

综合临近预报系统“雨燕”(GRAPES-SWIFT)的研究开发

冯业荣¹ 曾沁¹ 梁巧倩¹ 万齐林² 胡胜¹ 汪瑛¹ 傅明治³ 伍志方¹ 谌志刚¹
(1 广东省气象台 2 中国气象局广州热带海洋气象研究所 3 广州市南沙区气象局)

摘要

广东省地处亚热带,强降水、雷暴、冰雹和龙卷等剧烈天气时有发生。这些剧烈天气常导致严重的损失,例如突发强降水可造成城市内涝,导致城市或乡村山体滑坡等灾害。必须建立更准确及时的短时定量降水预报和剧烈天气临近预报,以满足近年来政府防灾减灾部门和社会公众的需要。

剧烈天气时空尺度非常小,为了做好预报,需要建立临近预报系统。各种临近预报算法通常依赖高分辨率的中尺度数值预报模式,一些现代化的观测手段如多普勒雷达、卫星和自动站等。

突发性强烈天气往往来去匆匆,用常规手段预报效果较差,提前 24 小时进行天气预报难度很大,必须建立短时临近预报系统,提前 1-3 小时做出预报。短时临近预报系统必须建立在高分辨率的中尺度数值预报模式和现代化探测数据的基础上。从 2001 年起广东相继建立了多部新一代多普勒天气雷达;建成 700 多个地面自动气象站,全省平均探测间距达 10-20 公里,部分经济发达地区达 5 公里,探测时间 6 分钟一次。我国自主开发的数值预报模式 GRAPES 已经在广东省移植成功,可提供高分辨率(12km)的数值预报产品。我国第一颗业务静止气象卫星风云 2C 于 2004 年 10 月 19 日成功发射后,开始提供卫星探测产品。闪电定位仪也开始提供监测数据。另外,风廓线雷达、GPS 水汽探测等非常规探测手段也将逐步在我省布设。上述现代化建设提供了高时空分辨率的原始气象数据和数值预报产品,使开发分辨率高的短时临近预报系统成为可能。

本文介绍综合临近预报系统(GRAPES-SWIFT)的设计理念和方案。“雨燕”的核心技术建立在我国自主开发的数值预报模式 GRAPES 提供的高分辨率数值预报产品,高时空分辨率的新一代多普勒天气雷达探测资料,遍布全省的地面自动气象站组成的稠密地面探测资料、气象卫星风云 2C 资料和其它探测资料的基础上,对各种中小尺度非常规探测资料进行质量控制,提取静止卫星反演资料,充分利用新一代多普勒天气雷达的数字化信息,提供雷达定量估测降水,短时定量降水预报,雷暴单体追踪和预报,雷达回波交叉相关推导风,基于中尺度数值预报模式(GRAPES)的强对流天气潜势和概率预报,基于 GIS 的风暴定位和报警等预报产品。系统利用数值模式释用技术,变分同化技术,交叉相关技术,风暴谱分析,风暴追踪等先进的方法,建立各种客观定量的临近预报算法。另外,系统在数据流控制、系统调度、系统稳定性方面也利用了先进的计算编程技术和方案。

系统将实现对中小尺度天气系统进行监测、跟踪、定位和诊断,对短时强降水、雷雨大风、龙卷风、冰雹等强对流天气进行自动识别、预报和预警。

Introduction to GRAPES-SWIFT Nowcasting System

Feng Yerong¹ Zeng Qin¹ Liang Qiaoqian¹ Wan Qilin² Hu Sheng¹ Wang Ying¹ Fu Mingzhi³
Wu Zhifang¹ Chen Zhigang¹

(1 Guangdong Meteorological Observatory, 2 Institute of Tropical and Marine Meteorology of Guangzhou, CMA, 3 Meteorological Bureau of Nansha District, Guangzhou)

Abstract

The subtropical synoptic situations of Guangdong Province favor the occurrences of severe weathers such as heavy rainstorm, strong thunderstorm, large hail and tornado. These severe weathers could bring great losses and damages to the area, e.g. the sudden heavy rains could flood the streets in cities or produce landslips in urban and suburban areas. More accurate and timely short-range quantitative precipitation forecast and severe weather nowcast are required by disaster mitigation and deduction authorities and the public more recently.

Severe weathers often have very short life cycles and small spatial scales. In order to forecast such weathers, nowcast techniques are needed. The nowcast algorithms are often dependent on high resolution mesoscale numerical prediction model and several advanced observation tools such as Doppler Radars, satellites and automatic weather stations etc.

Since 2001, several new generation Dopple Radars have been deployed in Guangdong Province. Over 700 automatic weather stations have been set up over the province which are spacing 10-20 km on average, or even 5 km in some developed regions, and sampling every 6 minutes. The Global/Regional Assimilation and PrEdiction System (GRAPES) model which were developed by CMA is run operationally and outputs high resolution products. China's geostationary satellite FY2C provides images since October 19, 2004. The lightning ranging systems start to provide observational data. The wind profilers and Global Positioning System (GPS) moisture monitoring instruments will be deployed shortly. These facilities are providing or will provide better information for the development of a nowcast system.

This article will deal with the ideas and scheme that have been/will be used in the development of the GRAPES based Severe Weather integrated Forecasting Tools (GRAPES-SWIFT) nowcast system. The core algorithms of this system are based on high resolution GRAPES model's hourly assimilation cycle data and its 6h predictions, data from China's Next generation Doppler Radars, dense surface observation data from automatic weather stations, and data from FY2C satellite. GRAPES-SWIFT has incorporated/will incorporate techniques such as Radar quantitative precipitation estimation, 0-3h quantitative precipitation forecast, thunderstorm cell identification, echo-motion-derived winds by method of tracking radar echoes by cross correlation (TRECWIND), convective weather potential, and GIS-based storm positioning and technique of automatically issuing the warning signals of thunderstorms.

