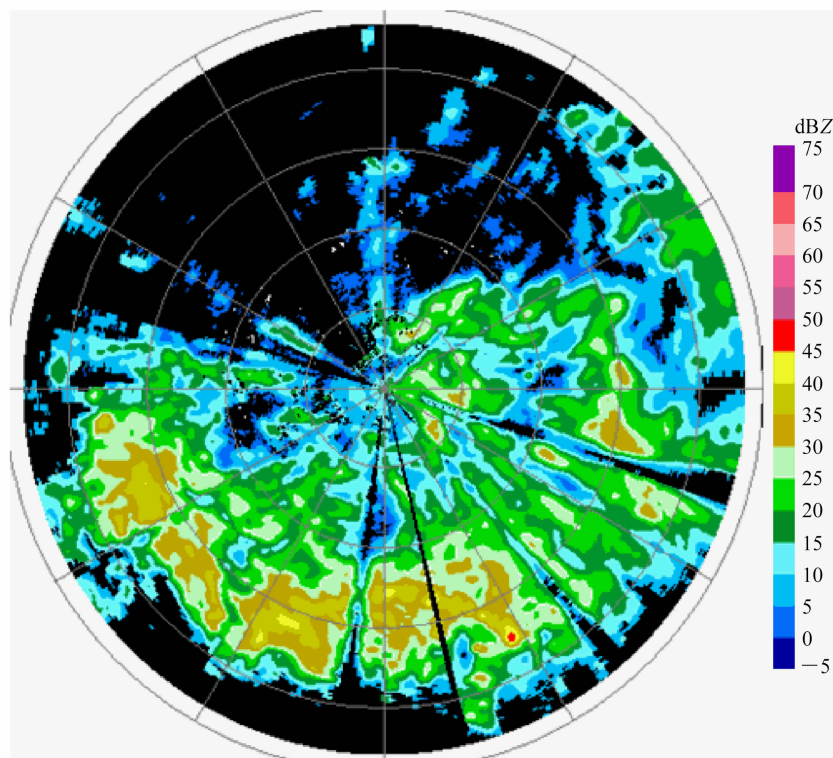


图 6 2006 年 3 月 26 日 22:30 厦门雷达观测图像

Fig. 6 Observation image of Xiamen radar at 2230 UTC 26 Mar 2006

从上述 (1) 和 (2) 可知, 该方法计算的降水系统移向、移速的趋势和实际降水系统移动的总趋势是一致的, 也能对降水过程中的变化作出响应, 但计算结果和实际熟练短时预报员的主观判断是否一致仍不确定。

为了评估客观计算的移向、移速和实际是否一致, 这里将客观计算的结果和熟练预报员的主观估算结果进行比较 (如表 3)。数据表明: 无论是在半小时, 还是一小时的移向、移速, 计算结果和熟练预报员的实际判读基本一致。因此, 客观计算的结果是可信, 也是可用的。

相比于预报员的主观估算, 该方法克服了短时预报员主观因素的影响, 大大降低了不同预报员主观预报中的随机性和不确定性, 使得计算结果具有客观性强、稳定性好的优点。

3.2 强度预报图 and 实际观测图的比较

为了检验临近降水预报的效果, 我们以合肥 2003 年 6 月 29 日 22:58 作为临近预报的起点, 预报未来 1 小时的降水量分布, 即 2003 年 6 月 29 日 23:00~24:00 的小时降水量分布。具体按照 2.2

节中的方法进行降水预报, 图 7 给出部分不同时刻的预报图和对应于预报时间的雷达实际观测图。其中图 7a-d 是预报图, 图 7e-h 是与预报图相应的雷达观测图 (由于篇幅的关系, 未能给出每间隔 6 分钟的图像)。

从图 7 可以看出:

(1) 在预报移动的下游方向上, 外推回波的范围和实际回波的位置基本一致, 但较强降水中心位置和实际的观测有一定的偏差。造成这种偏差的主要原因是: 较强回波块的移向、移速和降水整体的移向、移速存在一定的差异造成的, 随着时间的推移, 强回波块位置 and 实际位置的偏离程度也变大。这也要求在进一步优化降水临近预报时, 有必要对强回波的传播速度进行单独处理。

