

文章编号:1004-9045(2007)02-0184-07

## 多普勒天气雷达短时预报技术研究进展

杨洪平<sup>1,2</sup>, 张沛源<sup>2</sup>, 程明虎<sup>2</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 肖艳姣<sup>1,2</sup>, 张亚萍<sup>3</sup>

(1.中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2.中国气象科学研究院, 北京 100081; 3.重庆市气象局, 重庆 401147)

**摘要:** 简要介绍了短时预报技术的一些概念和基本内容, 并就国内外基于多普勒天气雷达的短时预报技术开发进展情况, 从临近外推预报和短时数值预报两方面详细叙述了包括雷达资料控制、灾害性天气预警预测、雷达资料同化等技术研究的最新动态。

**关键词:** 多普勒天气雷达; 临近外推预报; 短时数值预报

中图分类号: P412.25 文献标识码: D

### 1 引言

多普勒雷达(Doppler Radar)自从 20 世纪 40 年代开始设计与发展起, 有关多普勒雷达在气象中的应用也就随之展开。60 年代和 70 年代初期的应用与研究表明: 多普勒天气雷达(Weather Doppler Radar)非常有效地改进了灾害性风暴和龙卷的警报<sup>[1]</sup>。在 90 年代, 美国下一代天气雷达(NEXRAD) 开始投入业务运行。目前 NEXRAD 几乎覆盖了整个美国。多普勒天气雷达的观测资料成为美国短期和临近预报的主要资源。在中国, 多普勒雷达也参与了如南中国海季风试验、淮河流域能量与水分循环试验(HUBEX)、黄河淮河流域暴雨洪水监测预报系统试验、华南暴雨试验、'973 中国暴雨外场试验'等大气科学研究, 加深了对暴雨结构的理解, 增强了暴雨预报技巧。自 2000 年起开始布设的我国新一代天气雷达网(CINRAD Network), 预计在 2008 年全部建成。届时, 业务科研部门能够综合利用新一代天气雷达、气象卫星等多种探测资料, 结合中尺度数值预报模式, 开展中尺度分析和强天气预警, 极大地增强了灾害性天气的监测预报能力。

### 2 短时预报与多普勒天气雷达探测能力

短时预报一般是 0~12 h 的天气预报, 临近预报则是 0~3 h 的天气预报。广义上短时预报的对象是所有与大气运动状态有关的天气现象如雷暴、暴雨(雪)、大风、龙卷、冰雹及其大气要素如温度、气压、湿度等以及产生的中尺度天气系统如中气旋、中尺度辐

合线、阵风锋、飑线等。短时预报水平决定于我们对预报区域内各种尺度天气系统的演变及其相互作用的认识和预测能力。

目前, 短时预报更关注中小尺度天气系统所引发的强天气。雷暴、暴雨(雪)、大风、冰雹等严重灾害性天气大多由 25~250 km 的中尺度天气系统所造成, 龙卷的尺度更小。有组织的雷暴或对流等强风暴系统, 能明显地显示各种尺度系统间的相互作用, 与各种尺度的运动场、温度场和湿度场的发展都有关系。大尺度环境条件不但制约了对流系统的种类与演变过程, 还影响对流系统内部的结构、强度、运动和组织程度<sup>[2]</sup>。做好强天气的预报需要关注强风暴系统及其大尺度背景, 而天气雷达是监测强风暴的最佳手段。

多普勒天气雷达采样空间分辨率高, 间隔时间短, 探测范围达几百公里, 具备探测中尺度天气系统三维结构的能力。通过探测采样体(粒子群)的平均回波功率和多普勒频移, 提供采样体的反射率因子、径向速度和速度谱宽三个基本物理量。除了谱宽数据由于缺乏可靠性使其在实际中应用较少外<sup>[3]</sup>, 反射率和径向速度的数据图像能反映实际天气系统, 不仅成为天气预报尤其是灾害性天气预报的重要依据, 而且用于粒子识别, 降水定量估测、风场反演及通过同化进行模式预报等, 其应用十分广泛。如根据回波强度的三维结构分布特征可以确定风暴的强弱, 总结风暴发展变化规律, 分析判断可能产生的灾害性天气类型; 根据回波速度的分布特征可以确定风暴中存在的风切变、中气旋及其风场结构, 预报灾害性天气发生的时间和地点。

收稿日期: 2007-03-01; 定稿日期: 2007-04-30

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项(2004DIB3J117); 武汉区域气象中心“新一代天气雷达应用技术开发”科技创新团队专项