The system uses model output statistics (MOS) technique, variational assimilation, cross

correlation, storm spectrum analysis and storm tracking method to objectively develop several quantitative nowcast algorithm. In addition, specific efforts on computational schemes and programming have been made carefully in order to improve the system's data flow control, system coordination and stability.

The system is aimed at automatically identifying, monitoring, tracking and positioning stormscale systems and making quantitative nowcasting and warning for severe weathers such as heavy rainstorms, damaging winds, tornadoes and large hails.

综合临近预报系统“雨燕”(GRAPES-SWIFT)之0—3小时雷达外推算法研究

冯业荣¹ 曾沁¹ 梁巧倩¹ 万齐林² 胡胜¹ 黄燕燕²

1 广东省气象台

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所

3 广州市南沙区气象局

1、引言

广东地处低纬副热带地区,热对流、强雷暴、龙卷等具有中小尺度特征的强对流天气出现频繁、强度大、局地性明显^[1],给短时临近预报业务加大了难度,另一方面随着社会经济的发展,对短时临近预报又提出了更精细更准确的要求。但目前由于模式误差、资料同化等造成数值模式在初始几小时的不稳定,使得数值模式的短时临近预报与需求还存在着明显差距。因此,发展短时临近预报技术愈显重要。

短时临近预报技术是自20世纪60~70年代在外推雷达回波的基础上发展起来的^[2],近十年来随着天气雷达技术的进一步发展,以雷达资料为基础的对流天气临近预报技术研究进展很快,在当今国际上,已发展了一些先进的临近预报系统^[2~3],但在我国,临近预报技术与国际先进水平相比还有一定的差距,因此致力于开发适合本地应用的短时临近预报技术很有必要。

雷达回波的移动问题是基于雷达回波的短时临近预报技术研究中的两个关键问题之一。除了最早的线性外推外,一般有两种算法可以确定雷达回波的移动,即交叉相关追踪算法(Tracking Radar Echoes by Correlation, TREC)和回波特征追踪算法^[2~7],其中TREC方法及其扩展方法目前被广泛应用于确定雷达回波移动的引导风场,也是国际上许多临近预报系统的主要算法之一。其基本原理 Rinehart 和 Garvey^[8]以及 Li 等^[4]已有较详细的阐述,就是利用相邻 ΔT 时间的两个时刻雷达回波图 T_1 和 T_2 ,对 T_2 时刻的雷达回波,以某一小面积 a 为单位,在 T_1 时刻的雷达回波图上以 a 的中心位置为圆心一定的扫描半径 R 内寻找与 a 相关最好的同面积 b ,认为雷达回波从 b 的位置到 a 的位置就是雷达回波 a 在 ΔT 时间内的平均移动距离;遍历 T_2 时刻所有雷达回波单位 a_n ,在 T_1 时刻雷达回波图上找出最好的相关,就可以得到所有小面积回波单位 a_n 的移动距离,其中 n 是划分单位的个数,也是移动距离个数。移动距离除以间隔时间 ΔT 可得 a_n 的移动速度,从而得到 T_2 时刻雷达回波移动风矢量。由于计算面积 a 的截取、地形影响等原因,直接由 TREC 方法得到的移动风矢量与实况有一些不可避免的偏差,在实际应用中发展了多种在 TREC 方法基础上订正和调整的扩展方法。有研究表明^[2,3,6],利用 TREC 及其扩展方法推导的移动风矢量进行雷达回波的平流外推在1小时内是有效的^[2, 7]。因此,本文也将在 TREC 方法的基础上采用多种有效的调整方法和插值手段来获得高精度平滑的雷达回波移动视风场,并采用带补偿的差分格式实现雷达回波的1小时移动预测。

对于要求日益精确的短时临近预报,1小时的预测提前量将越来越无法满足需求。一般的中小尺度系统生命史在2~3小时左右。对于较长生命史的系统,其雷达回波的移动预测有效时间也越长。因此期待更长时间的有效预测。但2~3小时的雷达回波移动预测目前比较少见,Seed 等^[7]假设3小时内引导风场的变化可以忽略的情况下,利用扩展的 TREC 方法得到的风场推导了

3 小时的雷达回波位置。此外,也有利用数值模式进行运算,得到模式输出的雷达回波外推结果,但如前所述,这种基于模式预报直接输出的短时定量预测是受限于目前由于资料观测同化等过程造成的系统不稳定。考虑到随着雷达回波的生消发展,只有相对大尺度的系统性的回波才能持续到 2~3 小时,相应的也应由相对大尺度的环境风场来引导。因此,本文将引入中尺度数值模式稳定的短期风场预报输出,与 1 小时雷达回波移动视风场实现无突变过渡,并寻找最佳的高空层次风场作为 2~3 小时雷达回波移动的引导风场,从而实现雷达回波 2~3 小时的移动预测。

本文的具体章节如下:第二部分对使用的资料进行说明,第三部分对雷达回波 0~3 小时移动预测的引导风场及相关技术进行阐述,第四部分对雷达回波 0~3 小时预测方案中的参数选择和预报效果进行初步评估和讨论,第五部分给出结论。

2、资料

所用的雷达资料为 2006 年广东省 3 公里高度 CAPPI 雷达反射率因子拼图^[9]资料,(单位 dbz,简称雷达回波),拼图范围为 108.98°~118.98°E、19.32°~27.32°N,分辨率为 0.01°×0.01°(约为 2×2 公里),时间分辨率为 10 分钟。参与拼图的 6 台多普勒雷达分别位于广州、韶光、阳江、深圳、梅州和汕头。