(2) 在预报移动的上游方向上, 由于缺乏相应的模型进行预报, 对该区域新产生降水回波无法预报, 使得预报的回波强度较弱, 甚至没有回波。

总的来看, 每间隔 6 分钟预报的强度范围以及中心位置还是可用的。另外, 在 1 小时时间间隔里, 由于降水系统移动速度是有限的, 因此, 新生

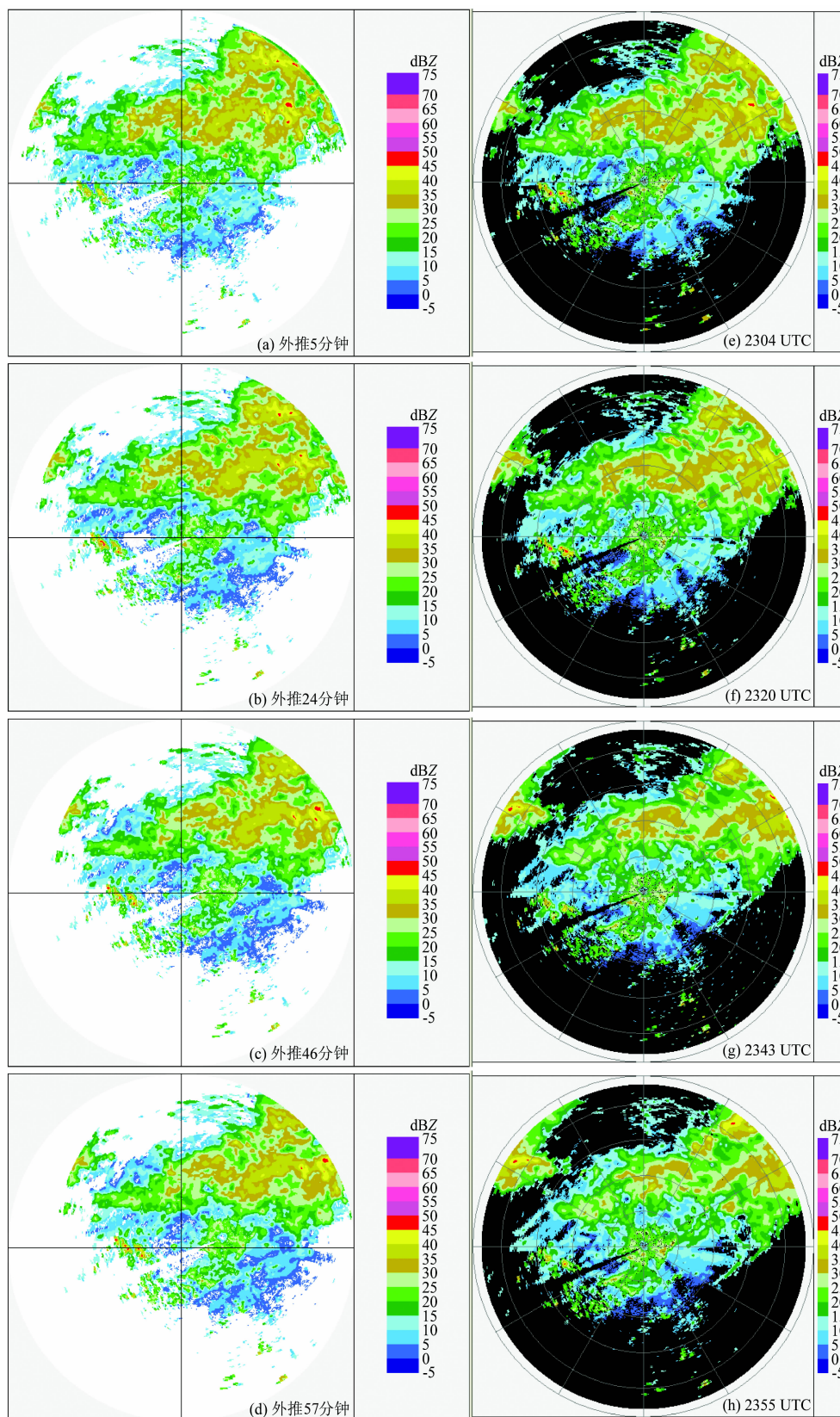


图 7 2003 年 6 月 29 日 22:58 外推预报 (a-d) 和实际雷达观测 (e-h) 的比较

Fig. 7 Comparison between (a-d) the extrapolation forecasting at 2258 UTC 29 Jun 2003 and (e-h) the actual observation

2003年6月29日23:00~23:59 雨量分布图 (合肥雷达站)

