

天气雷达回波运动场估测及在降水临近 预报中的应用*

张亚萍^{1,2,3} 程明虎¹ 夏文梅⁴ 崔哲虎¹ 杨洪平⁵

1 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2 南京信息工程大学, 南京, 210044

3 重庆市气象局, 重庆, 401147

4 江苏气象科学研究所, 南京, 210008

5 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉, 430074

摘 要

在常用的基于天气雷达反射率因子图像的相关方法跟踪回波运动的 TREC (Tracking Radar Echo by Correlation) 技术基础上, 文中发展了一种基于差分图像 (时间梯度图像) 的相关方法追踪雷达回波运动 (Difference Image-based Tracking Radar Echo by Correlations) 技术, 简称 DITREC, 并与 TREC 技术进行比较。个例分析表明, DITREC 矢量场消除了 TREC 矢量场中由于回波型的迅速变化导致的一些无序矢量, 使得 DITREC 矢量场的时间连续性和空间连续性好于 TREC 矢量场。在 TREC 矢量场中不存在无序矢量的地方, DITREC 矢量场与 TREC 矢量场基本一致。分别用 DITREC 矢量场和 700 hPa 风场作为回波运动估测场外推合肥 CINRAD/SA 雷达反射率因子复合扫描图, 得到 1 h 外推降水场。以地面雨量计为标准, 对外推降水场进行评估, 结果表明, DITREC 外推小时降水优于 700 hPa 外推小时降水, 但其精度还与所采用的 Z-R 关系有关。

关键词: 天气雷达, 回波运动场, 降水, 临近预报。

1 引 言

目前, 用天气雷达进行定量降水估测已有多种理论和方法^[1], 中国气象局与水利部合作的“淮河流域暴雨洪水监测预报系统试验”项目 (以下简称“黄淮试验”项目) 技术组研制的定量估测降水集成系统软件已在安徽省气象台投入业务应用^[2], 作为洪水预报和调度重要决策信息的体积降水量已能进行准实时观测^[3]。除了用于降水估测, 基于雷达资料的降水临近预报也是一项重要工作。业务天气雷达网除了能提供近实时的高空间分辨率降水分布外, 还具有跟踪移动性风暴的能力, 从而支持了各种基于对当前观测资料外推的定量降水预报 (QPF) 算法^[4]。研究表明^[5], 即使有密集的雷达-雨量计网存

在, 临近预报对径流预报和警报仍很重要, 而提高运动场和流域上平均降水演变的估测精度, 是做出好的水文预报的关键, 尤其在小流域内。

交叉相关技术首先被用于跟踪风暴簇的整体移动^[6-9]。随着雷达资料分辨率的提高, Rinehart 等^[10]首先发展了利用相关方法反演风暴内部运动的技术, Smythe 等^[11]、Tuttle 等^[12]沿用同一概念反演出边界层内的气流, TREC 技术也被广泛用于估计回波运动场^[5, 13-14]。Li 等^[15]在 TREC 技术的基础上发展了一种 TREC 矢量的连贯性技术, 即 COTREC (Continuity of TREC vectors) 技术, 首先将 TREC 矢量场中与周围矢量偏差较大的矢量和零矢量用邻近的矢量来代替, 然后应用二维连续方程得到较为连

* 初稿时间: 2005 年 4 月 26 日; 修改稿时间: 2006 年 3 月 3 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目 (40375007, 40575009, 40475017) 和江苏省科技厅项目 (BS2003054)。

作者简介: 张亚萍, 女, 1969 年生, 高级工程师, 博士, 主要从事大气探测和遥感应用技术研究。E-mail: ZYP@121.cq.cn

续的矢量场。

然而,以上方法在进行回波运动追踪时都是直接对原始反射率因子场进行回波区域划分。考虑到降水回波追踪是一种运动分析,而差分运动分析是图像处理中普遍采用的一种运动分析方法^[16]。在 TREC 技术的基础上,本文发展了一种基于差分图像的相关回波运动场估测技术,文中简称为 DITREC(Difference Image-based Tracking Radar Echo by Correlations)。并通过个例分析比较 TREC 和 DITREC 技术,然后分别用 DITREC 矢量场和 700 hPa 风场作为回波运动估测场外推台胞的 CINRAD/SA 雷达反射率因子复合扫描图,得到 1 h 外推降水场。将地面雨量计测值作为“真值”,分别对雷达反射率因子经 $Z-R$ 关系转换的 1 h 累积降水量分布、DITREC 矢量场外推降水场和 700 hPa 风场外推降水场进行评估。

2 方法

2.1 TREC 法简介

TREC 方法首先计算回波移动矢量场。取两张相同仰角、具有一定时间间隔 t 的平面位置显示 (PPI) 反射率因子扫描数据,分析时先将 t_1 时刻的数据分成一系列大小相同的二维像素阵列,阵列中心间隔一定距离。然后将每个阵列与 t_2 时刻扫描数据中相同大小的所有阵列求相关,找到与之最匹配的那个阵列,即确定具有最大相关系数的阵列对。阵列对中 t_1 时刻初始阵列的中心即为回波移动矢量的起点, t_2 时刻与初始阵列具有最大相关的阵列中心即为回波移动矢量的终点。对 t_1 时刻的所有初始阵列都求出其对应的移动矢量,将得到的矢量场除以时间间隔 t ,就得到了 TREC 速度矢量场(以下简称 TREC 矢量场)。假设回波的空间分布在 t_1 到 t_2 时段内近似不变,则 TREC 矢量场可以作为回波在 t_1 到 t_2 时段内平均运动速度场的估测。

相关系数

$$R = \frac{\sum X_1(i) X_2(i) - n^{-1} \sum X_1(i) \sum X_2(i)}{\sqrt{[\sum X_1^2(i) - n\bar{X}_1^2] [\sum X_2^2(i) - n\bar{X}_2^2]}} \quad (1)$$

式中 X_1 及 X_2 代表两个时次中的二维像素阵列, n 是阵列内的像素数。

为了减少计算时间,以初始阵列中心为圆心定

出搜索范围。若回波运动的最大速度为 V_{\max} ,则搜索范围的半径 $r = V_{\max} t$ 。

2.2 DITREC 法

当图像存在空间梯度时,物体的运动可以从图像序列的时间梯度上体现出来^[16]。对具有一定时间间隔的两帧图像进行差分,就得到时间梯度图像,即差分图像^[16]。时刻 t_i 的图像 $f(x, y, t_i)$ 和时刻 t_j 的图像 $f(x, y, t_j)$ 之间的差分图像定义为^[16]

$$D_{ij}(x, y) = \begin{cases} f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j) & \text{如果 } |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)| > T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

这里 T 是一个特定的门限,如果在两幅图像间灰度差在其坐标上有相当的不同时, $D_{ij}(x, y)$ 具有值 $f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)$,差异程度取决于事先确定的门限 T 。图 1 给出雷达回波反射率因子差分图像生成示意图, $T=1$ dB。图 1 中时刻 t_1 的反射率因子图像 $Z(x, y, t_1)$ 取自 2003 年 7 月 8 日 10:09(世界时,下同)江苏省南京(32.194°N, 118.401°E) CINRAD/SA 雷达 1.5°PPI 上的一块单体回波,该回波块位于雷达站东南。假设该回波强度和结构不变,经 t 时间(如 5 min)后向东北方向以速度 v (如 19 m/s 左右)移动到 $Z(x, y, t_2)$,然后继续以同样的速度和方向运动,又经过 t 时间后成为 $Z(x, y, t_3)$ 。图 1d 和图 1e 是按照式(2)得到的差分图像 D_{12} 和 D_{23} 。另外,若将 D_{12} 以速度 v 向东北方向移动,经 t 时间后同样得到 D_{23} 。进行雷达回波运动场估测时,对这两张差分图像利用 TREC 技术,因此将这种方法称为基于差分图像的相关回波运动场估测技术(DITREC)。分析时先将 D_{12} 分成一系列相同大小的二维像素阵列,对每个初始阵列在 D_{23} 中找到与初始阵列大小相同并具有最大相关的阵列。对 D_{12} 中所有初始阵列都求出其对应的移动矢量,将得到的矢量场除以时间间隔 t ,就得到了 DITREC 速度矢量场(以下简称 DITREC 矢量场)。可见,差分图像中非 0 值区域的移动速度等于目标的移动速度。由于差分图像是图像序列的时间梯度图像,假设反射率因子图像序列两两差分后的时间梯度图像的空间分布近似不变,则 DITREC 矢量场可以作为回波在 t_1 到 t_3 时段内平均运动速度场的估测。由于 TREC 方法的假设条件是回波本身的空间分布

近似不变,而 DITREC 方法的假设条件是反射率因子差分图像(时间梯度图像)的空间分布近似不变,因此这两种方法是从不同角度对回波运动场进行估测。下面将通过个例分析对这两种方法进行比较。