作者简介: 杨洪平, 男, 1969 年生, 高级工程师, 主要从事雷达资料应用和短时预报技术研究。Email: yhp\_2001@163.com

强对流天气预警的一个重要手段就是依赖于雷达的监测。由于强对流天气对流发展旺盛,雷达回波强,可以分析为一个个的风暴系统。但总的来说,科学预报强对流天气的方法只能是基于认识经验、数值模式、统计模型、概念模型等方法或者上述方法的结合。因此,应用多普勒雷达探测强天气,也是基于雷达数据中的强天气特征信息,建立合适的数学物理模型,进行分析、预警和预报。

### 3 主要的短时预报技术

目前,临近预报技术主要包括雷暴识别追踪和外推预报技术、分析观测资料为主要的概念模型预报技术以及数值预报技术等。

识别追踪和外推预报技术主要以雷达资料为基础,在这方面,交叉相关外推和回波特征追踪识别外推是比较成熟的技术,已经用于许多的临近预报业务系统中,其缺陷是预报时效较短,准确率也不是很高。

概念模型预报技术主要是通过综合分析多种中小尺度观测资料,包括雷达和气象卫星资料等,在此基础上建立雷暴发生、发展和消亡的概念模型,特别是边界层辐合线和强对流的密切关系等,再结合数值模式分析预报和其它外推技术的结果,然后建立雷暴临近预报的专家系统,其不但可以获取雷暴和对流降水移动、发展的信息,还可以预报它们的生成和消亡。

随着精细数值天气预报技术和计算机技术的发展,利用多普勒天气雷达资料和其它中小尺度观测资料进行数值模式初始化,来预报雷暴的发生、发展和消亡已经成为一个研究的热点,该技术得益于雷达资料同化技术的发展和中小尺度观测资料的获取,发展很快。

### 4 短时预报技术国内外进展情况

#### 4.1 雷达质量控制技术

天气雷达回波数据是根据实际大气中的降水粒子或湍流对雷达电磁波能量的后向散射得到的。除气象回波信息外,还包含一些杂波信息。由于采样的离散性及探测距离问题,多普勒速度测量常常造成速度模糊和距离模糊。因而需要对雷达数据进行质量控制。国内外研究出多种雷达数据质量控制方法,概括起来可以分为两类:

一类是地物回波或海浪回波的处理方法。Charalampidis等人提出采用回波纹理结构和强度特征自动消除低仰角反射率中非降水回波的算法<sup>[4]</sup>。Lakshmanan等人研究出用反射率垂直廓线剔除WSR-88D基本反射率数据中非降水回波和基于神经

元网络技术速度与谱宽数据质量控制的实时处理方法<sup>[5]</sup>。Kessinger等人研制出基于模糊逻辑技术分析回波纹理结构特征进行异常传播(Anomalous Propagation)杂波消除的方法<sup>[6]</sup>。Zhang等人开发出基于反射率水平和垂直梯度特征的非降水回波消除方法<sup>[7]</sup>。

另一类是可能导致径向速度观测错误的距离折叠和速度模糊处理,相应地发展了许多退距离折叠(Range-folding mitigation)和退速度模糊(Velocity ambiguity dealiasing)的方法。Eilts和Smith提出一种在雷达径向上比较前后速度差异的退速度模糊方法<sup>[8]</sup>。Jing和Wiener又提出一种新的最小化雷达风场不连续的二维退模糊技术<sup>[9]</sup>。梁海河等研究了双多普勒天气雷达风场退模糊方法<sup>[10]</sup>。

#### 4.2 灾害性天气监测预警

上世纪七十年代以来,国内外开展了非常多的利用多普勒天气雷达进行暴雨、冰雹、龙卷、雷雨大风等灾害性天气监测预警的技术研究。这些研究主要是根据强天气的雷达反射率特征或者径向速度特征来分析产生这些天气的强对流风暴(Severe Convective Storm)系统的发生、发展、成熟和消亡的物理机制,建立了强风暴模型,提出了一些基于雷达反射率因子的风暴识别和追踪的方法,用于临近预报。

##### 4.2.1 国外进展情况

Rinehart和Garvey提出用相关的方法跟踪雷达回波(TREC)<sup>[11]</sup>,利用最大相关系数或最小绝对误差在两个连续的反射率场中寻找矩形区域的最佳匹配,得到每个格点的位移矢量。考虑到地形遮挡、回波变化快等原因,TREC分析的速度经常存在不连续,Li等人又以二维连续性方程作为强限制条件<sup>[12]</sup>,利用观测距离和计算位移构造价值函数,通过变分技术平滑速度场(COTREC)。