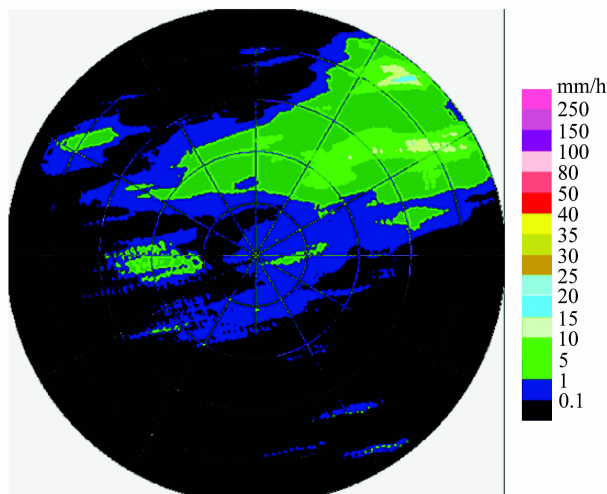


图 8 1 小时的临近降水预报场

Fig. 8 1-hour precipitation nowcasting field

2003年6月29日23:00~23:59 雨量分布图 (合肥雷达站)

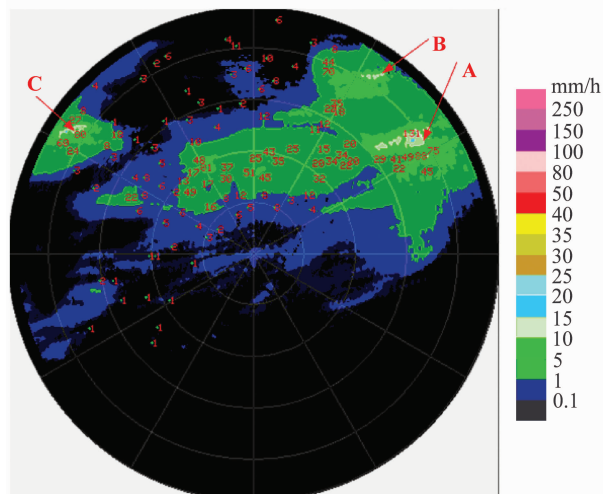


图 10 用雨量站校准后实际的降水分布

Fig. 10 Distribution of the actual precipitation verified by rain-fall stations

2003年6月29日23:00~23:59 雨量分布图 (合肥雷达站)

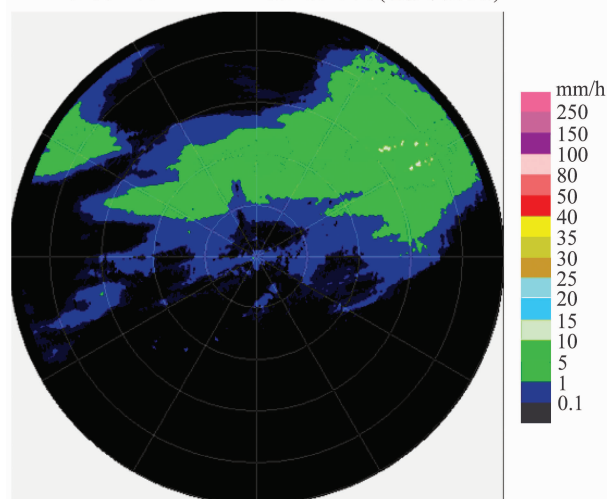


图 9 实际观测的雷达估测降水初值场

Fig. 9 Initial estimated precipitation field for actual radar observation

回波的总量占整体降水回波总量比率是较低的,这与前面的假设也是一致的。

3.3 预报合成和观测合成的初值(降水)场与实际降水分布场的比较

利用 $Z = E_c I^b$ 的雷达反射率因子和降水强度的关系(其中, Z 为雷达反射率因子, I 为降水强度)将雷达观测的反射率场转换为降水场(不同的地区, E_c 和 b 的取值是不一样的,通常取 $E_c = 200$, $b = 1.6$)。图 8 是将 1 小时内所有预报的雷达反射

率场转换为降水分布场,再用时间权重法累积形成的小时降水预报。图 9 则是将雷达实际观测的反射率场转换形成的雷达估测初值场。图 10 是利用卡尔曼—最优插值法进行校准后实际的小时降水分布场,图上数字是地面雨量站测量的小时降水量。

比较图 8、图 9 和图 10, 可以看到: 在图 10 中有三个较强降水中心 A、B、C。对于 A 中心, 预报合成位置与实际观测位置基本一致, 强度略偏弱, 范围相当, 而观测合成中心分裂为两个小中心, 总体范围偏小, 强度偏弱; 对于 B 中心, 预报中心比实际中心偏东, 强度略偏强, 强降水中心范围偏大, 而观测合成中心的位置略偏西, 强度偏弱, 范围偏小, 实际中心位置基本位于二者的中间; 对于中心 C, 观测合成的强降水中心与实际位置基本一致, 强度偏弱, 而预报场中 C 中心基本不存在, 整体回波的范围偏小较多, 这是前面所述——无法预报移动方向后侧的新生回波造成的。

