

对流天气临近预报技术的发展与研究进展*

陈明轩¹⁾ 俞小鼎¹⁾²⁾ 谭晓光¹⁾ 王迎春¹⁾

¹⁾(中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089)

²⁾(中国气象局培训中心,北京 100081)

摘 要

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、数值预报技术以及以分析观测资料为主的概念模型预报技术等。其中,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。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,该技术发展很快但还不成熟。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。检验和定性评估也表明,将多种资料和技术集于一体的概念模型专家系统,其临近预报的准确率最高,时效也最长,是临近预报技术未来发展的主要趋势之一。NCAR的Auto-Nowcaster系统是雷暴临近预报概念模型专家系统的一个典型代表。

关键词: 临近预报 算法 专家系统

引 言

对流天气临近预报是指对未来几小时之内(一般指0~2 h)的对流天气系统及其所伴随的灾害性天气的发生、发展、演变和消亡的预报。临近预报技术是在20世纪60~70年代在外推雷达回波的基础上发展起来的。近十多年来,随着天气雷达技术的进一步发展,特别是美国新一代多普勒天气雷达WSR-88D在美国以及欧洲部分国家布网的完成^[1~3],以雷达资料为基础的对流天气临近预报技术的研究进展很快。在当今国际上,发展出了许多先进的临近预报系统,对灾害性强天气的临近预报和预警起到了积极作用。有的临近预报系统不仅使用雷达资料,同时还融合了地面中尺度观测资料、探空资料、闪电资料、风廓线资料以及中尺度数值模式预报等,以试图提高临近预报的时空精度。在

* “十五”国家科技攻关计划课题“奥运气象保障技术研究”(2002BA904B05)、北京市重大科技计划项目“奥运会气象保障科学技术试验与研究”(H020620190091)和“十五”国家科技攻关计划课题奥运科技专项“北京奥运会国际天气预报示范计划关键技术研究”(2003BA904B08)共同资助。

2003-06-20收到,2003-08-26收到修改稿。

2000 年悉尼奥运会期间,世界天气研究计划预报示范项目(WWRP-FDP)^[4~5]试验并展示了当今国际上几个先进的临近预报系统,对临近预报技术的发展起到了很大的推动作用,不但在国际气象界而且在社会、经济等领域产生了深远的影响^[6]。

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。目前,随着全国范围内新一代多普勒天气雷达布网工程的全面实施,临近预报技术的研究成为我国气象科研工作者面临的一项重要任务^[7~8]。

本文将结合 2000 年悉尼奥运会的 WWRP-FDP 项目,介绍当今对流天气临近预报技术的研究与发展现状以及未来的发展方向。文中为叙述方便,对于强对流天气系统有时使用“雷暴”或者“风暴”来描述。

1 主要的临近预报方法

1.1 外推预报法

外推预报主要使用雷达回波资料。为了预报雷达回波单体的运动,就必须确定它们移动的速度和方向。通过对风暴的强度和大小进行线性或者非线性外推,可以在一定的时间段内预报风暴单体和降水区的移动。许多基于雷达资料的临近预报方法使用了雷暴识别和追踪算法,除了最早的线性外推法外,一般还有两种算法可以确定回波单体的移动,即交叉相关追踪算法^[9~10]和回波特征追踪算法^[11]。

1.1.1 线性外推法

线性外推又叫拉格朗日持续性预报,它是在一个预报区域内以定常的速度和方向平移现在的雷达回波分析,从而获得下一时次雷暴位置的预报。这种平移关系是利用一个简单的相关拟合算法,由以前时次的风暴平均移动特征来确定。线性外推对于较强的组织稳定的风暴可在一定的短时间内获得较好的效果。目前,该方法在业务上已被下述两种方法取代。

1.1.2 交叉相关追踪法

交叉相关追踪法是用来追踪雷达回波移动的一种比较成熟的算法。利用求最优化相关系数的方法,可以建立追踪区域间的最佳拟合关系。雷达扫描的当时追踪区域和滞后一定时间的追踪区域之间的距离确定了回波的移动。交叉相关算法既可以对单体也可以对一定阈值之上的回波区域进行追踪^[9~10]。

交叉相关法使用一定时间间隔 Δt 内的 CAPPI 资料,将雷达扫描的反射率场分成若干大小相当的“区域”,这些“区域”具有相同的像素点。将这些在 t_1 时刻的“区域”分别与下一时刻 $t_2(t_2 = t_1 + \Delta t)$ 的各个“区域”作交叉相关,相关系数 R 表示为

$$R = \frac{\sum_k Z_1(k) \times Z_2(k) - \frac{1}{N} \sum_k Z_1(k) \sum_k Z_2(k)}{[(\sum_k Z_1^2(k) - N \bar{Z}_1^2) \times (\sum_k Z_2^2(k) - N \bar{Z}_2^2)]}$$