所用的数值模式资料为广州热带海洋气象研究所提供的逐时循环同化系统输出的 12~24 小时的逐时预报风场资料。其中逐时循环同化系统是基于 Grapes 3 DVAR 变分同化系统和 Grapes 模式,逐小时 3 DVAR 同化各种观测资料,进行 1 小时模式预报,并为下一时次的同化提供初估场,如此循环运转的数值模式。它可以充分利用所获得的观测资料,及时对模式物理量场进行调整和修正,从而提供质量更好的初始场进行模式预报,为避免不断同化导致物理量场之间的不平衡,系统采用了数字滤波来滤除高频振荡。该系统为非静力模式,陆面过程采用 slab 方案,参数化选用 Betts-Miller-Janjic 方案,所用的观测资料主要是地面观测资料、探空资料、船舶资料、飞机报文、卫星资料、雷达 VAD 等。目前该系统的模式区域为 (105°E~130°E, 10°N~31°N),空间分辨率 0.12°×0.12°,垂直方向为 17 层。

3、雷达回波 0~3 小时移动预测

3.1 雷达回波 1 小时移动的引导风场

雷达回波 0~3 小时的移动预测方案是基于如下的假设进行的,即雷达回波的移动是受环境风场的引导,并且环境风场在 0~3 小时内是缓慢变化的,不存在明显的突变。因此,确定了环境引导风场(以下简称为引导风场),就可以采用有效的差分格式对雷达回波进行移动预测。对于 1 小时的雷达回波移动,本小节采用了扩展的 TREC 方法由已知的前后一定间隔的两个时刻雷达回波资料获得当前的雷达回波移动风矢量,并假设该移动风矢量就是未来 1 小时雷达回波移动的引导风矢量。具体的方法步骤如下:

首先,利用 TREC 方法对前后相隔 ΔT 时刻的雷达回波资料进行计算得到雷达回波区域内的移动风矢量,然后采用如下步骤对雷达回波存在的区域的移动风矢量进行误差订正和调整:

(1) 对风速绝对值大于周围格点非缺省风速均值 1.5 倍的格点,其风向风速由周围 4 点的非缺省均值来代替。因为风速绝对值大于周围格点非缺省风速均值 1.5 倍意味着该格点的风速可能是极端值或异常值。这通常是由于单位面积 a 内存在回波边界或强度间的分界线,使得 TREC 方法计算相关的过程中寻找到的面积 b 内也有类似的分布但 a 和 b 间不存在前后移动的关联性从而产生明显误差。(2) 对风向与周围 4 点非缺省风向有大于 30°偏差的格点^[5],风向风速将由周

围格点的非缺省均值来代替，从而消除 TREC 计算过程中引起的某些随机误差。(3) 对 0 风速的格点^[5]，取周围 4 点非缺省的均值来代替，若周围 4 点都是缺省值则用缺省值代替。通过这一步的调整，一些由于局地地形作用或计算误差造成的个别 0 风速将被调整，但有一定面积的回波在发展期少动的情况由于周围格点也是 0 风速而被保留。

经过上述三步的调整，回波区域内的移动风矢量得到了误差订正，其余地方都是缺省的。这种缺省值主要是由于所选 a 面积内没有回波或回波面积少于 a 面积的三分之一造成的，其次是上述调整过程中的误差格点用缺省值代替产生的。假设移动风矢量就是雷达回波移动的真实引导风，则在计算区域内每一个格点都应该存在一个风矢量。若没回波存在或回波尚未移到的区域引导风没有明显变化，则可以利用已有的移动风矢量进行空间插值来获得计算区域内的缺省值，其中空间插值采用了 Akima 的水平拟合方法 (Akima's surface fitting method)^[10]。经过空间插值可以得到雷达拼图范围的风场分辨率的移动风矢量场。

对雷达拼图范围的移动风矢量场，参考 Li 等^[5]的算法，引入变分技术，以二维无辐散的连续方程为限定条件，求解泛函 J 的极值问题，以期得到比较平滑的满足质量连续原则的风矢量场。其中：

$$J(u, v) = \int_{\Sigma} [(u - u^0)^2 + (v - v^0)^2] dx \quad (1)$$

要求满足二维的连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

式中， $u^0(x, y)$ 和 $v^0(x, y)$ 分别是上述经过调整的 TREC 移动风矢量的纬向 x 和经向 y 风分量， $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 则是变分分析所求的订正纬向和经向风分量。

变分调整后的移动风矢量分别 u、v 风分量再进行一次空间的 Akima 水平拟合，得到雷达回波资料分辨率（即 2×2 公里）的移动风矢量场，从而使得移动风矢量与雷达回波资料在空间上分辨率一致，即每一个格点上同时存在一个移动风矢量和雷达回波值。

3.2 移动预测的差分格式和补偿算法

上述利用扩展 TREC 方法得到的移动风矢量场是 ΔT 时间内雷达回波的平均移动矢量。在拉格朗日坐标下，环境引导风场的演变是几乎可以忽略的^[6]，因此可以假设 ΔT 时间内的平均移动矢量就是随后 1 小时的雷达回波移动矢量，从而在拉格朗日坐标下实现雷达回波的外推预测。

采用 Germann 和 Zawadzki 的后向外推格式^[7,11,12]对雷达回波进行外推计算。后向外推格式可表示为：

$$Z_{i,j}(t+n) = Z_{i-\Delta_i, j-\Delta_j}(t+n-1) \quad (3)$$

其中，Z 是雷达回波值 (dbz)，t 是移动风矢量场的计算时刻，也就是外推的起始时刻，n 是每隔 ΔT 时间的外推次数， $n=1, 2, \dots$ ，这里 ΔT 取 10 分钟，则 n 取 6 时是 1 小时的外推，依此类推。 $\Delta_i = u_{t,i,j} \cdot \Delta T$ ， $\Delta_j = v_{t,i,j} \cdot \Delta T$ ，其中 i 和 j 是雷达回波分辨率的格点下标，u 和 v 分别是移动风矢量的纬向和经向风分量。