3 天气雷达回波运动场估测

3.1 资料来源

选用 2003 年 7 月 8 日合肥(31.866°N, 117.257°E) CINRAD/SA 雷达观测到的一次飑线过程资料和 2005 年 7 月 19 日温州(27.995°N, 120.733°E) CINRAD/SA 雷达观测到的“海棠”台风减弱后的热带风暴云系资料进行试验,使用的雷达反射率因子原始数据资料采用极坐标表示,即以斜距、方位角和仰角表示。由于笛卡尔坐标的几何表达更简单,因此,雷达极坐标数据被转换成锥面上的笛卡尔坐标,以 x (向东为正向)、 y (向北为正向)和仰角表示。坐标转换采用“最邻近法”^[17]。

图 2 为 2003 年 7 月 8 日合肥雷达 1.5°PPI 反射率因子图像及相应的差分图像(个例 1)。10 dBz 以下的回波作为无回波考虑,生成差分图像时的门限 T 取 1 dB。在雷达西南部有一条飑线(图 2a—2c),飑线东北面为一个类似弓形回波的中尺度对流系统^[18]。从 7 月 8 日高空 500, 700, 850 hPa 天气图分析(图略)^[18],华西有低槽东移,尤其在 7 月 8 日 12 时,高空 3 层的低槽位置几乎完全重合,在安徽省江淮南部到沿江地区形成准南北向的切变线。飑线上空为槽前的西南风。500 hPa 西南风风速 24—32 m/s, 700 hPa 为 18—20 m/s, 850 hPa 为 12—16 m/s^[18]。

图 3 为 2005 年 7 月 19 日温州雷达 1.5°PPI 反射率因子图像及相应的差分图像。2005 年“0505”号台风“海棠”于 19 日 09 时在福建省连江县和罗源县之间登陆,强度减弱为强热带风暴,之后向西北移动,强度再次减弱,于 19 日 18 时在福建省南平市减弱为热带风暴。图 3 为温州雷达观测到的一部分热带风暴云系(个例 2)。

3.2 回波运动场估测

将 TREC 和 DITREC 技术用于以上个例时,对个例 1,由于观测到的多普勒径向速度最大值为 26 m/s,因此将搜索范围的半径定为 10 km,相当于假设回波最大移速为 29 m/s,对个例 2,观测到的多普勒径向速度最大值为 38 m/s,因此将搜索范围的半径

定为 15 km,相当于假设回波最大移速为 44 m/s。尽管对反射率因子图像或差分图像采用相关系数法进行匹配时的阵列大小可以任意选择,但若阵列太大,则降低了分辨率,若阵列太小,阵列中就不能包括足够的点,得到的相关系数就会不稳定^[12]。由于差分图像中只包括两幅图像间反射率因子在其对应坐标上有差异的像素点,而且本文研究的是用于对回波进行外推的回波运动场,因此,为了得到较为稳定的相关系数,结合中国 CINRAD/SA 反射率因子分辨率(即径向库长为 1 km,每仰角层扫描径向数约 366)转换到笛卡尔坐标下的分辨率取为 1 km × 1 km,将阵列大小取为 39 km × 39 km,一个阵列包括 1521 个像素点,阵列之间间隔 6 km,即阵列之间有相互重叠的部分存在。

Rinehart^[19]建议在应用 TREC 技术时,时间间隔最好小于 5 min,否则由于回波型的变化将导致 TREC 矢量场中一些无序(chaotic)矢量的产生。图 4 的 TREC 矢量场中就存在这类情况。例如,在图 4a 中,在合肥雷达的东南方,自(30 km, -10 km)向东南延伸直到(65 km, -50 km)有一个小 TREC 矢量区,其中大部分为零矢量区。在图 4b 中与上面指出的区域相近的位置附近仍然是一个小矢量区。图 4d 中,在温州雷达东北(50 km, 100 km)附近出现了 43 m/s 左右的大值区,在(25 km, 10 km)附近为零矢量或小矢量区。图 4e 中,在温州雷达东北(50 km, 60 km)附近出现了大致 50 km × 50 km 的零矢量或小矢量区,在时间连续性上与图 5d 中的相应区域不一致。Li 等^[15]指出,CO-TREC 矢量场也不能完全消除这类零矢量、小矢量和与周围矢量方向相反的矢量的影响。

由图 4c 和图 4f 可见, DITREC 在以上这些区域都是比较连续的。为了说明回波移动在这些区域确实是连续的,参照 Tuttle 等^[12]、Li 等^[15]以及 Tuttle 等^[20]对比 TREC 和多普勒径向速度的方法,图 5 给出按 39 km × 39 km 阵列对多普勒径向速度进行算术平均后的平均多普勒径向速度分布。图 5a 为合肥雷达 2003 年 7 月 8 日 15:19 的平均多普勒径向速度与 DITREC 矢量(图 4c)的叠加图,图 5b 为温州雷达 2005 年 7 月 19 日 17:13 的平均多普勒径向速度与 DITREC 矢量的叠加图(图 4f)。对比图 5 和图 4 可知,在 TREC 存在无序矢量的地方,平均多普勒径向速度是连续的,说明 DITREC 矢量场在

回波运动的连续性上确实有所改进。对图 2 和 3 的反射率因子图进行动画显示后发现, TREC 矢量场中出现无序矢量的地方回波型变化均较快, 因此, 回波的快速变化可能是造成这些无序矢量的原因。由于生成 DITREC 矢量时同时考虑了 3 个时次的回波, 对运动信息的提取或许比 TREC 矢量更充分, 但这方面今后还需进一步研究。值得注意的是, 由于在差分过程中一些对应像素点之差在门限 T 以内的回波点被消除, 因此 DITREC 矢量数少于 TREC 矢量数。

图 6 给出 TREC 和 DITREC 径向分量与平均多普勒径向速度散点分布。对于个例 1, 由于合肥雷达的南部以飢线为主, 北部以混合性降水为主, 因此在分析 TREC 和 DITREC 的径向分量与平均多普勒径向速度时, 将北部和南部分别进行分析(图 6a—6d)。对于个例 2, 全部回波都为热带风暴云系回波, 因此分析时不再区分部位(图 6e, 6f)。由图 6a—6d 可见, 对飢线系统和混合性降水进行回波运动估测时, 无论是 TREC 矢量场还是 DITREC 矢量场, 其径向分量与平均多普勒径向速度的差别都较大, 这主要是由于飢线系统和混合性降水中存在较大的环境风切变^[20]。在热带风暴云系中, 由于中低层风速垂直切变相对较弱^[20], 因此 TREC 或 DITREC 矢量场的径向分量与平均多普勒径向速度较为一致(图 6e, 6f)。由图 6 还可看出, 除了 TREC 矢量很小或很大的一些点外, TREC 矢量径向分量与平均多普勒径向速度散点分布(图 6a, 6c 和 6e)跟相应 DITREC 矢量径向分量与平均多普勒径向速度散点分布(图 6b, 6d 和 6f)非常相似。为了比较 TREC 与 DITREC 的一致性, 从 TREC 径向分量与 DITREC 径向分量的散点分布(图 7a 对应个例 1, 图 7b 对应个例 2)可见, DITREC 径向分量与 TREC 径向分量较为一致。

根据以上分析, 由于 DITREC 矢量场与 TREC 矢量场较为一致, 为了减少一些无序的 TREC 矢量对回波外推的影响, 下面采用 DITREC 矢量场进行 1 h 的降水临近预报。

4 降水临近预报

4.1 降水临近预报方法

在得到回波运动估测场的基础上, 进行降水临近预报时仍然采用简单的外推方法。在进行外推前

先进行资料预处理, 主要包括孤立点剔除、畸异回波检测、阻挡订正^[21-22]、构成复合平面^[21-22]。构造复合扫描反射率因子图时, 采用的反射率因子值从最低 4 个仰角的探测结果中选取, 因而称为“复合扫描”, 使所选波束底与地面至少相距 150 m, 目的是利用尽可能接近 1 km 高度的反射率因子值以使地形阻挡引起的地物杂波和数据丢失的影响达到最小。然后分别用 DITREC 矢量场和 700 hPa 风场作为回波运动估测场外推 1 h 的降水, 将地面雨量计测值作为“真值”, 分别对雷达反射率因子经 $Z-R$ 关系转换的 1 h 累积降水量分布、DITREC 矢量场外推降水场和 700 hPa 风场外推降水场进行评估。资料为合肥雷达观测的 7 月 8 日 13:47—15:57 共 24 个体积扫描, 相邻体积扫描之间约间隔 340 s。