其中 Z_1 、 Z_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻这些“区域”内像素点的反射率因子, N 是“区域”内的像素点数。将 t_1 时刻的每个“区域”与 t_2 时刻的所有“区域”求相关以找出相关系数最大的“区域”, 则 t_2 时刻最大相关系数的“区域”中心即是回波移动矢量的终点(图 1)^[12]。

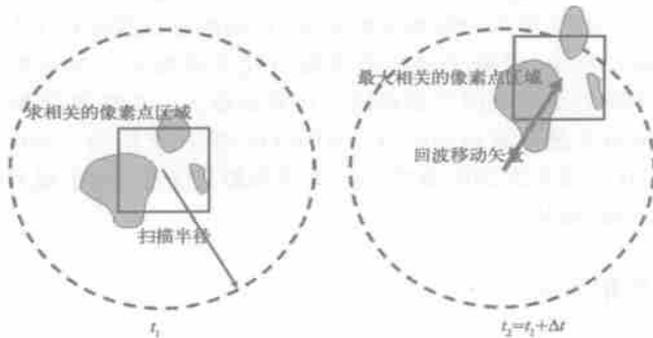


图 1 交叉相关追踪法示意图

交叉相关法已经有了许多的扩展应用。Li 等^[13]应用二维连续方程消除了在复杂地形下利用交叉相关反演雷达回波矢量场的偏差, 这些偏差主要是由于地物杂波、雷达天线屏蔽、雷达扫描型的快速变换等引起的误差。

1.1.3 回波特征追踪法

最通常的特征追踪法就是所谓的“单体质心法”, 它通过在连续雷达扫描回波图上两个相应单体中心的距离来获得风暴单体的移动矢量。当然, 单体中心假定可以代表单个的对流单体或者风暴。因此, 单体质心法可以提供对流单体详细的移动和演变特征的信息^[11]。Einfalt 等^[14]详细描述了这种确定雷达回波移动的方法, 它包括了回波的定义、回波特征、回波拟合以及预报步骤等。为了识别和确认在雷达连续扫描中的显著回波特征, 这种算法使用了多种回波参数, 包括形状、大小、质心、方位、延迟时间、强度分布、前一时次的大小、力矩矢量以及它们的均方根误差、上一时次识别的回波数量等等。还有一些其它的回波特征追踪算法, 包括使用傅立叶变换或者利用最大回波直径和惯性力矩在直角坐标系 X 和 Y 轴上的分量来识别回波特征^[15]。由于雷达回波具有连续变化的特征, 因此在连续的雷达扫描过程中, 回波移动特征就可以通过拟合过程被识别出来。

由于美国 WSR-88D 多普勒天气雷达^[1]的风暴系列算法存在很多缺陷, 新的风暴单体识别和追踪算法(SCIT)已经逐渐发展起来, 并且有了明显的改进, 不仅可以识别孤立风暴, 而且还可以识别风暴族和线状排列的风暴, 克服了 WSR-88D 风暴系列算法的弱点^[16]。SCIT 算法已经在由美国国家海洋大气局国家强风暴实验室(NOAA/NSSL)开发的 WDSS(预警决策保障系统)和其它一些临近预报系统中使用。

现在业务上使用雷达回波追踪算法的临近预报系统主要依赖于三维的雷达资料, 有

的系统合成运用了上述几种算法。美国国家大气研究中心(NCAR)的 TITAN(风暴识别、追踪、分析和临近预报)系统^[17-18]使用单体质心算法来识别和追踪一个被看作“三维实体”的风暴。为了追踪风暴随时间的演变, TITAN 使用了一个组合的最优化算法,这种算法有一部分是交叉相关追踪法,而对于合并和分离的单体,则是通过一个几何算法来识别的。图 2 是 TITAN 对风暴单体追踪的一个例子。图中椭圆表示对风暴的识别和追踪,可以看出有两个风暴将会向南移动,南部的风暴将衰减而北部的则会加强。

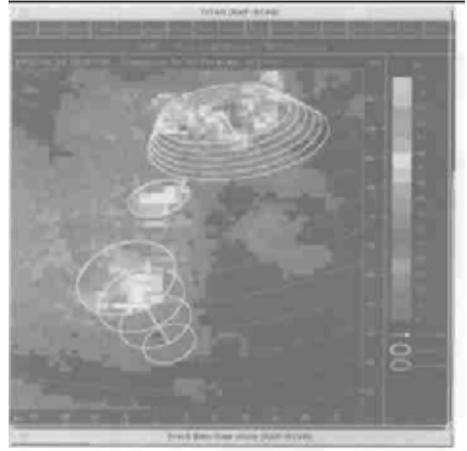


图 2 TITAN 对风暴单体追踪的一个例子^[19]