对于格点化的数据，每进行一步后向格式的外推都希望 $i - \Delta_i$ 和 $j - \Delta_j$ 落在格点上。但经过调整处理后， Δ_i 和 Δ_j 都不一定是整数，因此，每一步都存在后向外推不落在格点上的问题。一

般四舍五入取整来消除这种情况。但经过一段时间如 30 分钟或 1 小时的外推就会发现，有的回波明显偏快有的则明显偏慢，整体回波的平流移动变形很大，甚至会与实况相差甚远。因此，引入取整补偿方案。

取整补偿就是在每一步的外推过程中， Δ_i 和 Δ_j 都四舍五入取整，同时把取整后的值与原值的差保存下来，逐步累计，当累计到绝对值大于 1 个格点时，将累计值取整一次性地补偿到 Δ_i 或 Δ_j 中。取整补偿过程中，单取一个 ΔT 时间步长来看，与单纯的四舍五入方法一致，但经过一定步长的累积计算，由四舍五入引起的累积误差将清 0 或接近于 0，从而使得一段时间的平流移动不会偏离实际太远。

3.3 雷达回波 2~3 小时移动的引导风场

对 2~3 小时的雷达回波移动预测，引入逐时循环同化系统输出的 12~24 小时预报的风场资料作为雷达回波 2~3 小时移动的引导风场。为保证假设中的风场缓变原则，对模式输出的 17 层风场资料分别与 1 小时的移动风矢量场进行相关计算，动态获取最相似的一层。

其中相关计算参考了冯业荣等^[13]的方法，考虑场的相似关键是风向的相似，因此首先把参与计算的模式输出风场和移动风矢量场都进行“马赛克化”，即把 0~360° 的风向分成 16 个方位角，每个方位角变化幅度是 22.5°。用 0, 1, 2, ..., 16 表示 16 个方位角和静风的值。然后计算模式风场对于移动风矢量场的均方根误差：

$$MSRT = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2} \quad (4)$$

其中 y_i 代表模式风场马赛克化后的分级值， o_i 代表移动风矢量场马赛克化后的分级值， n 是给定来计算不确定度的场的网格点数。MRST 的值越小，模式风场相对于移动风矢量场的偏差越小。再定义命中率为：

$$POD = \frac{AG}{TG} \times 100\% \quad (5)$$

其中，AG 表示马赛克化后的模式风和移动风矢量相差一个级别以内的格点数，TG 表示给定场的总格点数， $TG=n$ 。POD 越大，模式风场越接近移动风矢量场。最后计算不确定度为：

$$UNCTY = MSRT / POD, \quad (6)$$

不确定度指数综合了原始的不确定度概念和场的相似度，把衡量场相似的两个物理量同位相地结合起来，给出了模式风场相对于移动风矢量场误差的总体评价，数量上极大化地显示出两个场之间的相异程度，因此，UNCTY 的数值越小表明模式风场与移动风矢量场越相似。

对相应预报时段的模式预报输出的 17 层风场，分别与移动风矢量场计算不确定度，取 17 个不确定度中最小值对应的层次风场作为未来 2~3 小时雷达回波移动的引导风场。

4 方案的参数选择和讨论

4.1 预报方案的参数选择

雷达回波 1 小时的移动预测, 采用了扩展的 TREC 方法得到的移动风矢量作为引导风场。引导风场的有效获得依赖于 TREC 方法的有效实现, 而 TREC 方法的实现关键是 a 面积大小、雷达资料空间分辨率、移动风矢量空间分辨率、 ΔT 、最小回波值等参数的有效选择^[6]。因此, 下面分别对在广东区域内实现 TREC 方法的参数选择进行分析。

雷达拼图资料已经过严格的质量控制预处理, 只对大于 5dbz 及小于 80dbz 的回波进行计算。雷达回波资料 2×2 公里的空间分辨率 (简称为回波分辨率) 和 10 分钟的时间分辨率决定了移动风矢量只能是 3.33 ($3.33 = 2000\text{m}/600\text{s}$) 米每秒的倍数。由于采用的是拼图资料, 空间分辨率相对较粗, 相应地时间分辨率也粗, 因此对于快速生消的对流活动, 10 分钟的间隔时间将会无法捕捉到, 由此造成的误差将会延续到下一步的雷达回波移动预测结果中。但考虑 10 分钟内生消的雷达回波变化快, 这种快速生消的雷达回波比较少见, 由其造成的影响天气只能在实时监测中警报。

Rinehart 等^[6]认为 a 面积最优选择范围在 5~15 公里, 增大 a 的面积会得到比较平滑的效果, 缩小则会增大移动风矢量的误差。但具体到目前的资料精度, a 面积分别取了 10×10 公里、 22×22 公里以及 31×31 公里进行计算, 从个例的分析表明, 22×22 公里的 a 面积选择效果最优, 因此 a 面积选取了 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$, 约为 22×22 公里。

扫描半径 R 一般取雷达回波的最大可能移速 $V_{\max}$ 与时间间隔 ΔT 的乘积^[4], 其中 $V_{\max}$ 可以从当地的气象、气候信息中或实践经验中得到。在广东区域内取约 100 公里每小时的速度, 这是接近 2005 年 3 月 22 日飚线的移动速度, 也几乎是影响广东的系统性天气的极端移速。

计算过程中采用了滑动扫描, 滑动步长取 2~7 (格点), 从而决定了移动风矢量的空间分辨率 (简称为风场分辨率) 为 $0.04^\circ \times 0.04^\circ \sim 0.14^\circ \times 0.14^\circ$ 。计算的区域范围大小和滑动步长的选择决定了计算时间的长短, 计算区域越大, 扫描步长越小, 则运算时间越长。考虑到业务运行的实时性和快速响应要求, 实际的业务运行中扫描步长选择 5 (格点)。

4.2 个例分析和讨论

雷达回波 0~3 小时移动预测方案已作为广州中心气象台的“雨燕”短时临近预报系统的一部分, 实现业务试运行。下面将利用个例的结果对该方案的预报效果进行初步的评价, 并对存在问题进行分析和讨论。