4.2 降水临近预报结果

图 8a 为 2003 年 7 月 8 日 13:57 的反射率因子复合扫描图。图 8b 为 13:48, 13:53 和 13:58 的 1.5° PPI 反射率因子导出的 DITREC 矢量场。我们利用图 8b 和 14:44, 14:49 和 14:56 的 1.5° PPI 反射率因子导出的 DITREC 矢量场(图略)作为外推所用的回波运动场, 分别对 13:57(图 8a)和 14:55(图略)的反射率因子复合扫描图进行 5 min 间隔的外推, 累加平均后得到预报的 1 h 平均反射率因子复合扫描图, 用经验 $Z-R$ 关系(Z 为反射率因子, 单位为 mm^6/m^3 , R 为雨强, 单位为 mm/h)转换成小时雨量, 即得到 1 h 外推降水场。作为对比, 用 700 hPa 风场对相应的复合扫描资料进行外推后得到 1 h 外推降水场。7 月 8 日 12 时的探空资料中, 南京(距合肥雷达 143 km, 方位 83°)的风向为 235° , 风速为 18 m/s; 安庆(距合肥雷达 150 km, 方位 188°)的风向为 225° , 风速为 19 m/s; 阜阳市(距合肥雷达 179 km, 方位 311°)的风向为 220° , 风速为 8 m/s。综合考虑以上 3 个探空站的测值, 外推时 700 hPa 平均风向取为 225° , 风速取为 15 m/s。采用以下两种经验 $Z-R$ 关系^[21, 23]

$$\text{WSR-88D} \quad Z = 300 R^{1.4} \quad (3)$$

$$\text{层状云降雨} \quad Z = 200 R^{1.6} \quad (4)$$

并以地面雨量计测值为标准对外推结果进行评估。同时参加评估的还有雷达反射率因子复合扫描图累加平均后经相应 $Z-R$ 关系反演得到的小时累积雨量(以下简称雷达反演值)。距离合肥市雷达 150 km

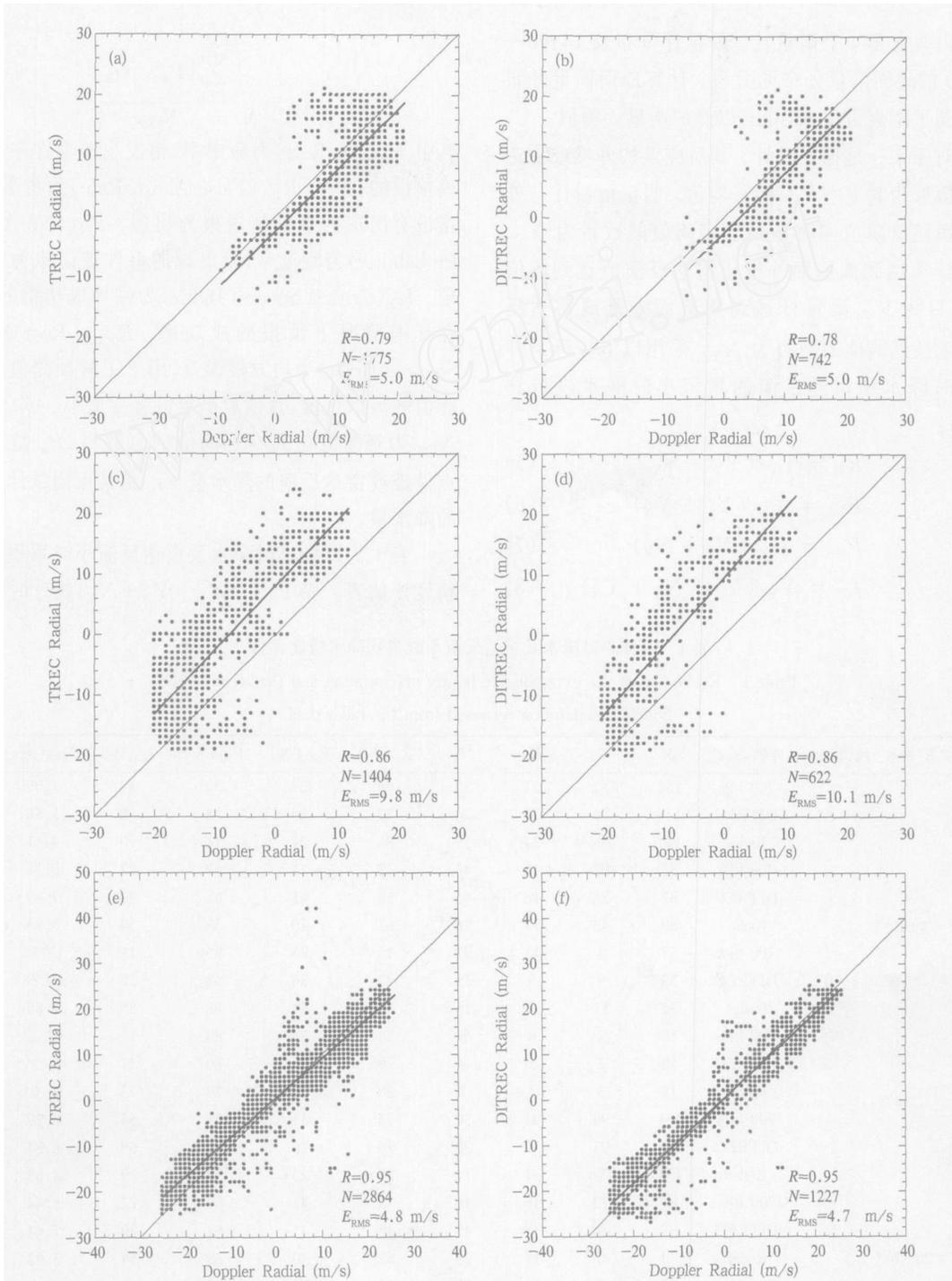


图 6 TREC 和 DITREC 径向分量与平均多普勒径向速度散点分布

(a. 图 4a 和图 4b 中 TREC 径向分量与图 5a 中平均多普勒径向速度, 但仅取合肥雷达以北的部分; b. 图 4c 中 DITREC 径向分量与图 5a 中平均多普勒径向速度, 但仅取合肥雷达以北的部分; c. d 同 a, b, 但仅取合肥雷达以南的部分; e. 图 4d 和图 4e 中 TREC 径向分量与图 5b 中平均多普勒径向速度; f. 图 4f 中 DITREC 径向分量与图 5b 中平均多普勒径向速度; 图中给出了 1:1 线、回归线(粗实线)、相关系数 R 、矢量数 N 及均方根误差 E_{RMS})

Fig. 6 Scatterplots of TREC and DITREC radial components versus averaged Doppler radial velocities (a. TREC radial components shown in Fig. 4a and Fig. 4b versus averaged Doppler velocities in Fig. 5a, but only the data north of Hefei radar were used; b. DITREC radial components in Fig. 4c versus averaged Doppler velocities in Fig. 5a, but only the data north of Hefei radar were used; c, d. same as (a) and (b), respectively, except the data south of Hefei radar were used; e. TREC radial components in Fig. 4d and Fig. 4e versus averaged Doppler velocities in Fig. 5b; f. DITREC radial components in Fig. 4f versus averaged Doppler radial velocities in Fig. 5b. The 1:1 line, regression line, correlation coefficient R between compared quantities, and the number, N , of retrieved vectors, and the Root Mean Squared Error (E_{RMS}) are also given in each plot)

范围内共有 144 个雨量计,雨量计分布及 14:00—15:00 的地面雨量分布见图 8c, 计算地面雨量分布时用到了距离雷达 150 km 以外的雨量计测值。

对于某一地面雨量计,其对应点的外推或雷达反演值取为其上空 9 点的平均值。假定雨量计与外推或雷达反演值同时达到给定阈值的数目为 Y_Y ,雨量计未达到阈值而外推或雷达反演值达到阈值的数目为 Y_N ,雨量计达到阈值而外推或雷达反演值未达到阈值的数目为 N_Y ,采用以下指标对外推小时降水和雷达反演的累积小时降水进行评估^[24]:

$$R_H = Y_Y / (Y_Y + N_Y) \quad (5)$$

$$R_{FA} = Y_N / (Y_Y + Y_N) \quad (6)$$

$$P_{NA} = N_Y / (Y_Y + N_Y) \quad (7)$$

$$I_{CS} = Y_Y / (Y_Y + N_Y + Y_N) \quad (8)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N_{OBS}} (P_n - G_n)^2}{N_{OBS}}} \quad (9)$$

其中 R_H (Hit Rate) 为命中率,指发生的事件中被正确预报的比率, R_{FA} (False Alarm Rate) 为虚警率,指没有出现的事件被误报为出现, P_{NA} (No Alarm Probability) 为漏报率,指出现的事件被误报为未出现, I_{CS} (Critical Success Index) 为临界成功指数,指在有雨情况下预报的成功率, E_{RMS} (Root Mean Squared Error) 为均方根误差,用于了解预测值与实际值的离散程度,其值愈小离散程度愈小。式(9)中 N_{OBS} 为观测值达到给定阈值的总数目, P_n 是对应点外推或雷达反演的降水量, G_n 是某点雨量计观测的降水量。

表 1 为外推小时降水及雷达反演小时累积降水精度评估表。表中 $N = Y_Y + Y_N + N_Y$,统计时次为

表 1 外推小时降水及雷达反演小时累积降水精度评估

Table 1 Evaluation of the extrapolative hourly precipitation and the accumulated hourly precipitation retrieved from the radar data