Dixon和Wiener结合交叉相关法和质心法用于雷暴识别跟踪分析和预报(TITAN)<sup>[13]</sup>,肖艳姣等通过对风暴形状的几何推理来处理分裂和合并<sup>[14]</sup>。杨引明等将风暴划分为带状群体和离散多单体两类<sup>[15]</sup>,在利用反射率因子三维连续结构识别出每一个单体的前提下,用椭圆拟合带状风暴系统的位置和覆盖范围。

Johnson等人提出改进的基于反射率因子图像识别技术的风暴识别追踪(SCIT)算法<sup>[16]</sup>,并应用于WSR-88D的Build9.0之后的风暴系列算法中。SCIT用质心法提取七个反射率因子阈值(30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 dBz)的回波参数,并将10 km范围内的多个单体合并为一个风暴单体。该算法不仅能够识别孤立的风暴体,而且能够识别多单体风暴和风暴带。风暴的移矢则根据近一个小时内的风暴位置采用最小二乘法

拟合得到,同时提供最大反射率因子及其高度、风暴体底高和顶高、风暴体的 VIL、风暴质心三维坐标等参数。SCIT 在方法大范围降水区的跟踪上不如区域跟踪算法有效。

Handwerker 等人 2001 年提出用雷达体扫数据跟踪对流单体的方法(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他单体的平均移速确定。而下一时次各单体的位置由各自的移速估计确定。

几十年来,水文气象学家逐渐意识到对强对流性天气造成的暴洪进行预报是困难的。由于既不能针对单个对流云进行预报,也不能有效地预报它们的演变,降水的短期预报技术通常不足以应对对流性降水。因此世界上许多国家和地区都开发了临近预报系统用于预报未来几个小时的天气。

英国的 GANDOLF 是一个自动化的临近预报系统<sup>[17]</sup>,在对流性降水发生期间运行,用于英格兰和威尔士的洪水预报。NIMROD 是一个将临近预报技术与数值模式(NWP)产品相结合的短时预报系统<sup>[18]</sup>,提供英伦三岛及周边水域未来 6 h 降水、云以及能见度的分析和预报产品。在降水预报方面,先由雷达、卫星、地面资料和 NWP 产品分析处理得到降水率;然后采用平流计算预报降水量,再用模式产品估计降水的增长或减弱,调整预报降水量;同时输出由数值预报场诊断的降水类型产品。

法国利用雷达 CAPPI 拼图制作降水临近预报。考虑地物杂波的影响,在每个格点上设置可信度标记,取 10、20 和 30dBz 三个反射率阈值采用交叉相关动态计算雨团移速,然后通过时间连续性检查平滑雨团移速,在移速不变的假定下进行外推预报。

NCAR 的 AUTO-NOWCAST 系统利用 WSR-88D、GOES 卫星、地面中尺度观测、探空、闪电资料和地形高度数据<sup>[19]</sup>,根据用户给定的权重融合多种方法的结果得到最终的 1 h 风暴预报。预报方法包括:(1)由 VIS 和 IR 通道的 GOES 卫星数据判别确定积云区,并根据云顶(IR)温度的冷却率估计垂直发展信息,进行积云增长预报。(2)辐合线的识别和跟踪,并根据雷达数据对辐合区域的边界进行外推预报。(3)利用雷达资料联合 SCIT 和 TITAN 两种方法,并通过零度层亮带识别降低融雪和软雹的影响,进而预报风暴的增长,用 TREC 技术计算边界层风,用 TITAN 识别和外推风暴。

WDSSII 是 NSSL 和 Oklahoma 大学的 CIMMS 合

作开发的第二代警报决策支持系统,不仅吸收了 ORPG 的主要气象产品算法,而且能够融合各种雷达、卫星、中尺度观测网、闪电、风廓线仪等多种观测数据和数值预报的分析预报产品,通过一个基于 GIS 技术的显示平台提供二维/三维的数据图像,进行灾害性天气的监测、分析和预警。其中,临近预报采用 K-means 和多尺度分离技术识别不规则形状的回波块,以回波块作为模版,根据最小绝对平均误差进行回波匹配计算回波中心移动,用 Cressman 插值格点移速,利用数值预报分析结合卡尔曼滤波平滑回波移速,再用回波块平均值估计回波的增长/衰亡率,根据不同尺度的回波进行不同时段的外推预报。目前,WDSSII 正与 NSSL 开发的基于三维雷达拼图的第二代降水估算系统整合,形成一套强风暴和降水的监测、预警和预报系统。