总的来看, 除了降水系统上游方向外, 临近预报的降水场较好地反映了实际降水场, 该产品对开展定时、定点的降水预报有重要的应用价值。

4 与交叉相关法外推预报的比较

从引言部分可以知道, 交叉相关法是一种比较经典的外推预报方法, 在实际业务中得到了较为广泛的研究和应用。但此法也存在比较明显的不足:

(1) 要根据事先的设定阈值对每张雷达回波图进行分区、分块, 而这些设定都需根据实际情况进行自适应调整或人为设定; (2) 由于回波存在分裂、合并等变化因素, 即使进行多次的反复计算来动态调整上述的设定, 也无法实现完全的一一匹配, 其前后时刻回波块匹配的合理性容易受到质疑; (3) 同时由于反复计算匹配情况, 每次计算量的大小不稳定, 使得总体的计算量增加; 由于计算、回波块匹配等原因, 容易造成前后时刻计算结果的一致性差等。

最大重叠率法回避了回波分块和匹配问题, 简化了两个时次回波的相关关系。实际计算结果也表明, 该法无论在计算总量上、还是移向、移速的前后一致性等方面都具有较为明显的优点。

5 主要结论

最大重叠法从新一代天气雷达具有高时空分辨率监测降水连续变化的优点出发, 把雷达观测的反射率场作为一个整体来看, 抓住回波移动变化的主要特征, 简化影响回波变化的一些因子, 使得预报和实际较为一致。该法具有物理概念更为简单清晰、计算量小, 且结果稳定等优点。主要结论如下:

(1) 具有最大重叠率的移向、移速和实际降水系统的移向、移速有着密切相关, 利用最大重叠率法计算降水系统的移向、移速是可信的。它克服了预报员预报结果主观性和不确定性, 具有客观、精细和稳定的特点, 较好地反映降水系统的移动主要特征。另外, 在降水系统的不同发展阶段, 系统的移动速度也是不一样的。通过判断每间隔 6 分钟的移向、移速的变化, 亦可以为系统的增强和减弱提供一个客观的判据。

(2) 在降水系统移动的下游方向, 预报时刻的强度分布场和实际时刻的观测场基本一致; 利用时间权重合成法对间隔 6 分钟的预报场的累加形成一个小时的降水场和实际的降水场也基本一致。这一方面反映了所计算的移向、移速客观性, 另一方面也反映文中的生消模型和时间权重合成的有效性, 利用该法形成预报的结果具有较好参考价值。

(3) 研制的软件以直观的图形和数据方式提供了预报结果, 大大方便了预报员开展定时、定点和定量的预报。

参考文献 (References)

- Austin G L, Bellon A. 1982. Very short range forecasting of precipitation by objective extrapolation of radar and satellite data [M]// Browning K A. Nowcasting, Academic Press, 177-190.
- Bellon A, Zawadzki I. 1994. Forecasting of hourly accumulations of precipitation by optimal extrapolation of radar maps [J]. J. Hydrol., 157: 211-233.
- Bjerkaas C L, Forsyth E E. 1979. Real-time automotive tracking of severe thunderstorms using Doppler weather radar [C]. Preprints, 11th Conf. on Severe Local Storms, 573-576.
- Boudevillain B, Andrieu H, Chaumerliac N. 2006. Evaluation of RadVil, a radar-based very short-term rainfall forecasting model [J]. J. Hydrometeorology, 7: 178-189.
- Brémaud P J, Pointin Y B. 1993. Forecasting heavy rainfall from rain cell motion using radar data [J]. J. Hydrol., 142: 373-389.
- 陈家慧, 张培昌. 2000. 用天气雷达回波资料作临近预报的 BP 网络方法 [J]. 南京气象学院学报, 23 (2): 283-287. Chen Jiahui, Zhang Peichang. 2000. The back propagation network method for nowcasting using weather radar data [J]. J. Nanjing Institute of Meteor. (in Chinese), 23 (2): 283-287.
- 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 2006. 北京 2004 年“7.10”突发性对流强降水的雷达回波特征分析 [J]. 应用气象学报, 17 (3): 333-345. Chen Mingxuan, Yu Xiaoding, Tan Xiaoguang, et al. 2006. Radar echoes characteristics of the sudden convective rainstorm over Beijing area on July 10, 2004 [J]. J. Appl. Meteor. Science (in Chinese), 17 (3): 333-345.
- 陈明轩, 王迎春, 俞小鼎. 2007. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 18 (5): 690-701. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Yu Xiaoding. 2007. Improvement and application test of TREC Algorithm for convective storm nowcast [J]. J. Appl. Meteor. Science (in Chinese), 18 (5): 690-701.
- Crane R K. 1979. Automatic cell detection and tracking [J]. IEEE Trans. Geosci. Electron., 217: 250-262.
- Denœux T, Rizand P. 1995. Analysis of radar images for rainfall forecasting using neural networks [J]. Neural Comput. Applic., 3: 50-61.
- Ding X, Denœux T, Helleco F. 1993. Tracking rain cells in radar images using multilayer neural networks [C]. Proc. ICANN, 93: 962-967.
- Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A radar-based methodology [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 10: 785-797.
- Einfalt T, Denœux T, Jacquet G. 1990. A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes [J]. J. Hydrol., 114: 229-244.
- Fox N, Sleigh M, Pierce C. 2001. Forecast demonstration project