Z-R 关系	阈值(mm)	外推/雷达	N	Y_Y	Y_N	N_Y	R_H (%)	R_{FA} (%)	P_{NA} (%)	I_{CS} (%)	E_{RMS} (mm)
$Z = 300 R^{1.4}$	2	700 hPa	151	82	31	38	68	27	32	54	7.09
		DITREC	149	86	29	34	72	25	28	58	5.86
		Radar	147	103	27	17	86	21	14	70	4.61
	5	700 hPa	85	23	16	46	33	41	67	27	8.76
		DITREC	87	26	18	43	38	41	62	30	7.49
		Radar	80	43	11	26	62	20	38	54	5.86
	10	700 hPa	37	4	11	22	15	73	85	11	12.51
		DITREC	33	9	5	19	32	36	68	27	10.88
		Radar	31	11	5	15	42	31	58	35	7.85
	15	700 hPa	16	2	6	8	20	75	80	13	17.23
		DITREC	12	2	2	8	20	50	80	17	14.29
		Radar	13	3	3	7	30	50	70	23	10.61
$Z = 200 R^{1.6}$	2	700 hPa	161	90	41	30	75	31	25	56	6.79
		DITREC	153	92	32	29	76	26	24	60	6.34
		Radar	151	106	31	14	88	23	12	70	4.63
	5	700 hPa	85	23	16	46	33	41	67	27	8.44
		DITREC	87	26	18	43	38	41	62	30	7.44
		Radar	80	43	11	26	62	20	38	54	5.92
	10	700 hPa	37	4	11	22	15	73	85	11	12.31
		DITREC	31	8	5	18	31	38	69	26	10.76
		Radar	31	11	5	15	42	31	58	35	8.34
	15	700 hPa	12	0	6	6	0	100	100	0	22.14
		DITREC	13	1	2	10	9	67	91	8	15.18
		Radar	13	3	3	7	30	50	70	23	11.62

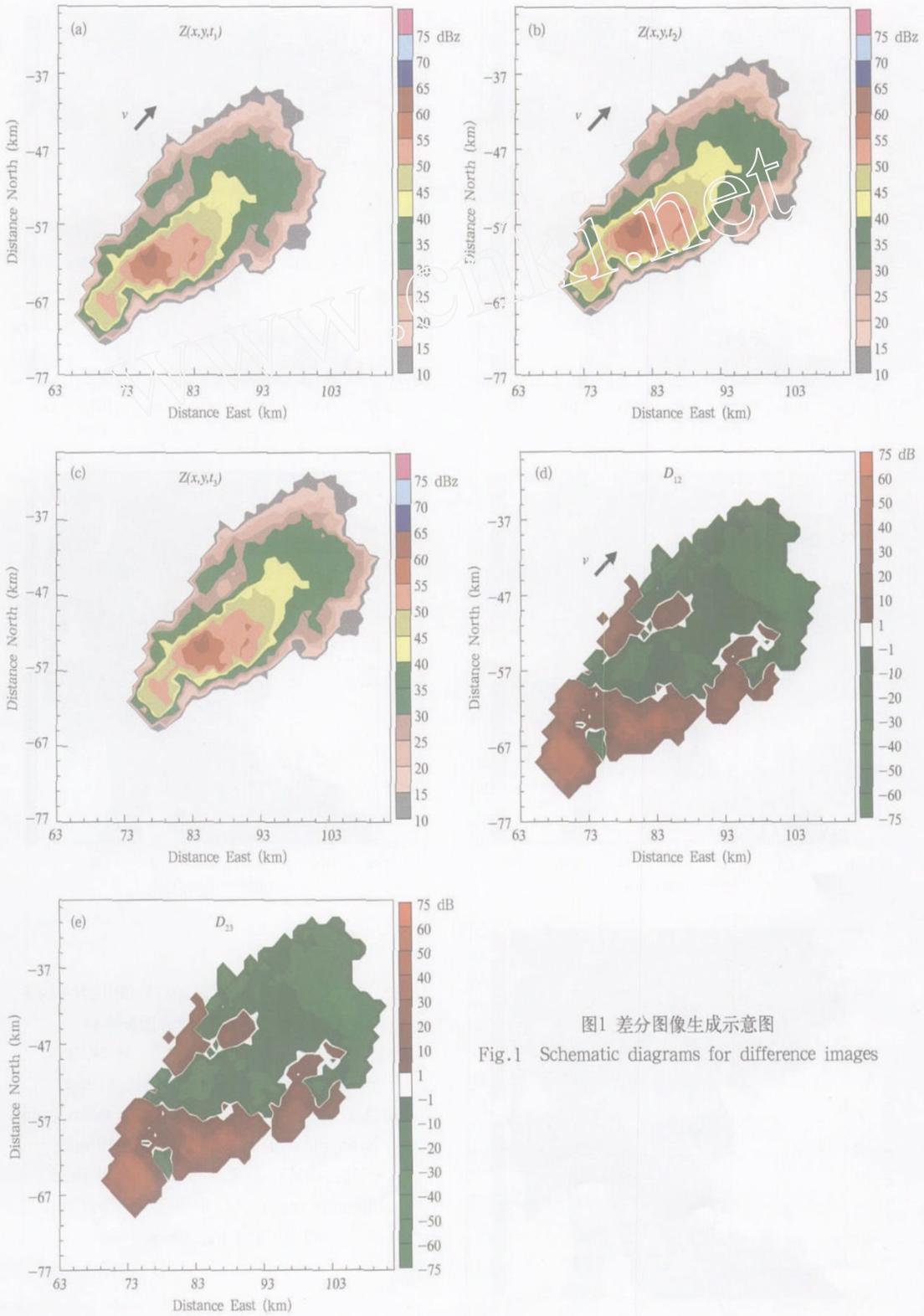


图1 差分图像生成示意图

Fig.1 Schematic diagrams for difference images

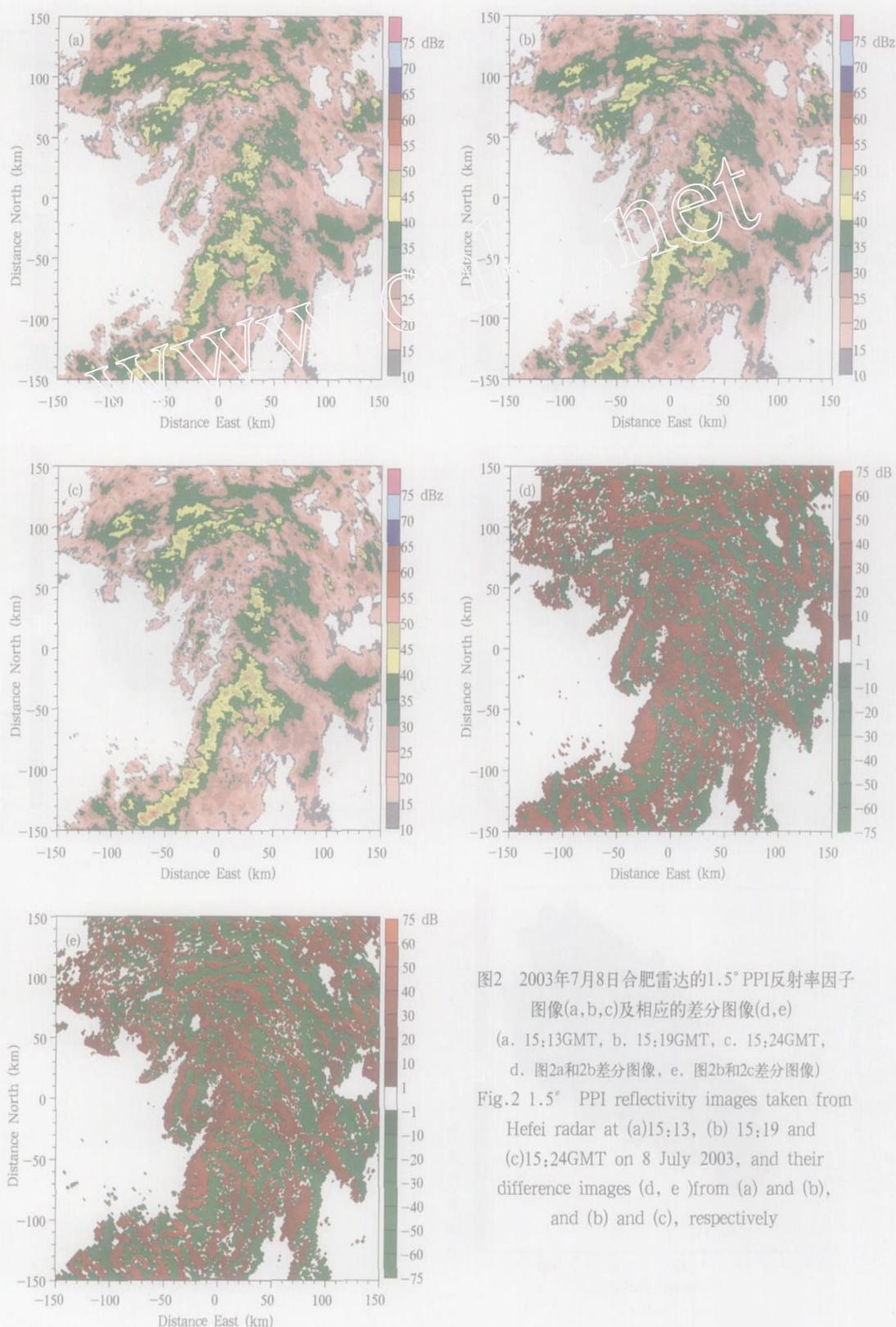


图2 2003年7月8日合肥雷达的 1.5° PPI反射率因子图像(a,b,c)及相应的差分图像(d,e)