图 3 是使用交叉相关法对一定反射率阈值之上区域追踪的例子,图中还给出了雷达反演风场的信息,这在后文将作进一步阐述。

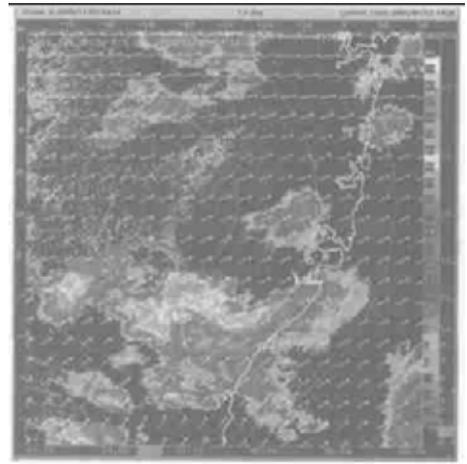


图 3 使用交叉相关法对一定反射率阈值之上的区域追踪的例子^[20]
(图中箭头给出了雷达反演的风场信息)

1.2 概念模型预报法

在多种知识和技术研究基础上建立和发展的临近预报系统大多采用以分析观测资料为主的方法。这些系统综合利用各种观测资料,通过建立概念模型,结合数值预报等不但可以获取风暴和降水移动及发展的信息,还可以预报它们的生成和消亡。

1.2.1 风暴的生命史特征

大量的观测资料研究表明,对流风暴单体的生命史一般小于 30 min,而多单体和超级单体风暴包括飚线等生命史则大于 30 min。统计分析表明^[21-23],83%的风暴单体的生命史小于 30 min(图 4a);但对于多单体和超级单体风暴则仅有 12%的生命史小于 30 min,而 47%的风暴可维持 1 h 以上(图 4b)。可见,较大尺度的风暴其生命史也 longer。同时,风暴的移动特征与它的尺度大小也存在密切关系,小尺度风暴趋向于随平均风移动,而较大尺度的风暴移动缓慢且有向平均风右侧移动的趋势。因此,风暴的临近预报必须考虑其上述特征。

数值模拟使人们对风暴的形成类型、发展演变和生命史特征有了真正物理意义上的理解。许多试验研究^[24-26]均表明,低层风垂直切变、热力不稳定(抬升浮力)和水汽条件是判断风暴类型、风暴发生和演变的重要参数。

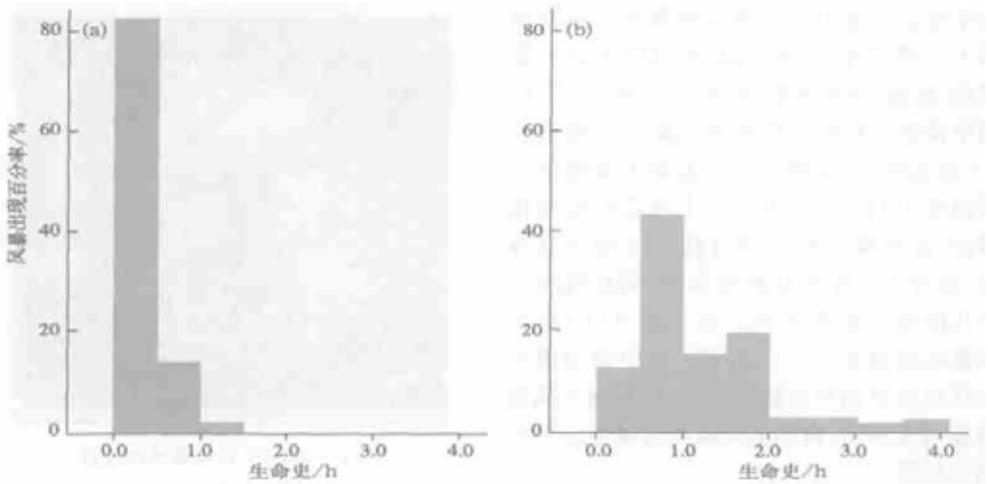


图 4 由 TITAN 系统获得的单体风暴(a)和多单体及超级单体风暴(b)个例的生命史统计结果^[23]