加拿大 McGill 大学开发的 MAPLE 是基于拉格朗日方法的降水临近外推预报系统<sup>[20]</sup>。该系统根据一个由小波分析得到的最优预报滤波器,从雷达反射率因子拼图数据中跟踪回波变化采用半-拉格朗日平流方案预报降水率和降水区域,并对不同尺度的降水进行滤波处理。实验证明,合适的滤波能使预报场和观测之间的相关性增强,RMS 误差减小。

澳大利亚的 SPROG 利用雷达资料探测的降水信息<sup>[21][22]</sup>,根据不同天气系统的尺度特征估计降水区的变化,制作降水的临近预报。其不同尺度的降水场特征是由一个简单的自动回归模型统计得到的。

日本的 VSRF 系统提供未来 6 h 5 km 分辨率的降水临近预报。该系统中通过图形匹配并考虑地形强迫和雨区消散等因素预报未来 3 h 降水区的移动,而将数值预报和外推预报合并得到 3-6 h 预报。

#### 4.2.2 国内进展情况

我国早在 20 世纪 50 年代开始就致力于暴雨等中尺度灾害性天气的研究,并且先后建立了“京津冀”等四大中尺度试验基地,以及目前正在执行的国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”等课题,就我国灾害性天气的短时和临近预报做了大量的研究工作,取得了许多重要的研究成果,为国家防灾减灾做出了很大贡献。但是,由于观测技术和资料等的限制,我国的临近预报技术与国际先进水平相比,还存在一定差距。

香港的小涡旋临近预报系统(SWIRLS)利用雷达和自动雨量计资料监测未来几个小时的雨量分布。SWIRLS 在 TREC 技术基础上,对移速作适当的平滑处理,进行回波块跟踪(GTrack),由此计算回波的增长/衰亡率。基于平滑后的回波移速,采用半拉格朗日

方案进行时间积分,制作每6 min的回波预报。考虑粒子的下落速度,利用雷达和自动雨量计的同步观测进行配对估计降水率,根据降水率的时间变化理想模型(拟合的高斯曲线)进行降水的3 h临近预报。TREC风还与其他观测的风场信息一起输入到LAPS中同化分析三维气旋结构。

张沛源在1991年进行了多普勒雷达资料在强天气短时预报中的应用研究<sup>[23]</sup>,提出利用多普勒速度资料分析冷锋、中气旋、辐合线、冷暖平流、风垂直切变、阵风锋等中尺度天气系统结构,利用回波识别冰雹、暴雨、飚线等强天气,并外推预报和相似预报两种短时预报方法的具体步骤。

万玉发、张家国、杨洪平等利用数字化雷达拼图联合GMS-5卫星资料估算长江中游大范围降水<sup>[24]</sup>,建立了大范围降水实时监测自动化系统(LARORAS),并利用武汉区域数值预报模式预报的700 hPa风场,根据的700 hPa风场与雨区移动方向的统计关系计算雨区的移动,进行6 h的大范围降水短时预报。

杜秉玉等以强对流天气的发生、发展为依据<sup>[25]</sup>,从中尺度数值预报模式输出结果、雷达、卫星、自动雨量站网等获取大气运动的各种动态变化资料,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”,该系统在上海地区的灾害性天气短时临近预报中发挥了积极作用。

许焕斌、段英等系统地总结了冰雹增长理论<sup>[26]</sup>,结合数值模拟描述雹云的宏观场和微观场之间的相互作用。提出多普勒速度场中水平速度“零线”的分析方法,用统计方法给出了雷达回波中冰雹云的特征和判别指标。

王改利和刘黎平以天气雷达体积扫描的资料为基础<sup>[27]</sup>,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。

梁明珠、胡志群等(2005)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)<sup>[28]</sup>,用逐步增大初始阈值法识别VIL中心区;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;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。实例结果表明:所使用的方法能很好地识别、跟踪和预报VIL中心区。

陈明轩、俞小鼎等利用天津新一代天气雷达回波资料<sup>[29]</sup>,结合TITAN方法分析2004年7月10日下午造成北京局地短时强降水的雷暴特征后认为实时监测和临近预报中新一代天气雷达和专家系统是是目前预报类似的强天气灾害的最有效途径之一。为此,中国气象局北京城市气象研究所与美国国家大气科学研究中心(NCAR)正在联合研究适用于北京地区的对流天气自动短时临近预报预警系统,并期望这个系统将能比较有效地做出雷暴的短时临近预报,在最大程度上减轻类似于“7·10”这样的突发性大暴雨造成的灾害。