(a. 15:13GMT, b. 15:19GMT, c. 15:24GMT, d. 图2a和2b差分图像, e. 图2b和2c差分图像)

Fig.2 1.5° PPI reflectivity images taken from Hefei radar at (a)15:13, (b) 15:19 and (c)15:24GMT on 8 July 2003, and their difference images (d, e) from (a) and (b), and (b) and (c), respectively

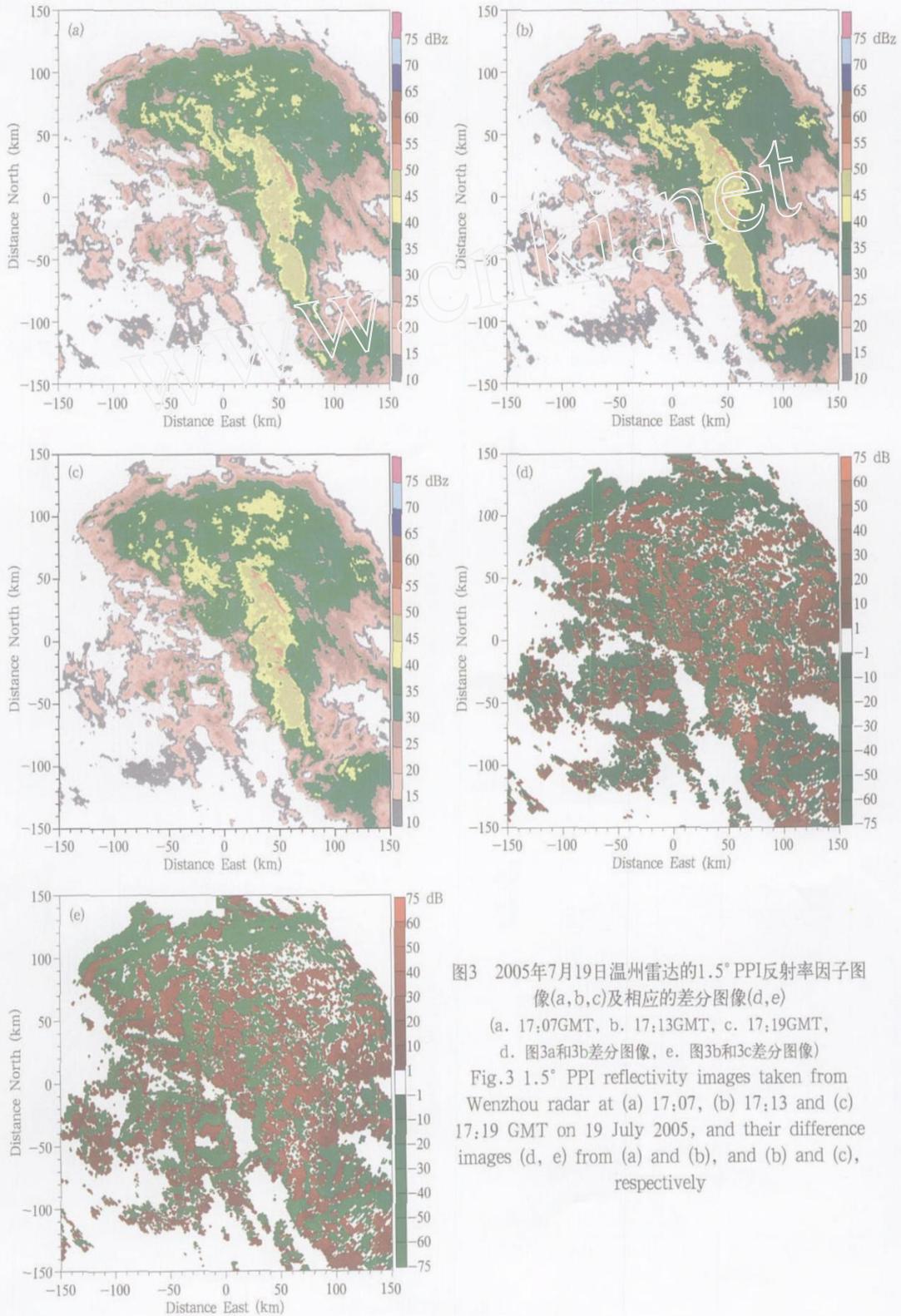


图3 2005年7月19日温州雷达的1.5° PPI反射率因子图像(a, b, c)及相应的差分图像(d, e)

(a. 17:07GMT, b. 17:13GMT, c. 17:19GMT, d. 图3a和3b差分图像, e. 图3b和3c差分图像)

Fig.3 1.5° PPI reflectivity images taken from Wenzhou radar at (a) 17:07, (b) 17:13 and (c) 17:19 GMT on 19 July 2005, and their difference images (d, e) from (a) and (b), and (b) and (c), respectively

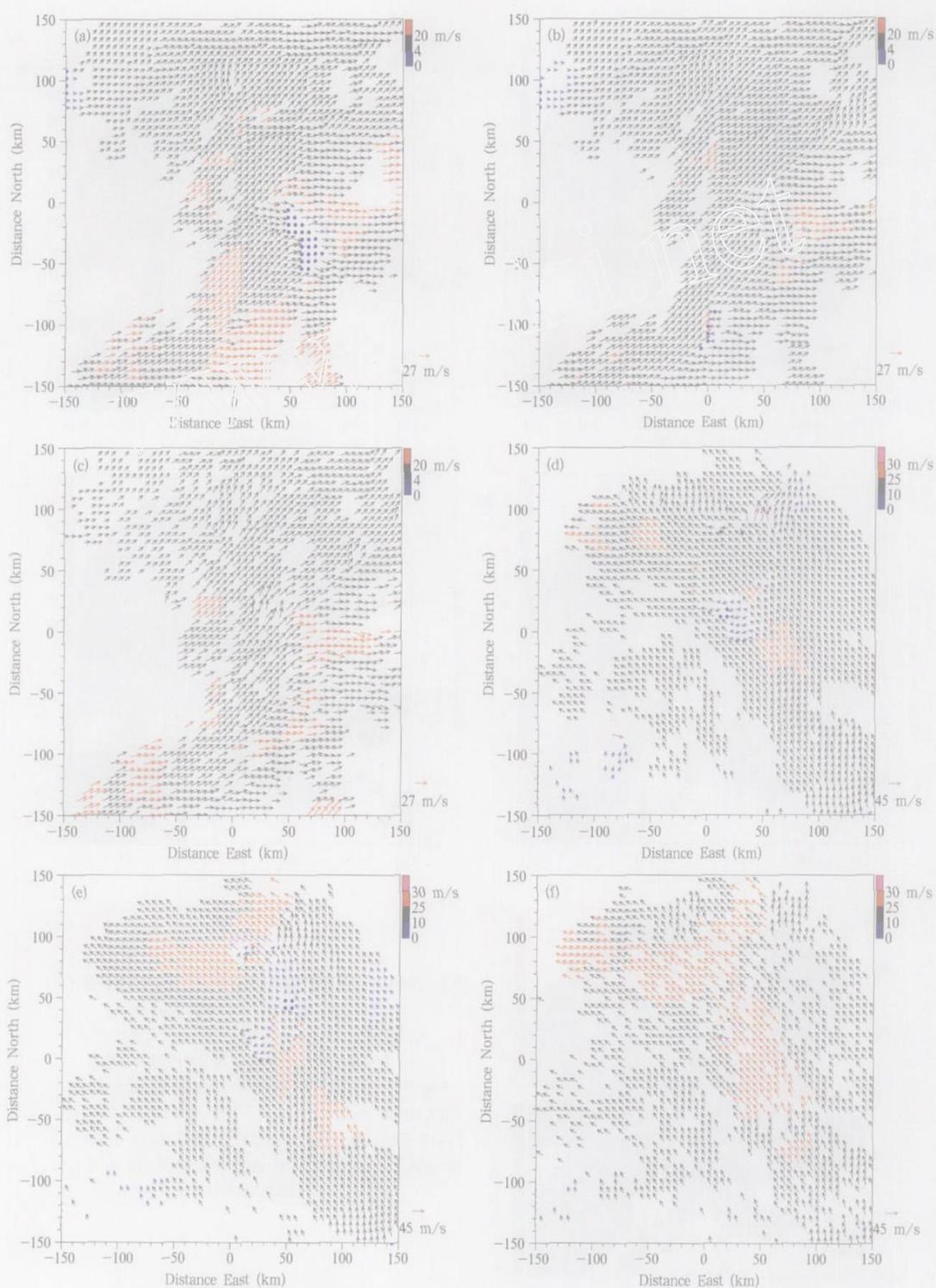


图4 TREC和DITREC矢量场

(a. 由图2a和2b得到的TREC矢量场, b. 由图2b和2c得到的TREC矢量场, c. 由图2d和2e得到的DITREC矢量场, d. 由图3a和3b得到的TREC矢量场, e. 由图3b和3c得到的TREC矢量场, f. 由图3d和3e得到的DITREC矢量场)