1.2.2 边界层辐合线

边界层辐合线和强对流的关系是许多对流天气概念模型预报雷暴发生和消亡的基础。Carbone 等^[27]描述了在美国 Kansas 州观测到的一个飑线的发生,这个飑线是沿雷达回波能够识别的一个边界层辐合线传播的。Hane 等^[28]研究了在美国 Oklahoma 州西北部雷暴沿干线发生的各种原因,包括植被等下垫面的影响。结果表明,当局地热力环流截断干线或与干线相交时,通常会引起雷暴的发生。Mueller 等^[29]利用由 CINDE(对流发生和下击暴流)试验获得的高分辨率中尺度探空和观测资料来识别沿边界层辐合线的风暴发生区域。研究结果表明,近地面湿度和边界层(PBL)湿度廓线的局地变化对于沿辐合线风暴的发生具有强烈的影响。Weckwerth 等^[30]研究了对流边界层内湿度的水平变化,指出水平对流“滚轴云”引起了水汽的水平变化,并且向上输送湿空气,“滚轴云”上升支里的水汽含量和观测云区的水汽含量是相当的,因此,测量“滚轴云”上升区里的水汽含量可以提供有关湿对流潜势预报的必要信息。张群等^[31]进行了边界层辐合线发展成飑线的数值试验研究,结果表明,飑线实例的大尺度环境场提供了累积的有效浮力能,小尺度积云对流则通过对流翻腾提供高层水汽凝结潜热加热和低层降温冷却,而中尺度辐合线通过提供带状辐合上升运动,起着胚胎和组织积云对流的作用,因此大、中、小三种尺度相互作用导致了边界层中尺度辐合线发展成为飑线。特别是 Wilson 等^[32~35]的一系列研究均表明,边界层辐合线的监测和特征识别是风暴发生、发展和消亡临近预报的关键所在。他们发现,大多数风暴都起源于边界层辐合线附近,在两条边界层辐合线的相交处,如果大气垂直层结有利于对流发展,则几乎肯定会有风暴在那里生成。如果边界层辐合线相交处本来就有风暴,则该风暴会迅速发展。另外,如果风暴相对于边界层辐合线的速度基本保持不变,则风暴强度一般不会衰减;如果风暴相对于边界层辐合线的速度较大,即风暴离开边界层辐合线而去,则往往风暴强度会衰弱。Wilson 等^[32]指出,所谓的边界

层辐合线,可以是天气尺度的冷锋或露点锋,也可以是中尺度的海陆风辐合带,包括雷暴的出流边界(阵风锋)和由地表特征如土壤湿度的空间分布不均匀造成的辐合带等等。

正是基于上述的资料统计分析和数值模拟试验的研究结果,人们建立了许多的概念模型专家系统来临近预报雷暴的发生、发展和消亡。

NCAR 开发了一个综合的 0 ~ 1 h 临近预报系统——Auto Nowcaster(ANC),它使用多种中尺度观测资料,将多种算法综合运用,来获取风暴发生、发展和消亡的信息,时间间隔可达 5 min^[20,36~37]。ANC 的一个主要特点就是它可以监测和识别边界层辐合线的位置,通过边界层辐合线特征与风暴以及云特征信息的相互结合,做出风暴发生、发展、维持和消亡的临近预报。ANC 系统(图 5)主要包括以下几部分:(1) TITAN^[17~18],主要预报风暴活动区域和发展趋势,外推风暴位置,前文已经介绍过;(2) 回波追踪(CTREC & Advection Grid),首先利用交叉相关计算风暴移动,然后利用基于交叉相关的追踪算法平移特定阈值之上的反射率区域产生反射率区域的预报场;(3) 边界层辐合线的识别和监测(COLIDE & bdry Grid),主要识别和监测由雷达观测的边界层辐合线的位置和移动特征,提供地面辐合区的信息,包括辐合、垂直运动、垂直风切变以及边界层辐合线和风暴的相对运动等;(4) 多普勒雷达资料变分同化分析系统(VDRAS^[38~39]),利用一个云尺度数值模式和它的伴随模式对雷达数据进行四维变分同化分析,获取三维风场和温度场;(5) 卫星资料的分析应用(cldClass & cldGrowth),利用可见光和红外云图资料对云的类型进行识别,通过监测由红外云图得到的云顶温度来监测和预报积云增长;(6) 地形对风暴发展的影响(CSPOT),主要分析地形对风暴发生、发展和演变的影响;(7) 临近预报“引擎”(Cronus & Gandi),主要集成由各种算法得到的预报信息,并通过模糊逻辑算法合成最终的预报场,包括风暴的生命期、对流活动区域、风暴的发生、发展、维持和消亡以及降水率的临近预报等;(8) 可配置的交互式资料显示系统(CIDD),用来显示输入的观测资料和预报结果等。