张亚萍、程明虎等在TREC技术基础上发展了一种利用雷达反射率差分图像(时间梯度图像)的相关追踪回波运动的方法(DITREC)<sup>[30]</sup>,较好的消除了因回波快速变化而导致TREC矢量中的一些无序矢量,提高了的TREC矢量场的时间连续性和空间连续性。并分别用DITREC得到的回波运动矢量场和700 hPa风场引导外推雷达回波强度,预报1 h降水。与地面雨量计观测值对比,结果表明采用DITREC矢量场的外推预报效果要好于用700 hPa风场引导的外推预报。

#### 4.3 雷达资料同化技术

近三十多年随着计算机技术的迅猛发展,数值天气预报尤其是中尺度模式的发展非常迅速,如美国的ETA、MM5、WRF、ARPS和国内的AREM、GRAPES等。同时,也发展了一些同化方法,利用各种观测资料改善数值模式“初始条件”。雷达资料的同化就是目前同化研究工作一个非常重要的方面。

雷达资料同化的困难之处在于雷达探测的大气参数(回波强度和速度)不是模式的物理量,而多普勒速度也只是实际三维风场的一个分量。因此,许多学者首先考虑的是如何利用雷达数据反演模式所需要的物理量,如利用单、双和三多普勒雷达观测反演实际风场,利用反射率反演湿度廓线、相对湿度廓线和温度廓线等。自从Sasaki将变分技术引入气象研究领域后,雷达资料的变分同化技术也相应发展起来。现在,许多模式都相应建立了雷达资料的三维变分(3DVAR)或四维变分(4DVAR)同化系统。

在NCAR, Sun等发展了一个简单的云模式及其伴随模式<sup>[21,32]</sup>,开始雷达资料反演的4DVAR研究,随后Sun和Craik发展了暖云模式<sup>[33,39]</sup>。在此基础上,NCAR建立了多普勒雷达资料四维变分分析系统VDRAS, Wu等发展了VDRAS的混合位相模式<sup>[39]</sup>,在云模式中

考虑了简单的冰相过程,反演了对流风暴的所有主要特征。在悉尼 2000 年奥运会的气象预报演示计划(FDP)中,VDRAS对四个不同个例的流场,都给出了风场及其演变特征的合理分析。2001年,VDRAS发展成为一个业务模式,以中尺度分析场为背景,对雷达的PPI资料进行连续的四维变分循环同化。

ARPS(Advanced Regional Prediction System)模式系统是美国Oklahoma大学CAPS(Center for Analysis and Prediction)发展的一个全新完全非静力模式,用作对流系统、天气尺度系统以及其它尺度系统的基础和应用研究工具。其向前预报模块是建立在普适地形跟随坐标上的一个三维、非静力、可压缩模式系统,采用时步分离技术积分包含有声波项的方程,这样做可以进行水平区域分解,便于实现并行计算。模式中采用了先进的标量传输的单调平流方案和对其他变量的变分守恒四阶平流方案。同时,模式中提供了多种物理过程参数化方案供选用。

Zhang在LAPS云分析(Cloud Analysis)技术的基础上<sup>[37]</sup>,发展了利用雷达和卫星资料构建三维云水场的云分析系统,根据云中水汽凝结释放的潜热加热作用调整初始热力场,并调整了云区相对湿度分析方案。研究表明改进的湿度调整和非绝热初始化方法明显增强了对流尺度的降水预报。利用雷达和卫星资料进行云分析,有观测资料的地方,湿度调整补偿了探空资料中的水汽不足;而在缺乏观测资料的地方,热力调整则对初始的热力场和湿度场非常有必要。

Gao等又提出一种新的三维变分同化方法<sup>[38]</sup>,构造一个包括了背景场和径向观测数据的价值函数,采用质量连续性方程作为弱强迫,通过有限记忆的柯西-牛顿共轭梯度法使价值函数极小。背景误差的协方差矩阵通过一个回归滤波器拟定,并用协方差矩阵的均方根限定价值函数的极小值问题。该方法在求解滞弹性的连续性方程时没有采用显示积分方案,避免了误差积累;并且对垂直边界的不确定性也不是很敏感。通过一次超级单体过程的多普勒雷达资料分析,并与之前的研究工作对比,认为这种三维变分方法能够很好地分析出风暴的流场结构,包括内部和周围的水平环流、强的上升气流及对应的下沉气流等。该方法与云分析系统一齐构成了ARPS的雷达资料三维变分系统,即ARPS3DVAR。