Fig.4 TREC vector fields obtained from (a) Fig.2a and Fig.2b, (b) Fig.2b and Fig.2c, (d) Fig.3a and Fig.3b, and (e) Fig.3b and Fig.3c, and DITREC vector fields from (c) Fig.2d and Fig.2e, and (f) Fig.3d and Fig.3e

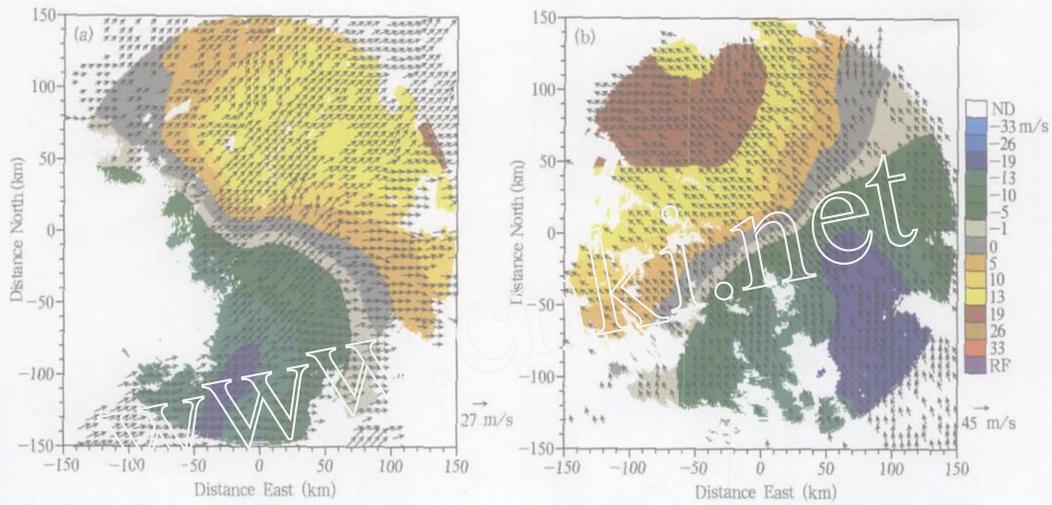


图5 平均多普勒径向速度与DITREC矢量场叠加

(a. 2003年7月8日15:19GMT合肥雷达1.5° 平均多普勒径向速度与图4c的DITREC矢量场叠加图, b. 2005年7月19日17:13GMT温州雷达1.5° 平均多普勒径向速度与图4f的DITREC矢量场叠加图)

Fig.5 (a) Averaged Doppler radial velocities taken from Hefei radar at 15:19GMT on 8 July 2003 at an elevation angle of 1.5°, overlaid with the DITREC vectors shown in Fig 4c, (b) averaged Doppler radial velocities from Wenzhou radar at 17:13GMT on 19 July 2005 at an elevation angle of 1.5°, overlaid with the DITREC vectors shown in Fig.4f

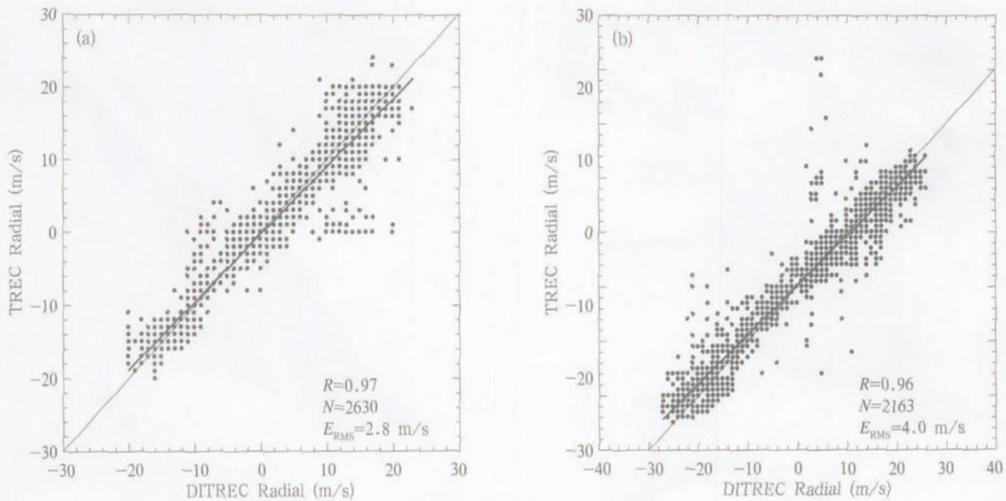


图7 TREC径向分量与DITREC径向分量的散点分布

(a. 图4a和图4b中TREC径向分量与图4c中DITREC径向分量, b. 图4d和图4e中TREC径向分量与图4f中DITREC径向分量; 其余同图6)

Fig.7 Scatterplots of TREC versus DITREC radial components

(a. TREC radial components shown in Figs.4a and b versus DITREC radial ones in Fig.4c; b. TREC radial components shown in Figs.4d and e versus DITREC radial ones in Fig.4f; Others are same as Fig.6)