2006 年 11 月 18 日夜間到 19 日凌晨 (北京时, 下同), 广东中北部出现了中到大雨降水。这是由于 500hPa 南支槽前西南风场中的小波动与 850hPa 的弱切变线相配合产生的降水, 韶关、广州和梅州的雷达可观测到明显的回波, 因此本文的雷达回波 0~3 小时移动预测方案于 18 日 22 时到 19 日凌晨 1 时逐 10 分钟对这次过程进行了业务试运行。图 1 给出的是 18 日 23 时 30 分所预测的未来 30 分钟、60 分钟、120 分钟和 180 分钟的雷达回波位置及相应时间的实况雷达回波图。由图中的预测与实况的对比可见, 30~60 分钟的雷达回波移动预测与实况有很好的吻合, 但随着预报时效的延长, 预报位置逐渐偏离实况。对 2006 年 11 月 18 日 22 时~19 日凌晨 1 时逐 10 分钟的 0~3 小时雷达回波移动预测结果, 取 TREC 方法中 a 面积大小为单元, 分别 10 分钟到 3 小时的预报时效, 区域平均的雷达回波强度与实况雷达回波强度做散点图及线性拟合如图 2 所示。图 2 从连续 3 小时 18 次预测的统计结果方面也表明 9000 多样本点对预报量与实况的线性拟合相关系数都很高, 但随预报时效的延长系数逐渐减少, 180 分钟的相关系数为 0.36, 但仍然显著, 残差平方和则逐渐加大, 表明预报时效越长, 预报相对于实况的离散度越大。无论图 1 的个例结果还是一段时间的统计结果都表明了该预测方案对 0~3 小时的预报有一定的指示意义, 尤其是 1 小时内的较好, 这与目前各家的预报效果是相当的。对于随着预报时效的延长预报效果变差的现象, 除了由于预报问题本身的存在不可预测性外, 也因为该方案只纯粹考虑了雷达回波的移动问题, 没有考虑雷达回波生消发展对移动的影响, 因此, 随着预报时效的延长, 预

报位置将不可避免的逐渐偏离实况位置，这也是该方案的一个缺陷。但是雷达回波的生消问题也是短时临近预报技术中的难点之一，是我们下一步要研究并补充到该方案中的一个关键技术问题。

由图 2 的拟合方程系数还可以发现，随着预报时效的延长，虽然拟合系数是逐渐加大的，但 50 分钟和 180 分钟预报时效的拟合方程系数又分别比 40 分钟和 120 分钟的略好，换言之，随着预报时效的延长，预报误差并没有线性增加，在相隔一定时间后预报和实况的线性拟合关系会有轻微的好转，这是因为如前文所述在差分格式上采用了补偿算法，使得预报误差略有改善。

另外，对于 18 日 22 时~19 日凌晨 1 时的过程，也利用 1 小时的引导风场作为 2~3 小时的引导风场进行了雷达回波的 2~3 小时预测，同样地对 9000 多样本点做了散点图如图 3 所示。对比图 3 和图 2h、图 2i 可知，尽管利用 1 小时的引导风场预测 2~3 小时的雷达回波移动结果的线性拟合系数略优于 2~3 小时的引导风场，但从相关系数和残差平方和来看，1 小时的引导风场得到的结果的离散性大于 2~3 小时的引导风场，因此也说明了利用模式输出的高空风场作为 2~3 小时的引导风场是优于利用扩展的 TREC 方法得到的引导风场对 2~3 小时雷达回波的移动预测，也表明了本文对 2~3 小时引导风场的假设即只有相对大尺度的系统性的回波才能持续到 2~3 小时，相应的也应由相对大尺度的环境风场来引导是有利的。

图 4 是 2006 年 11 月 18 日 22 时~19 日凌晨 1 时过程中 2~3 小时引导风场出现在各高空层次的频数图。由图可见，与 1 小时引导风场的连续性最好的模式风场高度是 700hPa，其次是 500~400hPa 之间和 100hPa。秦元明等^[15]利用实况探空资料研究认为中高纬度地区雷达回波移动的最佳引导风是 700hPa。这与上述个例的结果是基本吻合的。但考虑到广东地处低纬，对流层的伸展高度较高，对流活动的向上发展可达的层次也可能高，目前这方面的研究也是比较少见，不能更好的确定最佳高空引导风层次，因此引入了动态的最佳引导风场选择，期待经过一段时间的系统运行，获得更多的个例统计以及天气学方面的机理解释来进一步确认引导风场的层次。