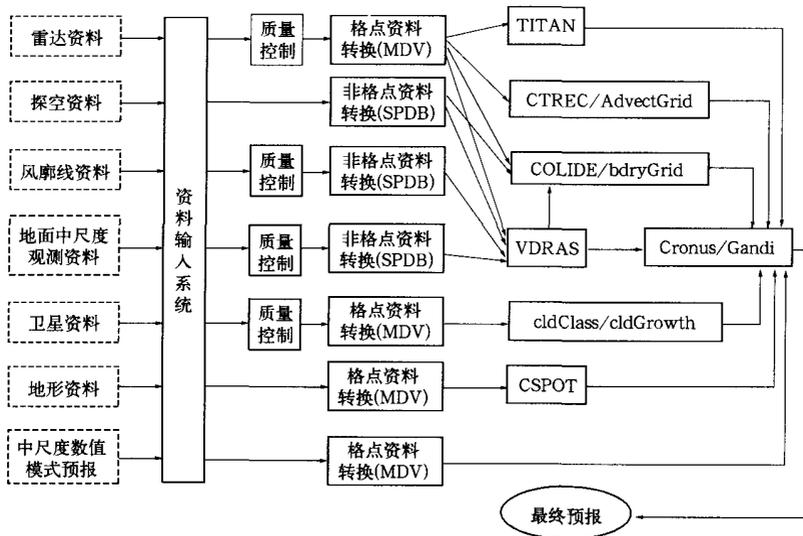


图 5 Auto Nowcaster(ANC)系统流程框图

英国气象局的临近预报系统 GANDOLF(Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Landbased Flood Forecasts)^[40]主要用来预报对流性降水。为识别对流单体,GANDOLF系统合成运用了目标导向法和一个对流单体生命循环概念模型,使用多束雷达反射率资料、红外和可见光卫星云图资料以及中尺度数值模式的预报结果,建立0~3 h对流性降水移动和发展的预报。

在国内,王笑芳等^[41]进行了北京地区强对流天气短时预报方法的研究,分析了北京地区冰雹落区与中尺度天气系统、散度场、涡度场、地面总能量场及相对湿度分布的关系,提出了冰雹落区预报的概念模型,为冰雹落区预报提供了一种依据,同时也分析了利用探空资料预报强对流天气有无及强度的判断树方法,为北京地区的强对流天气临近预报提供了有应用价值的思路和方法。杜秉玉等^[42]以强对流天气的发生、发展为依据,从中尺度数值预报模式输出结果、多普勒天气雷达、静止气象卫星、MICAPS系统和自动雨量站网等获取大气运动的各种尺度动力条件、水汽条件、大气稳定性和触发机制、各种天气实况等动态变化资料,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。香港天文台正在发展一套名为“小涡旋”(SWIRLS—Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems)的临近预报系统^[12]。该系统的其中一个主要部分是利用多普勒天气雷达资料,通过单体和回波区域外推预报算法,再结合自动雨量计资料调整Z-R关系,最终监测和预报本地未来几小时对流降水的分布趋势。结果表明,“小涡旋”系统在珠江三角洲地区暴雨、热带气旋雨带、交叠雨带和辐合线上强对流等的临近预报以及香港地区泥石流预警等方面均发挥了重要作用。

1.3 数值模式预报法

利用包含详细的热动力和微物理过程的中小尺度数值模式可以做雷暴的临近预报。用于雷暴预报的数值模式可以使用也可以不用对流观测资料作为初始条件^[19]。在不使用对流观测资料初始化的条件下,人们做了许多利用降低中尺度数值模式分辨率来预报雷暴和对流性降水的试验,这其中包括利用非静力云模式对超级胞线的预报^[43],利用MM5模式对胞线的预报^[44]等等,且均取得了一定的成功。但是,上述试验均是在有强烈大尺度强迫的形势下进行的,而许多的雷暴和对流天气过程是在弱的大尺度强迫下发展起来的,对低层局地温、湿度的变化和强迫非常敏感,这时无对流初始化的模式预报就显得相形见绌;而且,如果没有观测资料作为初始条件,由模式做出的对流天气的第1个有效预报必须在6 h以后,因为模式本身从大尺度模拟场获取低层的辐合信息需要6 h。因此,如果一个对流天气越多地受到大尺度背景场驱动,无对流观测资料初始化的数值预报也就可能会越成功。

为了克服这些模式本身的局限性,观测的风暴资料(如降水)应该用来初始化数值模式。通过运用对流结构的隐含假定,降水资料可以被转换成水汽、散度、潜热等作为模式的初始场。雷暴预报模式的初始化主要是从调整不稳定到初始化整个的动力、热动力以及微物理过程,而这些初始化只能正确和恰当地使用很少量的观测资料来进行。因为在业务上,通常仅多普勒雷达的反射率和速度场是有用的,所以现在主要集中于对观测资料(如雷达反射率或多普勒速度等)向非观测资料(如温度或者微物理特征等)的反演方法的

研究。Sun 等^[38,39]利用一个云尺度模式和它的伴随模式,使用四维变分同化技术(4DVAR),通过反演多普勒雷达资料来获取风暴发展和演变时的风场、热动力场和微物理场,取得了很大的成功,该技术已经用于 ANC 系统(见前文)。

2001 年,在我国重大气候和天气灾害的形成机理和预测理论研究中首次启用双多普勒雷达进行灾害性天气的外场观测,启动了我国双多普勒雷达风场反演技术的理论研究。张沛源等^[45]从双多普勒天气雷达风场探测原理和多普勒天气雷达数据处理技术出发,分析了影响双多普勒天气雷达风场反演可靠性的内在因素,提出了一些解决办法。但也指出,双多普勒天气雷达风场探测并不像人们想象的那么可靠,还存在不少有待解决的问题,在进行数据反演时,必须进行可靠性分析。周海光等^[46]进一步从理论上研究了笛卡尔坐标系下双多普勒天气雷达三维风场反演技术,提出了包括雷达原始资料的预处理、空间插值以及可靠性检验的新方法,提高了反演结果的可信度和精确度,但实际的双多普勒雷达资料的处理要比理论上更为复杂,因此在实际应用中还要做大量工作。