Hu和Xue利用ARPS模式及其ARPS3DVAR<sup>[39-41]</sup>,通过WSR-88D雷达资料同化进行了三次龙卷过程的预报试验。试验区域采用两重套网格,格距分别为9 km和3 km。三种同化方案分别为仅同化反射率因子、

仅同化多普勒速度和同时同化两种数据。试验结果表明:好的初始条件下,模式具有对超级单体进行2 h预报的能力,较好地捕捉到超级单体的特征,如龙卷的低层强烈旋转;采用3DVAR和Cloud Analysis处理,在风暴预报中反射率显然比径向速度的贡献大;反射率和径向速度的同化明显改进风暴的预报,而单同化径向速度不能预报所有的风暴,同时同化反射率因子和径向速度得到较好的预报。

集合卡尔曼滤波(EnKF)的同化技术近年来发展很快。Tong和Xue建立了基于EnKF的雷达资料同化系统<sup>[41]</sup>。通过同化一个超级单体的模拟雷达资料证明了该方法能够在多种冰微物理方案中准确反演风场和热动力场。经过周期性的同化反射率因子和多普勒速度,EnKF方法能很好的重建风暴。在同化一段时间之后,对超级单体的2 h预报效果都很好。

国内许多学者也在雷达资料同化方面做了许多工作。

郭霞等<sup>[42]</sup>、徐玉貌等<sup>[43]</sup>利用雷达反射率资料调整模式的水汽场,都改善了降水强度和位置的预报。马清云等同化反演的水平风场模拟北京地区的一次强降水过程<sup>[44]</sup>,结果有助于分析和预报时空尺度较小的中尺度系统。

许小永、郑国光、刘黎平采用VDRAS方法证明了其4DVAR能够反演大气三维风场、热力场和微物理场和获取暴雨中尺度结构信息的能力<sup>[45-46]</sup>。利用EnKF同化雷达资料分析了一次梅雨锋过程的中尺度结构。李柏、张沛源利用MM5的4DVAR分别同化了VAD风和雷达反演的降水<sup>[47]</sup>,改善了中尺度暴雨的预报。万齐林、薛纪善、庄世宇利用GRAPES-3DVAR系统从新一代天气雷达资料中有效的获取了大气系统的结构<sup>[48]</sup>。顾剑峰利用WRF-3DVAR将反射率因子转换成雨水混合比后,进行了反射率数据直接同化的研究<sup>[49]</sup>。

盛春岩、浦一芬、高守亭(2006)利用ARPS及其资料同化系统ADAS模拟分析了新一代多普勒雷达资料对中尺度模式短时预报的影响<sup>[50-51]</sup>。

模拟的1 h雨量与实况的对比表明,同时利用雷达反射率因子和径向风改进过的初始场能明显增强3 h内的降水强度和落区预报,改善中尺度数值模式短时定量降水预报。模拟的1 h流场对比分析表明,经雷达径向风调整后,能够在初始场中增加气旋性涡旋等中小尺度风信息,明显减少模式的spin-up时间。

通过对雷达径向风和反射率因子对模式初始场和模拟结果影响的对比分析发现,雷达径向风主要是改进初始风场,而雷达反射率因子主要是改进初始场中的湿度参数,增加初始场中云水等的含量,调整温

度场。

通过模拟的6 h降水对比发现,利用雷达径向风调整初始场后,对降水模拟有一定的改进,但效果不甚明显,而雷达反射率资料对定量降水预报改进效果明显,同时使用雷达径向风和反射率资料改进初始场后对降水的模拟效果最明显。

在5种不同水平分辨率(最小为3 km)的数值对比试验中认为在适当提高模式分辨率的同时使用雷达资料同化改进模式初始场,则是提高模式短时预报的一个非常有效的途径。

从目前国内外的研究情况看,多普勒速度的变分同化技术要比反射率数据直接同化技术要成熟得多。由于雷达反射率中包含了各种水成物信息,直接同化需要考虑多种微物理过程。有效的同化方法仍然是在反射率数据和模式变量之间建立某种基于统计的经验关系,从反射率数据中获取冰水、雨水等不同相态粒子的比率,通过多种微物理过程分析改善模式的初始场和分析场。

## 5 结语

从国内外的发展趋势来看,短时预报技术主要是针对强风暴和强降水(雪)等容易致灾的强对流天气开展研究的。这些技术包括基于图形特征的雷暴识别追踪以及结合计算机图像处理技术的临近外推预报及基于资料同化的短时数值预报等。