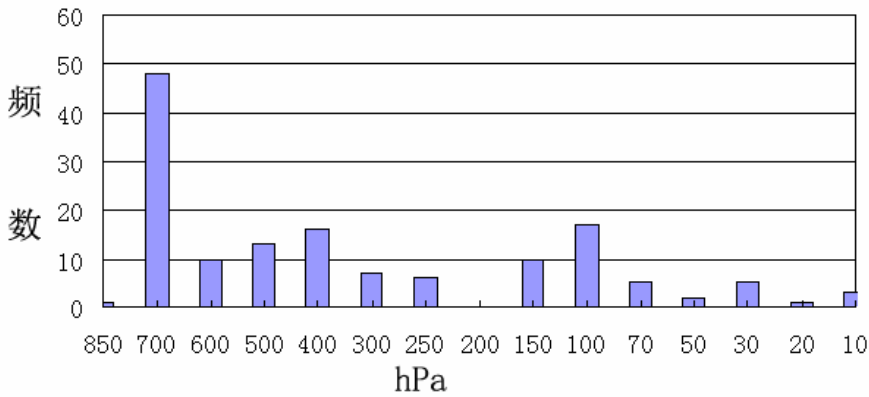


图 4 2006 年 11 月 18 日~19 日天气过程的 2~3 小时引导风场出现在各高空层次的频数图

5、结论

本文在假设雷达回波的移动是受环境风场的引导，并且环境风场在 0~3 小时内是缓慢变化的基础上设计了 0~3 小时雷达回波移动预测方案。方案的主要方法和细节如前文所述，具体的流程如图 5 所示。首先对 T_1 和 T_0 时刻的雷达回波进行 TREC 方法的计算得到雷达回波存在区域内的移动风矢量，通过对移动风矢量场的风向风速进行调整后引入以二维连续方程为限定条件的变分函数，得到平滑满足质量连续原则的全区域移动风矢量场；将移动风矢量场插值到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的格点上，采用 Germann 和 Zawadzki 的后向外推格式和取整补偿算法进行 1 小时的雷达回波移动预测；引入相应预报时段的逐时循环系统输出的 12~24 小时预报风场，17 层预报风场分

别与移动风矢量场进行不确定度的计算，以不确定度最小为原则确定最佳的高空引导风场，利用最佳引导风场对雷达回波进行 2~3 小时的移动预测。该方案作为“雨燕”短时临近预报系统的其中一个算法，在广州中心气象台实现业务试运行。

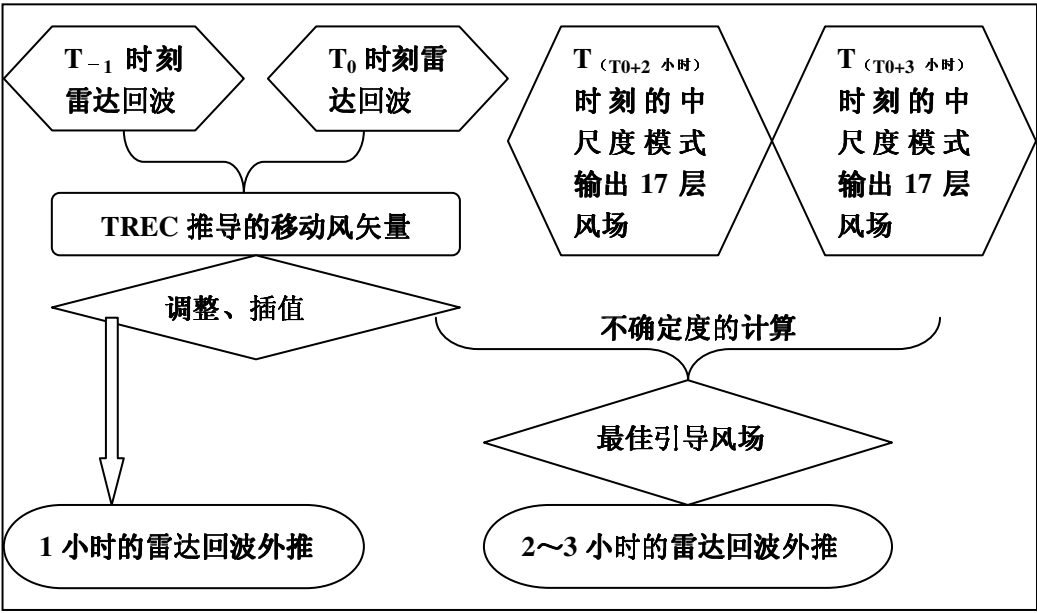


图5 “雨燕”系统中雷达回波 0~3 小时移动预测方案的流程图

参考文献

1. 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组. 广东省天气预报技术手册. 北京, 气象出版社, 2006: 202~237.
2. Edwin S.T. Lai. Advances in nowcasting. CBS Technical Conference on Public Weather Services, St Petersburg, Russian Federation, 21-22 February 2005.
3. 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, Vol.15 (6), 2004: 754-766.
4. Wilson, J.W., C. Pierce, A. Seed, M. Sleigh, R. Roberts, and C. Mueller. Sydney 2000 Field Demonstration Project- convective storm nowcasting, Proc. of the 30th Int. Conf. on Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc., 2001: 486-488.
5. L. Li and W. Schmid. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. Journal of applied meteorology, 1995, Vol.34, 1286~1300.
6. Rinehart, R. E. A pattern recognition technique for use with conventional weather radar to determine internal storm motions. Recent Progress in Radar Meteorology. Atmos. Technol., 1981, 119-134.
7. Seed A.W. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. Journal of Applied Meteorology, Vol.42:381-388.
8. Rinehar, R. E. and E. T. Garvey. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. Nature, 273, 1978: 287-289.
9. 胡胜, 伍志芳, 刘运策等. 新一代多普勒天气雷达广东省区域拼图初探. 气象科技, 2006, Vol.26 (1): 74~80.
10. H. Akima. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), Vol. 4, 1978: 148-159.

11. Germann, U., and I.Zawadzki,2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2859-2873.
12. Marc Berenguer, Carles Corral, Rafael Sanchez-Diezma, Daniel Sempere-Torres. Hydrological validation of a radar-based nowcasting technique. *Journal of Hydrometeorology*, 2005.
13. 冯业荣, 张东, 梁巧倩等。用不确定度指数对模式预报场进行实时业务化的性能评价, 气象科技 (待发表)
14. 秦元明。雷达回波移动与高空风关系的统计分析。吉林气象。7~12。