为了改进模式对雷暴的预报, Wilson 等^[19]指出,需要集合利用有无初始条件模式的优点,模式预报区域应该大到足以包含大尺度的强迫信息,并且模式必须有很高的分辨率,使得可以利用雷达观测资料对模式进行有效的初始化。同时,为了预报短生命期(30 min 左右)的雷暴,模式必须要有足够快的循环周期。

2 临近预报的准确性及检验

2.1 各种临近预报方法准确性的一些比较

临近预报技术发展到今天,它们的预报效果究竟如何,对于各种临近预报方法,人们做了大量的检验和比较工作。

对于风暴位置的临近预报,不论是外推、交叉相关还是单体质心算法,其预报的准确性会随着时间延长而迅速衰减,但是交叉相关算法和单体质心算法的预报效果均优于线性外推算法,而且预报的主要误差来源于对风暴增长和消亡的预报方面^[11]。对于非超级单体,预报的有效期为 30 min,而对于超级单体或者飑线,预报有效期可达几个小时^[19]。这与上文所述的风暴的生命期及尺度特征是密切相关的。

对于风暴发生和消亡的临近预报, Wilson 等^[19]通过对 12 个雷暴个例的统计分析,比较了线性外推、交叉相关外推、TITAN 预报以及 ANC 系统预报 4 种方法的 30 min 预报准确率 POD 和错误预报率 FAR(表 1)。由表 1 可以看出,交叉相关外推预报的 POD 和 TITAN 预报的 POD 分别高于 ANC 系统 2% 和 8%,而 FAR 分别高出 11% 和 22%。因此相比较而言,ANC 系统有最好的预报效果。这是因为 ANC 系统是合成外推、统计、概念模型及数值模式等做出的综合预报。

表 1 几种方法对风暴发生和消亡
30 min 临近预报的检验^[19]

方法	POD	FAR
线性外推	0.13	0.85
交叉相关外推	0.27	0.59
TITAN 预报	0.33	0.70
ANC 预报	0.25	0.48

图 6 是 Wilson 等^[19]总结前人的研究成果,对各种风暴临近预报方法准确性的定性

总结,对于各种方法均假定预报的空间尺度可达几公里。由图 6 可见,线性外推预报的准确率在 30 min 后迅速降低。风暴预报模式是利用雷达资料初始化的小尺度(空间分辨率接近 1 km)非静力数值模式,预报准确率和预报时效有一定提高。专家系统是指 ANC 或者 GANDOLF 之类的系统,它们也利用了数值模式、模糊逻辑或者神经网络等,因此预报准确率明显高于其它方法。大尺度模式主要指有限区域预报模式(如 MM5),因为预报范围很大,且初始时刻并未包含雷暴信息,因此正如前文所说,在前 6 h 它们对风暴的预报率很低,而对 6 h 之后在强烈大尺度背景强迫下的有组织的风暴系统,如飚线等则具有一定的预报能力。

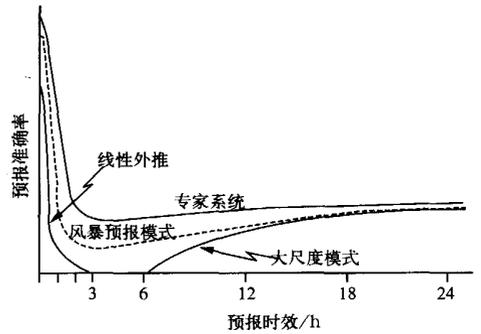


图 6 各种预报方法对风暴临近预报准确性的定性评估^[19]

(假定各种方法预报的空间尺度均可达几公里)

2.2 悉尼奥运会期间 WWRP-FDP 项目中临近预报系统的检验和比较

在 2000 年悉尼奥运会期间, WWRP-FDP 在悉尼展示和试验了多个当今国际上先进的临近预报系统。这是国际上首次把多个临近预报系统算法在同一环境中进行试验和比较。在 2000 年悉尼奥运会期间,上述临近预报系统提供了降水、风场以及强对流天气等的预报信息供预报员参考,预报时效为 0~1 h,有的系统达到 6 h。该项目为悉尼奥运会的顺利和成功举办发挥了重要作用。

Wilson 等^[20]比较和讨论了 WWRP-FDP 项目中各临近预报系统预报对流阵性降水和风暴的能力,指出许多系统预报能力不足(包括失败)的主要原因包括时间和空间上稳定气象信息的不连续性(主要是有效的探空频率太低)以及未很好地考虑地形对风暴演变的影响等^[20, 47]。为了利用引导层气流外推预报风暴的位置,必须考虑对流风暴所在不同高度的演变特征;同时,对于上述系统不同模块资料的同化工作还必须做进一步的研究(如 ANC 系统的 VDRAS^[38~39, 48~49]等)。对于大范围降水的临近预报, Donaldson 等^[50]比较了在悉尼奥运会期间各系统对大范围降水的临近预报能力,指出预报能力的不足主要由于资料的质量控制以及追踪算法等问题引起,而预报的失败则主要由于未考虑外界因子如地形等对降水型演变的影响。