以雷达回波为主的临近外推预报,有两个因素影响预报的准确性。其一是回波移速估计,另一个则是回波变化的估计。无论矩形区域跟踪,或者不规则形状的回波区域跟踪,都是假定所跟踪的对象线性移动,不仅导致预报位置的偏差,而且降低了预报时效。利用风暴生命史的概念模型控制回波变化,能在一定程度上改善预报回波场。但是需要利用充足的样本来建立本地化的风暴生命史概念模型。

由于强对流天气系统结构复杂,发展变化快,短时数值预报技术应用于业务之中还有待于进一步的研究与检验。只有在强对流天气发展到一定阶段,能够被雷达捕捉到之后,才能够通过资料同化,不断调整改善数值模式的初始场,进而预报未来几个小时的强风暴天气系统。也就是说,在风暴系统形成之初,而雷达又不能充分提供充分的初始信息时,模式预报的结果将不会有太大的改善。

## 参考文献:

[1] Browning K A, Wexler R. The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar [J]. Journal of Applied

Meteorology, 1968,7:105-113.

- [2] 丁一汇.高等天气学[M].北京:气象出版社,2005.
- [3] Fang M, Doviak R J, Melnikov V. Spectrum Width Measured by WSR-88D: Error Sources and Statistics of Various Weather Phenomena[J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 2004, 21:888-904.
- [4] Charalampidis D, Kasparis T, Jones W L. Removal of Nonprecipitation Echoes in Weather Radar Using Multifractals and Intensity [J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 2002, 40(5):1121-1131.
- [5] Lakshmanan V, Stumpf G, Smith T. Quality control of WSR-88D data[C]. 31st ICRM, 2003, Seattle. Amer. Meteor. Soc.
- [6] Kessinger C, Ellis S, Andel J V, et al. The AP clutter mitigation scheme for the WSR-88D[M]. 31st ICRM, 2003, Seattle. Amer. Meteor. Soc.
- [7] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure [M]. The 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2004, Hyannis, MA. Amer. Meteor. Soc.
- [8] Eilts M D, Smith S D. Efficient Dealiasing of Doppler Velocities Using Local Environment Constraints[J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 1990, 7: 118-128.
- [9] Jing Z, Wiener G. Two-Dimensional Dealiasing of Doppler Velocities [J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 1993, 10: 798-808.
- [10] 梁海河,张沛源,葛润生.多普勒天气雷达风场褪模糊的研究[J].应用气象学报,2002,13(5):591-599.
- [11] Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar[J]. Nature.1978, 273: 287-289.
- [12] Li P W, Edwin S T L. Applications of radar-based nowcasting techniques for mesoscale weather forecasting in Hong Kong [J]. Meteorol. Appl. 2004, 11: 253-264.
- [13] Michael Dixon, Gerry Wiener. Thunder storm identification, tracking, analysis and nowcasting-A radar\_base methodology [J].J Atmos Oceanic Technic. 1993, 10:785-797.
- [14] 肖艳姣,汤达章,李中华,等.风暴的自动识别、跟踪与预报[J].南京气象学院学报, 1998, 21 (2):223-229.
- [15] 杨引明.一种用天气雷达自动追踪强风暴的新方法[M].上海市气象科学研究所.大气科学研究与应用.北京:气象出版社,2000,18:43-50.
- [16] Johnson J T, Pamela L, Mackeen. The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm [J]. Weather and Forecasting. 1997, 13:263-276.
- [17] Pierce E, Hardaker P J, Collier C G. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation [J]. Meteorol. Appl. 2000, 7: 341-360.
- [18] Golding W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts[J]. Meteorol. Appl. 1998, 5: 1-16.
- [19] Muller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast System [J]. Weather and Forecasting. 2003, 18: 545-561.
- [20] TURNER B J, ZAWADZKI I, GERMANN U. Predictability of Precipitation from Continental Radar Images Part III: Operational Nowcasting Implementation (MAPLE) [J]. Journal of Applied Meteorology. 2004, 43: 231-248.
- [21] PIERCE C E, EBERT E, SEED A W, et al. The Nowcasting of Precipitation during Sydney 2000: An Appraisal of the QPF