附图

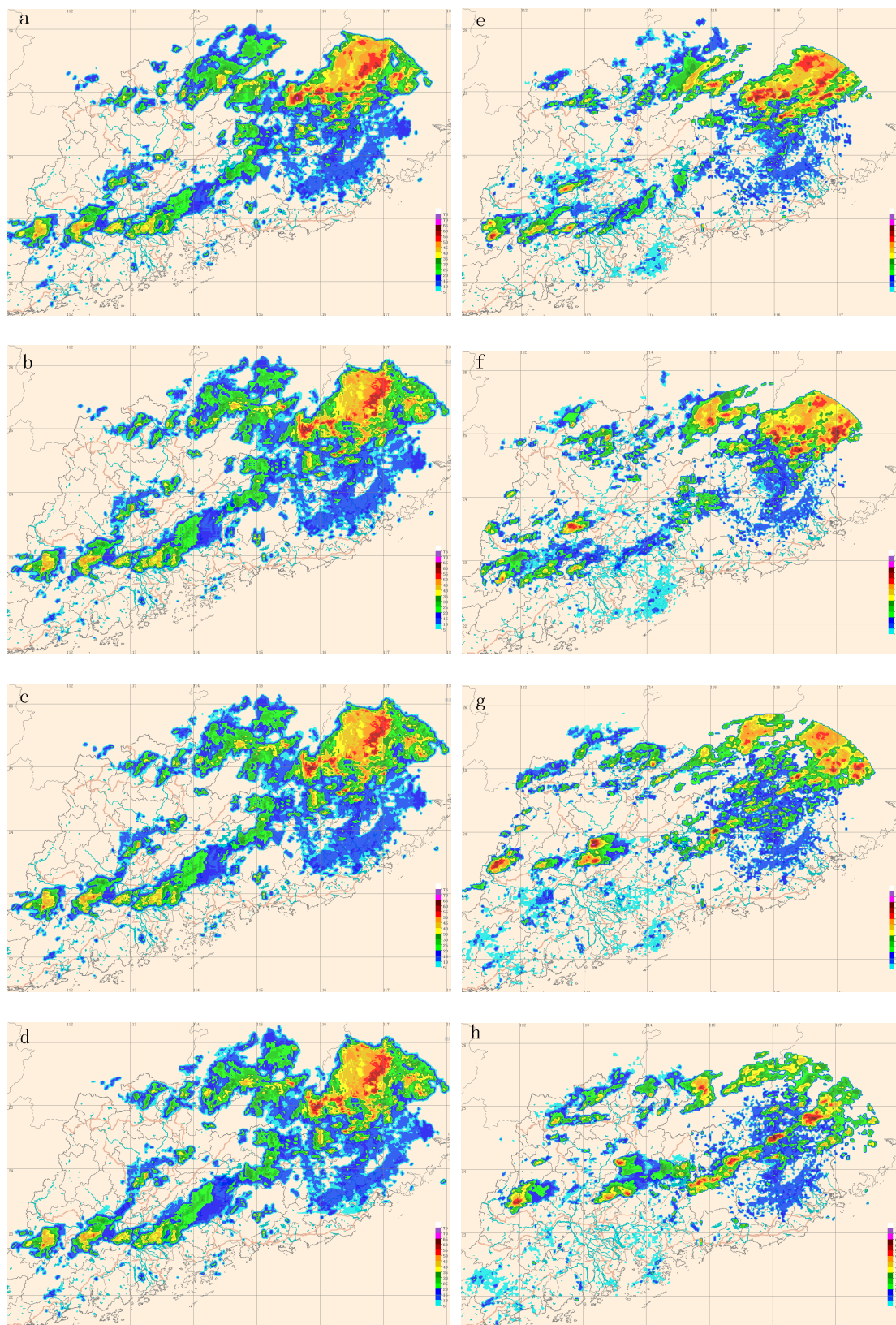
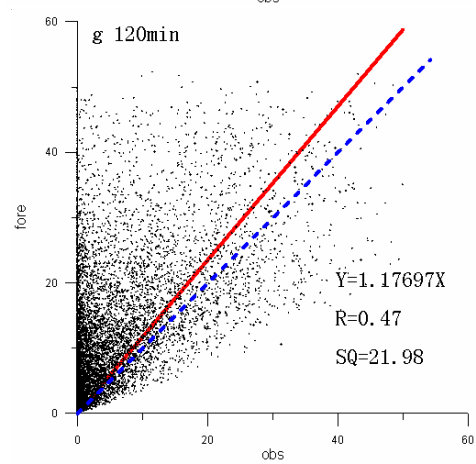
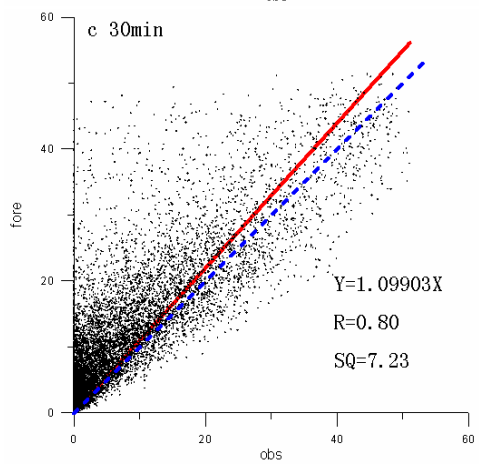
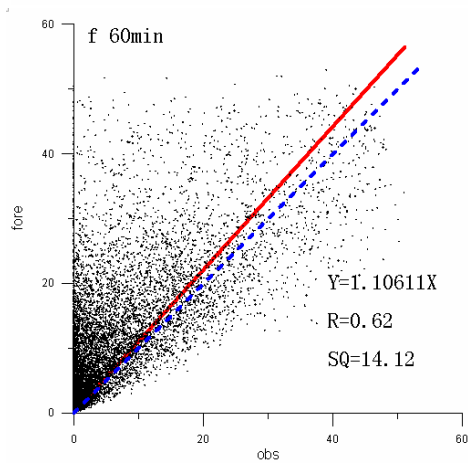
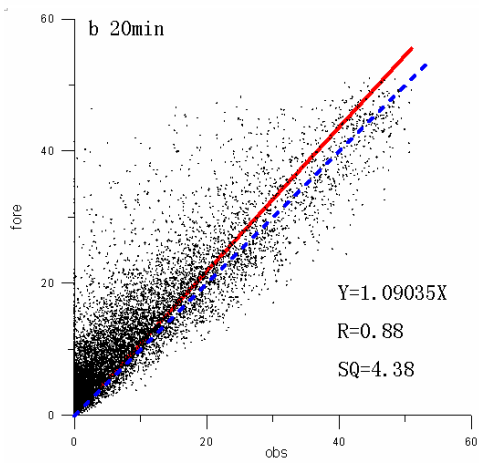
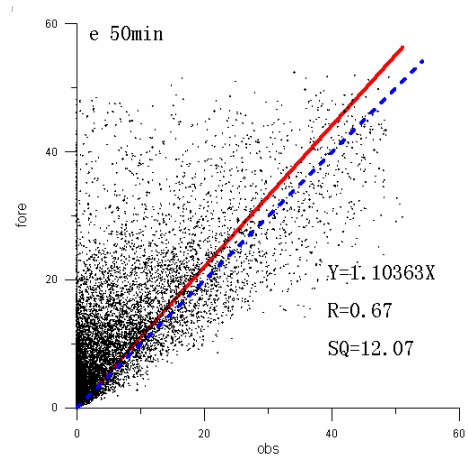
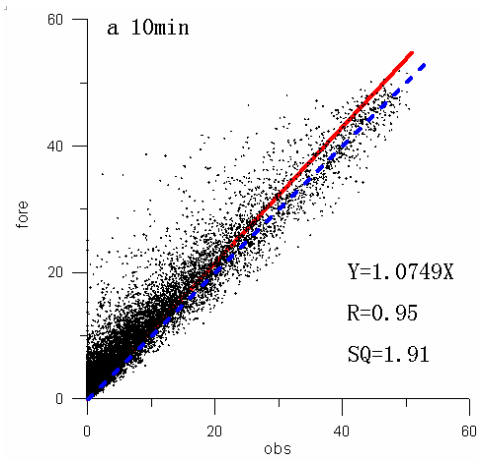