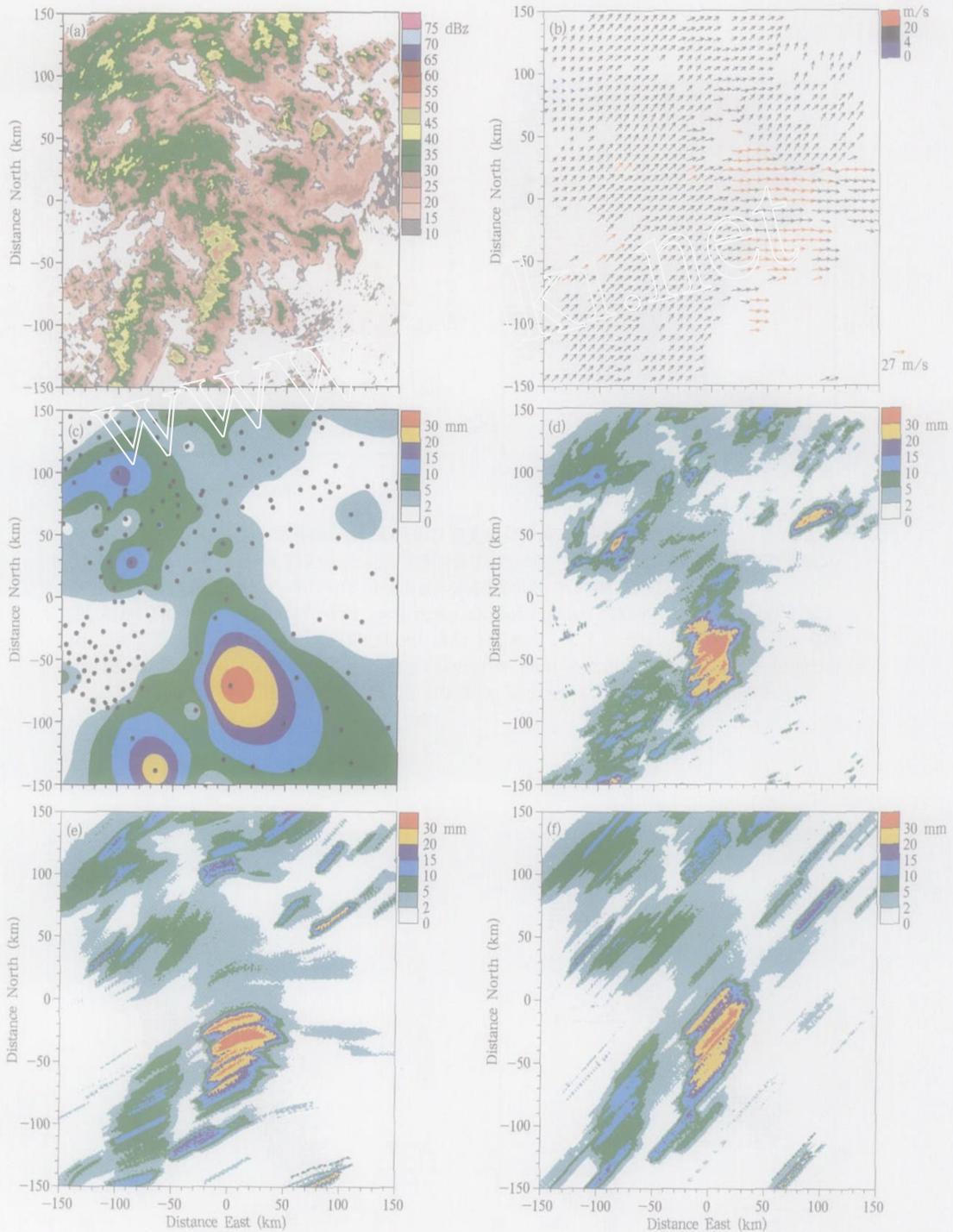


图8 2003年7月8日13:57GMT合肥雷达反射率因子复合扫描图(a); 13:48, 13:53, 13:58GMT的 1.5° PPI反射率因子图像序列得到的DITREC矢量场 (b); 14:00–15:00GMT以合肥雷达为中心 $150\text{ km} \times 150\text{ km}$ 的地面小时雨量分布及雨量站分布(c)及其雷达反演小时累积雨量分布(d); 分别用14:00–15:00GMT DITREC矢量场和700 hPa风场的外推小时雨量场(e, f)
 Fig.8 (a) Hybrid scan reflectivity measured by HeFei radar at 13:57GMT on 8 July 2003; (b) DITREC vector field obtained from a series of 1.5° PPI reflectivity images at 13:48, 13:53, and 13:58 GMT; (c) Distributions of the observed hourly rainfalls and rainfall stations over the area within a distance of 150 km from HeFei radar in 14:00–15:00GMT on 8 July 2003; And the corresponding hourly rainfalls (d) retrieved from the radar data, and extrapolated using (e) the DITREC vectors shown in Fig.8b, and (f) the 700 hPa wind fields

14:00—15:00 和 15:00—16:00, 700 hPa 指 700 hPa 风场外推小时降水, DITREC 指 DITREC 矢量场外推小时降水, Radar 指雷达反演的小时累积降水。由表 1 可见: $Z-R$ 关系采用式(3)时均方根误差最小, 采用式(3)和式(4)时其他指标相差不大; 随着阈值增大, 外推或雷达反演的降水精度均下降; DITREC 外推降水的评估指标大多介于 700 hPa 外推和雷达反演降水的指标之间。

图 8d 为 $Z-R$ 关系采用式(3)时的雷达反演累积小时降水(14:00—15:00)、图 8e 为 $Z-R$ 关系采用式(3)时的 DITREC 矢量场外推小时降水(14:00—15:00)、图 8f 为 $Z-R$ 关系采用式(3)时的 700 hPa 风场外推小时降水(14:00—15:00)。比较图 8c 和 8d 可见, 14:00—15:00, 雷达在(0 km, -40 km)附近反演出强降水区, 但由于该区域雨量计不密集, 致使图 8c 中的强降水区位于(0 km, -80 km)附近, 明显偏南。因此, 本文暂将外推降水区与雷达反演降水区的吻合程度作为初步评估外推强降水区效果好坏的一种标准, 今后将在更加密集的量计资料和更多个例资料的基础上再进行进一步评估。

为了比较外推雨量分布与雷达反演雨量分布的吻合程度, 据式(1)分别计算 700 hPa 外推雨量场和 DITREC 外推雨量场与雷达反演雨量场的交叉相关系数, 计算范围为图 8 中显示的范围, 即以雷达为中心的一个 301 km \times 301 km 的阵列。雨量分布比较按不同阈值分类, 共选择 9 种阈值。表 2 中给出了外推雨量场和雷达反演雨量场中各阈值以上的像素数以及各阈值以上外推雨量场与雷达反演雨量场的相关系数。表中 N_d , N_e 和 N_f 表示图 8d, 图 8e 和图 8f 中大于某一雨量阈值的像素数, R_{de} 表示某一阈值以上 DITREC 外推雨量场(图 8e)与雷达反演雨量场(图 8d)的交叉相关系数, R_{df} 表示某一阈值以上 700 hPa 雨量场(图 8f)与雷达反演雨量场(图 8d)的交叉相关系数。

由表 2 可见, 随着阈值增大, 外推雨量场与雷达反演雨量场的相关系数逐渐减小, 表明外推雨量场中的强降水落区与雷达反演雨量场中的落区偏差较大, 但用 DITREC 矢量场外推的降水落区在所有阈值下都比用 700 hPa 风场外推的落区更接近雷达反演雨量场中的降水落区。因此, 回波运动场估测是提高降水外推预报精度的重要途径。以 15:19 的 DITREC 矢量场(图 4c)的分布为例, 在(-100 km, 100 km)附

近的大部分 DITREC 矢量指向东北, 大小从 4 m/s 到 9 m/s 不等, 而在(90 km, -60 km)附近的矢量则指向东, 大小在 20 m/s 以上。可见, 回波运动场分布是很不均匀的, 不能简单地以 700 hPa 风场代替, 而且探空资料分辨率太低, 外推时选用的 700 hPa 风场和大小稍有改变, 就会导致外推结果的变化。

表 2 外推预报雨量场与雷达反演的小时累积雨量场比较
Table 2 The comparing the extrapolative hourly precipitation with the accumulated hourly precipitation retrieved from the radar data

雨量阈值(mm)	N_d	N_e	N_f	R_{de} (%)	R_{df} (%)
2	41300	44604	40973	74	65
5	18704	19541	17716	69	60
10	6605	7339	6830	65	54
15	2667	3090	2596	63	52
20	2013	2117	1801	60	49
25	976	911	701	45	29
30	563	529	281	35	20
35	298	210	90	24	12
40	142	44	1	15	0

5 结论和讨论

本文在常用的相关方法跟踪回波运动的 TREC 技术基础上, 发展了基于差分图像的 DITREC 技术, 并将 DITREC 矢量场用于 1 h 降水外推临近预报。分析表明:

(1) DITREC 矢量场消除了 TREC 矢量场中由于回波型的迅速变化导致的一些无序矢量, 使得 DITREC 矢量场的时间连续性和空间连续性好于 TREC 矢量场。DITREC 矢量场在整体上与 TREC 基本一致。

(2) 对飑线和混合性降水等回波进行跟踪得到的 TREC 或 DITREC 矢量的径向分量与多普勒雷达的测值有明显差别, 而对热带风暴回波进行跟踪时 TREC 或 DITREC 矢量的径向分量与多普勒雷达的测值较为一致。

(3) 需要 3 张间隔 5 min 左右的反射率因子图像序列才能生成一个 DITREC 矢量场。由于在差分过程中一些对应像素点之差在门限 T 以内的回波点被消除, 因此 DITREC 矢量数少于 TREC 矢量数。

(4) 分别用 DITREC 矢量场和 700 hPa 风场作为回波运动估测场外推合肥 CIDRAD/SA 雷达反射率因子复合扫描图, 得到 1 h 外推降水场。以地面

雨量计测值为标准对外推结果进行评估。同时参加评估的还有雷达反射率因子复合扫描图累加平均后经相应 $Z-R$ 关系反演得到的小时累积雨量。分别采用两种经验 $Z-R$ 关系。结果表明,随着雨量阈值增大,外推和雷达反演的降水精度均下降;DITREC 外推降水的评估指标大多介于 700 hPa 外推和雷达反演降水的指标之间,即 DITREC 外推小时降水优于 700 hPa 外推小时降水,但其精度还与所采用的 $Z-R$ 关系有关。

(5) 将外推雨量场和雷达反演雨量场分阈值求相关后表明,外推雨量场中的强降水落区与雷达反演雨量场中的落区偏差较大,但用 DITREC 矢量场外推的降水落区在所有阈值下都比用 700 hPa 风场外推的落区更接近雷达反演雨量场中的降水落区。因此,回波运动场估测是提高降水外推预报精度的重要途径。

目前,外推方法仍然是临近预报的主要方法。多普勒雷达提供了某一距离库中的平均径向速度,但多普勒径向速度与回波运动矢量的径向分量的一致性与回波类型有关^[12,15,20]。另外一种方法是用探空得到的风场对回波进行外推。Smith^[25]发现,降水区的移动与任何层次的风场都没有可靠的相关。研究表明^[26],尽管用 700 hPa 风场对回波区进行外推得出的预报比假设回波不运动的预报结果有明显改善,但不如进行模式匹配(pattern matching)后获取运动场再外推的预报结果好。TREC 技术也是一种模式匹配方法,只是在模式匹配前没有进行回波分割(segmentations)。但 TREC 受回波型迅速变化的影响较大。尽管本文中所取的回波块尺度已较大,即 39 km × 39 km,得出的 TREC 矢量场中仍存在一些无序矢量。在研究的两个个例中,DITREC 矢量场较 TREC 矢量场具有更好的空间连续性和时间连续性。由于 TREC 方法的假设条件是回波本身的空间分布近似不变,而 DITREC 方法的假设条件是反射率因子差分图像(时间梯度图像)的空间分布近似不变,但是否能得出在同样的时间间隔内回波空间分布的变化比时间梯度图像变化快的结论,还需要今后的进一步研究。