- Algorithms[J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19: 7- 21.
- [22] JAMES W, WILSON, ELIZABETH E. EBERT, THOMAS R. SAXEN, et al. Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19: 131- 150.
- [23] 张沛源. 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, 1991: 68- 73.
- [24] 万玉发, 张家国, 杨洪平, 等. 联合雷达网和卫星定量监测与预报长江流域大范围降水[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 94- 103.
- [25] 杜秉玉, 姚祖庆. 上海地区强对流天气短时预报系统[J]. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2): 242- 250.
- [26] 许焕斌, 段英, 刘海月. 雷云物理与防雷的原理和设计[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [27] 王改利, 刘黎平. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. *气象*, 2004, 31(10): 12- 16.
- [28] 梁明珠, 胡志群, 夏文梅, 等. VIL 中心区自动识别、跟踪和临近预报[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 205- 212.
- [29] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 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*. 2006, 17(3): 333- 345.
- [30] 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用[J]. *气象学报*, 2006, 64(5): 631- 646.
- [31] Sun J, Flicker D, Lilly D. Recovery of three dimensional wind and temperature fields from simulated single Doppler radar data[J]. *J Atmos Sci*, 1991, 48: 876 - 890.
- [32] Sun J. Fitting a Cartesian prediction model to radial velocity data from single Doppler radar[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol*, 1994, 11: 200- 204.
- [33] Sun J, CROOK N A. Wind and thermodynamic retrieval from single Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix [J]. *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 1994, 122: 1075- 1091.
- [34] Sun J, CROOK N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part 1: Model development and simulated data experiments[J]. *J. Atmos Sci*, 1997, 54: 1642- 1661.
- [35] Sun J, Crook N A. Real time low level wind and temperature analysis using single WSR- 88D data[J]. *Weather and Forecasting*, 2001, 16: 117- 132.
- [36] Wu B, Verlinde J, Sun J. Dynamical and microphysical retrievals from Doppler radar observations of a deep convective cloud[J]. *J. Atmos Sci*, 2000, 57: 262- 283.
- [37] Zhang J. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations[D]. USA: University of Oklahoma, 1999.
- [38] Gao J, Xue M, Brewster K, et al. A three dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. *J. Atmos Oceanic Technol*, 21: 457- 469.
- [39] Ming Hu, Ming Xue, Keith Brewster. 3DVAR and Cloud Analysis with WSR- 88D Level - II Data for the Prediction of the Fort Worth, Texas, Tornadoic Thunderstorms. Part I: Cloud Analysis and Its Impact[J]. *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 2004, 134: 675- 698.
- [40] Ming Hu, Ming Xue, Jidong Gao, et al. 3DVAR and Cloud Analysis with WSR- 88D Level - II Data for the Prediction of the Fort Worth, Texas, Tornadoic Thunderstorms. Part II: Impact of Radial Velocity Analysis via 3DVAR[J]. *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 2006, 134: 699- 721.
- [41] Tong Mingjing, Xue Ming. Ensemble Kalman Filter Assimilation of Doppler Radar Data with a Compressible Nonhydrostatic Model: OSS Experiments[J]. *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 2005, 133: 1789- 1806.
- [42] 郭霞, 党人庆, 葛文忠. 雷达资料在江淮流域暴雨数值模拟中的应用[J]. *热带气象学报*, 1999, 15(4): 356- 362.
- [43] 徐玉貌, 江敦春, 夏文梅. 雷达和卫星资料对江淮暴雨数值模拟中的影响[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(4): 545- 552.
- [44] 马清云, 李泽椿, 陶士伟. 单多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 488- 493.
- [45] 许小永, 郑国光, 刘黎平. 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究[J]. *气象学报*, 2004, 62(4): 410- 422.
- [46] 许小永, 刘黎平, 郑国光. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验[J]. *大气科学*, 2006, 30(4): 712- 728.
- [47] 李柏, 张沛源. 多普勒天气雷达资料分析及同化在中尺度天气系统机理研究中的应用研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2005.
- [48] 万齐林, 薛纪善, 庄世宇. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(2): 129- 145.
- [49] 顾剑峰, 颜宏. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006.
- [50] 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响[J]. *大气科学*, 2006, 30(1): 94- 107.
- [51] 盛春岩, 薛德祥, 雷霆, 等. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验[J]. *气象学报*, 2006, 64(3): 293- 307.

## An Overview of Short-term Forecasting Researches Based on Doppler Weather Radar

YANG Hong-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Pei-yuan<sup>2</sup>, CHEN Ming-hu<sup>2</sup>,  
WANG Bin<sup>1</sup>, XIAO Yan-jiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-ping<sup>3</sup>

(1. Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 400039)

**Abstract:** An overview of recent domestic and oversea researches and technical developments is presented for the basic conceptions and principal contents of the very short-term weather forecasting based on Doppler Weather Radar. The newest information, chiefly focused on the techniques of echo extrapolation and short-term numerical model prediction, are comprised of radar data QC, severe weather monitoring and nowcasting, radar data assimilation and so on.

**Key words:** Doppler Weather Radar; Extrapolation; Short-term numerical model prediction