图1 2006年11月18日22时00分所预测的未来30分钟、60分钟、120分钟和180分钟的雷达回波位置(a~d)及相应时刻的实况雷达回波图(e~h)。



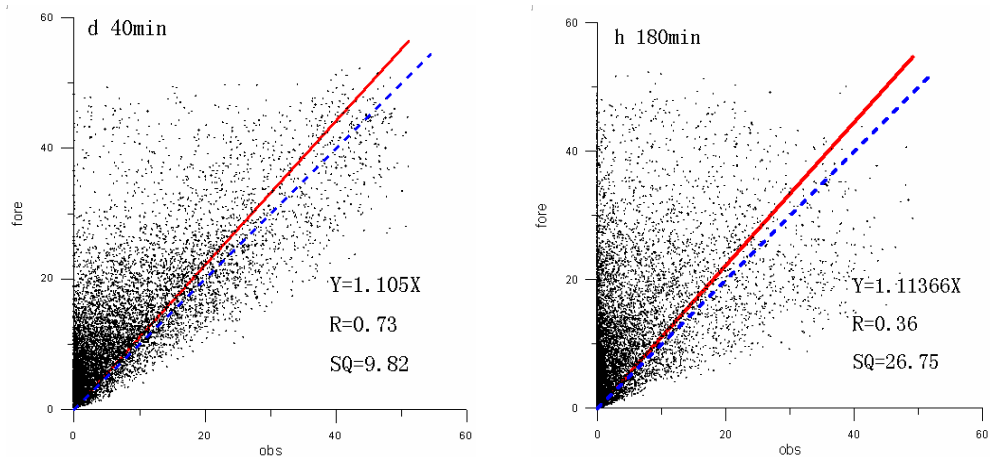


图2 2006年11月18日22时~19日凌晨1时三小时18次预报的小区域面积取样9632点样本的预测雷达回波强度和实况的散点图、线性拟合方程、相关系数及残差平方和，其中实线表示线性拟合曲线，虚线表明 $y=x$ 的曲线

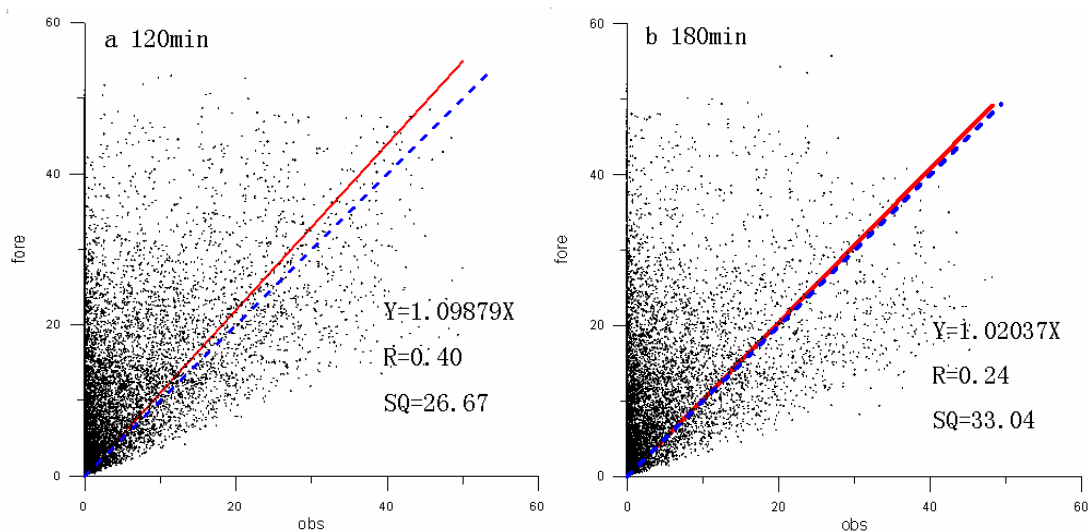


图3 利用扩展的 TREC 得到的风场对雷达回波进行2~3小时移动预测的散点图，说明同图2