对上述临近预报系统的一个比较精细的评估就要求对预报结果进行客观检验,与观测实况进行比较。在 WWRP-FDP 项目期间,一个由国际知名的临近预报专家组成的检验小组用各种统计和分析方法对上述系统进行了比较全面的客观检验。结果表明,对于风暴位置的 0~1 h 预报,单体追踪算法预报绝大多数对流单体位置的平均误差在 15~30 km;而对于区域追踪算法,误差在 20 km 左右。对于风暴位置的临近预报,还没有一种系统能够明显优于相关外推预报。对于降水预报,虽然绝大多数系统均低估了强降水的发生频率,但几乎所有的系统算法均能够成功做出整个预报周期内的降水频率;而且,几乎所有的系统均不能精确预报 20 min 后的暴雨位置。对于降水临近预报,大多数系统均优于外推预报。

当然,这只是在悉尼奥运会期间对上述临近预报系统的初步检验,对流天气系统也具有很强的局地性,因此上述检验虽具有一定客观性,但也存在着许多不确定性。另外,利用常规的检验方法来检验对流天气预报的准确率,其本身也存在一些问题,关于临近预报准确率的检验是一个新的研究课题。

3 结 语

本文介绍了国际上临近预报技术的研究进展以及主要的临近预报方法。目前的临近预报方法主要有外推预报、概念模型预报、数值模式预报等。在外推预报中,交叉相关和回波特征追踪是比较成熟的算法,已经用于许多的临近预报系统中,但预报时效较短,且预报雷暴发生和消亡的能力较差。利用数值模式临近预报雷暴是一个新兴的方法,发展很快且取得了很多成果,但目前还不成熟。检验和定性评估表明,目前概念模型专家系统临近预报雷暴的准确率最高,不但可以预报雷暴的发展演变,还可以预报雷暴的生成和消亡。集外推、统计、雷达反演、概念模型、边界层辐合线的识别和预报、数值模式、雷达和卫星等资料的同化以及预报员经验为一体的专家系统,无疑是临近预报技术发展的主要趋势之一。

随着气象探测技术、计算机技术以及临近预报技术研究的进一步发展,临近预报处理气象常规和非常规资料的运算量日益庞大,临近预报正在向自动化、快速化、高时空分辨率方向发展。就目前而言,需要解决的问题主要包括快速的风暴演变及其尺度的可预报性、风暴触发机制的监测和预报、多尺度系统相互作用、对流抬升机制、对流对有限观测资料的敏感性、数值模式的可预报性等等。

我国新一代天气雷达布网工程正在全面实施,以雷达资料为主的临近预报技术在我国的研究和应用将成为一个新的热点。同时,这也是充分利用我国新一代天气雷达系统,有效预防和减少强对流天气灾害的重要保障。

致谢:在本文的完成过程中,美国国家大气研究中心(NCAR) James W Wilson 教授、Juanzhen Sun 博士和 Rita Roberts 女士,美国普林斯顿大学 Matthias Steiner 博士,瑞士联邦理工学院(ETHZ) Susanne Mecklenburg 博士以及澳大利亚气象局(BOM) Elizabeth E Ebert 博士曾提供相关参考资料或参考信息;同时,本文参阅了2000年悉尼奥运会 WWRP-FDP 项目工作组整理的大量材料,谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 Crum T D, Alberty R L. The WSR-88 D and the WSR-88 D operational support facilities. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74: 250 ~ 262.
- 2 WSR-88 D Operation Course. WSR-88 D Operational Training Branch, Norman, Oklahoma, 1996.
- 3 Basic Principles of the NEXTRAD WSR-88 D Doppler Weather Radar. NEXTRAD/ Operational Support Facility Operations Training Branch, Norman, Oklahoma, 1998.
- 4 Keenan T, Wilson J, Joe P, et al. The World Weather Research Program (WWRP) Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Overview. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Germany, 2001.
- 5 Keenan T, Joe P, Wilson J, et al. The Sydney 2000 World Weather Research Program Forecast Demonstration Project: Overview and Current Status. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 1041 ~ 1054.