- Sydney 2000—Part I: An overview of the project and the participating systems [J]. *Weather*, 56: 397–404.
- Handwerker J. 2002. Cell tracking with TRACE3D — A new algorithm [J]. *Atmos. Res.*, 61: 15–34.
- Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm [J]. *Wea. Forecasting*, 13: 263–276.
- Lai E S T. 1999. TREC application in tropical cyclone observation [C]. *ESCAP/WMO Typhoon Committee Annual Review*, 135–139.
- Lakshmanan V, Rabin R, Debrunner V. 2003. Multiscale storm identification and forecast [J]. *Atmospheric Research*, 67–68: 367–380.
- Lakshmanan V, Ortega K. 2007. A technique for creating probabilistic spatio-temporal forecasts [J]. *Advances in Pattern Recognition*, 26–32.
- Li L, Schmid W, Joss J. 1995. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34: 1287–1301.
- 梁明珠, 胡志群, 夏文梅, 等. 2005. VIL 中心区自动识别、跟踪和临近预报 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (2): 205–212. Liang Mingzhu, Hu Zhiquan, Xia Wenmei, et al. 2005. Automatic identification, tracking and forecasting of VIL heartland [J]. *J. Nanjing Institute of Meteor.* (in Chinese), 28 (2): 205–212.
- Ligda M G. 1953. The horizontal motion of small precipitation areas as observed by radar [C]. *Technical Report 21*, Department of Meteorology, M. I. T., Cambridge Massachusetts, 60pp.
- Pierce C, Hardaker P J, Collier C G, et al. 2000. *Gandolf: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation* [J]. *Meteor. Appl.*, 7: 341–360.
- Rinehart R E, Garvey E T. 1978. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar [J]. *Nature*, 273: 287–289.
- Rosenfeld D. 1987. Objective method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4: 422–434.
- Stumpf G. 2003. Improvements to SCIT tracking -SCIT filter [C]. *TAC Meeting Decision Briefing*, 28 Oct. NSSL/ NOAA.
- 王改利, 刘黎平. 2005. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用 [J]. *气象*, 31 (10): 12–15. Wang Gaili, Liu Liping. 2005. Application of Doppler radar observation to rainfall nowcasting [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 31 (10): 12–15.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: A status report [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2079–2099.
- Wolfson M, Forman B, Hallowell R, et al. 1999. The growth and decay storm tracker [C]. *8th Conference on Aviation*, American Meteorological Society, Dallas, TX, 58–62.
- 肖艳姣, 汤达章, 李中华, 等. 1998. 风暴的自动识别、跟踪与预报 [J]. *南京气象学院学报*, 21 (2): 223–229. Xiao Yanjiao, Tang Dazhang, Li Zhonghua, et al. 1998. Storm automatic identification, tracking and forecasting [J]. *J. Nanjing Institute of Meteor.* (in Chinese), 21 (2): 223–229.
- Xu K, Wikle C K, Fox N I. 2005. A kernel-based spatio-temporal dynamical model for nowcasting weather radar reflectivities [J]. *J. Amer. Statistical Association*, 100 (472): 1133–1144.
- 张沛源. 1991. 多普勒雷达资料在强天气短时预报中的应用 [C]. *第十一届亚运会气象保障研究论文集*. 北京: 气象出版社, 68–73. Zhang Peiyuan. 1991. Application of Doppler radar in very short-range severe weather forecasting (in Chinese) [C]. *Papers on the Meteorological Support on 11th Asian Games*. Beijing: China Meteorological Press, 68–73.
- 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 2006. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用 [J]. *气象学报*, 64 (5): 631–646. Zhang Yaping, Cheng Minghu, Xia Wenmei, et al. 2006. Estimation of weather radar echo motion field and its application to precipitation nowcasting [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (5): 631–646.