本文在回波外推过程中没有考虑回波变化,这是造成预报误差的一个重要原因。Li 等^[15]在降水临近预报的研究中考虑回波生消时,沿着由 2 min 间隔的反射率因子场得到的 COTREC 矢量的方向

计算回波在 2 min 内的生消区域,结果表明在地形降水和对流风暴中这些回波生消区对 20 min 后的回波生消情况具有一定的预报作用。因此,今后有必要研究怎样在外推过程中利用 DITREC 矢量场研究回波变化信息,以及如何利用这些信息提高预报精度。

外推得到的雨量场中大于某一雨量阈值的像素数的多少与 $Z-R$ 关系有关。由于 $Z-R$ 关系与地区及降水类型有关,选择不同的 $Z-R$ 关系将得到不同的雨量大小。Li 等^[13]根据香港境内雨量站数据,求得最配合当时情况的 $Z-R$ 关系,并随着每 5 min 传送的实时资料,不断更新 $Z-R$ 关系。在业务上,预报员往往将天气雷达回波图像进行动画显示,以获取回波运动信息。然而,只有通过图像处理技术才能实时、定量地提取较全面的回波运动场信息。作为一种可以实时显示的产品,DITREC 矢量场有利于对回波的运动情况进行实时分析。但需要 3 张间隔 5 min 左右的反射率因子图像序列才能生成一个 DITREC 矢量场,而只需 2 张图像就能生成 1 个 TREC 矢量场。由于目前新一代天气雷达都是采用连续的体积扫描方式,因此不间断的资料是容易得到的。

致谢:文中雨量计资料由“黄淮试验”项目技术组收集,主要由气象部门和淮河水利科学委员会提供。

参考文献

- [1] 程明虎,刘黎平,张沛源等.暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法.北京:气象出版社,2004.254pp
Cheng Minghu, Liu Liping, Zhang Peiyuan, et al. The Retrieval Theories and Techniques of Observed Doppler Radar Data for Heavy Rainfall Events. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 254pp
- [2] 杨洪平,万蓉,石燕等.淮河流域“6.30”暴雨过程的三部雷达联合反演降水分析.见:中国气象学会水文气象学委员会编.气象科技创新与大气科学发展(7).北京:气象出版社,2003.423pp
Yang Hongping, Wan Rong, Shi Yan, et al. The precipitation estimation of “6.30” heavy rainfall process in Huaihe basin using tri-weather radar. In: CMS Commission for Hydrometeorology, eds. The Science and Technology Innovations and the Development in Atmosphere Science (7). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 423pp
- [3] 姚学祥,徐晶.2003年淮河流域大水期间体积降水量的研究.气象学报,2004,62(6):803-813

- Yao Xuexiang, Xu Jing. A study of volumetric precipitation during the Huaihe river basin floods in 2003. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2004, 62(6): 803-813
- [4] Wilson J W, Crook N A, Muller C K, et al. Nowcasting thunderstorms: a status report. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(10): 2079-2099
- [5] Berenguer M, Davila J, Corral C, et al. Hydrological evaluation of a nowcasting technique applied to flood forecasting. Preprints, 31th Conf on Radar Meteorology, Seattle, Washington, Amer Meteor Soc, 2003. 708-709
- [6] Hilst G R, Russo J A Jr. An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns. Tech Memo No 3, Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 1960. 34 pp
- [7] Kessler E, Russo J A. Statistical properties of weather echoes. Preprints 10th Weather Radar Conf, Washington, D C, Amer Meteor Soc, 1963. 25-33
- [8] Crane R K. Automatic cell detection and tracking. *IEEE Trans. Geosci Electron*, 1979, GE-17: 250-262
- [9] Bjerkaas C L, Forsyth D E. Operational test of a three-dimensional echo tracking program. Preprints 19th Conf Radar Meteorology, Miami Beach, Amer Meteor Soc, 1980. 244-247
- [10] Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 1978, 273: 287-289
- [11] Smythe G R, Zrni Ć D S. Correlation analysis of Doppler radar data and retrieval of the horizontal wind. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 297-311
- [12] Tuttle J D, Foot G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *J Atmos Oceanic Tech*, 1990, 7: 218-232
- [13] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS: an evolving nowcasting system. Technical Note, 100, Hong Kong Observatory, 2000. 28pp
- [14] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast System. *Wea Foreca*, 2003, 18(4): 545-561
- [15] Li L, Schmid W, Joss J. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J Appl Meteor*, 1995, 34: 1286-1300
- [16] Jain R, Kasturi R, Schunck B. *Machine vision*. New York: McGraw-Hill, 1995. 568pp
- [17] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting: A radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Tech*, 1993, 10(6): 785-797
- [18] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翊等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. *气象*, 2004, 30(1): 38-40
- Zheng Yuanyuan, Yu Xiaoding, Fang Chong, et al. Analysis of a series of tornado events during 8 July 2003 in Anhui province with new generation weather radar data. *Meteor Mon* (in Chinese), 2004, 30(1): 38-40
- [19] Rinehart R E. A pattern recognition technique for use with conventional weather radar to determine internal storm motions. *Atmos Tech*, 1981, 13: 119-134
- [20] Tuttle J, Call R. A single-radar technique for estimating the winds in tropical cyclones. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(4): 653-668
- [21] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 377-395
- [22] 张亚萍, 刘钧, 夏文梅等. 雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算. *南京气象学院学报*, 2002, 25(5): 640-647
- Zhang Yaping, Liu Jun, Xia Wenmei, et al. The calculation of beam blockage coefficients in estimating regional precipitation with radar. *J Nanjing Inst Meteor* (in Chinese), 2002, 25(5): 640-647
- [23] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size. *J Meteor*, 1948, 5: 165-166
- [24] Colle B, Westrick K, Mass C F. Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season. *Wea Foreca*, 1999, 14: 137-154
- [25] Smith D L. The application of manually digitized radar data to short-range precipitation forecasting. Preprints 16th Conf on Radar Meteorology, Houston, Texas, Amer Meteor Soc, 1975. 347-352
- [26] Tatehira R, Sato H, Makino Y. Short-term forecasting of digitised echo pattern. *Kisho-cho Kenkyu Jiho*, 1976, 26: 188-189

ESTIMATION OF WEATHER RADAR ECHO MOTION FIELD AND ITS APPLICATION TO PRECIPITATION NOWCASTING

Zhang Yaping^{1,2,3} Cheng Minghu¹ Xia Wenmei⁴ Cui Zhehu¹ Yang Hongping⁵

1 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

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

3 *Chongqing Municipal Meteorological Bureau, Chongqing 401147*

4 *Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008*

5 *Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074*

Abstract

An extension of TREC (Tracking Radar Echo by Correlations) technique, named Difference Image-based Tracking Radar Echo by Correlations (DITREC) is presented and evaluated, in which individual features in two difference images from three temporally successive radar reflectivity images are tracked, by finding the maxima in the cross-correlation function between the two successive difference images.

Examples are presented where the TREC and DITREC algorithm were applied to two cases: one is the squall line case on 8 July 2003 from Hefei CINRAD/ SA radar, and the other the tropical revolving storm case on 19 July 2005 from Wenzhou CINRAD/ SA radar. For the two cases, Doppler radar data were available and the radial components (with respect to the radar) computed by the TREC and DITREC could be compared. It is found that the DITREC eliminated those chaotic vectors shown in the TREC which are caused by the rapid changes of reflectivity within the radar echo patterns, and improved the temporal and spatial continuity of the velocity field of echo motion. In general, the DITREC radial components were consistent with the TREC ones, and the TREC and DITREC appeared to work in the lower few kilometers of the tropical revolving storm where the vertical wind shear was relatively weak. On the other hand, the TREC and DITREC vectors determined in squall line situations tended to reflect the mean advection of the rain cell, which could be quite different from the Doppler radar observations.

Advecting the hybrid scan reflectivity measured by HeFei Doppler radar with the field of the DITREC vectors and the 700 hPa wind fields, yields the extrapolative hourly precipitations, respectively. The evaluation of the extrapolated hourly precipitations based on the gauge rain data shows that the hourly precipitation extrapolated using the DITREC vectors is closer to the gauge rain data than one by the 700 hPa wind fields, however its precision is also related to the $Z-R$ relation used.

The growth and decay of radar echoes are not considered when advecting the hybrid scan reflectivity. The future work may be to investigate how to reduce the errors due to nonlinear temporal changes in the intensity and velocity of rainfall patterns.

Key words: Weather radar, Echo motion field, Precipitation, Nowcasting.