- 6 Linda Anderson-Berry, Keenan T, Bally J, et al. The Societal, Social, and Economic Impacts of the World Weather Research Programme Sydney 2000 Forecast Demonstration Project (WWRP S2000 FDP) . *Weather and Forecasting*, 2004, **19**: 168 ~ 178 .
- 7 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 新一代天气雷达讲义(试用). 中国气象局培训中心,2000.
- 8 葛润生. 新一代天气雷达系统讲座. 新一代天气雷达系统建设管理干部培训班讲义汇编. 中国气象局培训中心, 2000 .
- 9 Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*,1978, **273**: 287 ~ 289 .
- 10 Austin G L, Bellon A. The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Quart J Roy Meteorol Soc*,1974, **100**: 658 ~ 664 .
- 11 Browning K A, Collier C G, Larke P R, et al. On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Mon Wea Rev*,1982, **110**: 534 ~ 552 .
- 12 Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. S WIRLS ——An Evolving Nowcasting System. Technical Note, No.100. Hong Kong Observatory, 2000 .
- 13 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 .
- 14 Einfalt T, Denoeux T, Jaquet G. A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes. *J Hydrol*, 1990, **114**: 229 ~ 244 .
- 15 Wolf D E, Hall D J, Endlich R M. Experiment in automatic cloud tracking using SMS- GOES data. *J Appl Meteor*, 1977, **16**: 1219 ~ 1230 .
- 16 Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR- 88 D algorithm. *Weather and Forecasting*,1998, **13**: 263 ~ 276 .
- 17 Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting ——A Radar-based Methodology. *J Atmos Ocean Tech*,1993, **10**: 785 ~ 797 .
- 18 Dixon M, 徐传玉. 利用雷达进行风暴的识别,跟踪,分析和临近预报的方法. *气象科技*,1994, **4**: 39 ~ 45 .
- 19 Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. Nowcasting tunderstorm: A status report. *Bull Amer Meteor Soc*,1998, **79**:2079 ~ 2099 .
- 20 Wilson J W, Pierce C, Seed A, et al. Sydney 2000 Field Demonstration Project ——Convective Storm Nowcasting. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany, 2001 .
- 21 Battan L J. Duration of convective radar cloud units. *Bull Amer Meteor Soc*,1953, **34**: 227 ~ 228 .
- 22 Foote G B, Mohr C G. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part VI: Post hoc stratification by storm type and intensity. *J Appl Meteor*,1979, **18**: 1589 ~ 1600 .
- 23 Henry S G. Analysis of Thunderstorm Lifetime as a Function of Size and Intensity. Preprints 26th Conf on Radar Meteorology. Norman, OK: *Amer Meteor Soc*, 1993. 138 ~ 140 .
- 24 Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. Two-dimensional convection in nonconstant shear: A model of mid-latitude squall lines. *Quart J Roy Meteorol Soc*,1982, **108**: 739 ~ 762 .
- 25 Rotunno R J, Klemp J B, Weisman M L. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmos Sci*,1988, **45**: 463 ~ 485 .
- 26 Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R J. Structure and evolution of numerically simulated squall lines. *J Atmos Sci*, 1988, **45**:1990 ~ 2013 .
- 27 Carbone R G, Coauthors. Convective dynamics: Panel report. Radar in Meteorology, *Amer Meteor Soc*, 1990, 391- 400 .
- 28 Hane C E, Bluestein H B, Crawford T M, et al. Severe thunderstorm development in relation to along-dryline variability: A case study. *Mon Wea Rev*,1997, **125**: 231 ~ 251 .
- 29 Mueller C K, Wilson J W, Crook N A. The utility of sounding and mesonet data to nowcast thunderstorm initiation.

- Weather and Forecasting*,1993,8: 132 ~ 146 .
- 30 Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M. Thermodynamic variability within the convective boundary layer due to horizontal convective rolls. *Mon Wea Rev*,1996,124: 769 ~ 784 .
- 31 张群,张维恒,姜勇强. 边界层辐合线发展成飑线的数值实验. *气象科学*,2001,21(3):308 ~ 315 .
- 32 Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms by radar-observed boundary layer convergence lines. *Mon Wea Rev*,1986,114: 2516 ~ 2536 .
- 33 Wilson J W, Foote G B, Fankhauser J C, et al. The role of boundary layer convergence zones and horizontal rolls in the initiation of thunderstorms: a case study. *Mon Wea Rev*,1992,120: 1758 ~ 1815 .
- 34 Wilson J W, Mueller C K. Nowcast of thunderstorm initiation and evolution. *Weather and Forecasting*,1993,8: 113 ~ 131 .
- 35 Wilson J W, Meegenhardt D L. Thunderstorm initiation, organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines. *Mon Wea Rev*,1997,125: 1507 ~ 1525 .
- 36 Wilson J W, Roberts R, Mueller C. Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting. *Weather and Forecasting*,2004,19: 131 ~ 150 .
- 37 Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto Nowcast System. *Weather and Forecasting*,2003,18: 545 ~ 561 .
- 38 Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part I: Model development and simulated data experiments. *J Atmos Sci*,1997,54:1642 ~ 1661 .
- 39 Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J Atmos Sci*,1998,55: 835 ~ 852 .
- 40 Pierce C E, Collier C G, Hardaker P J, et al. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Met Apps*,2000,7: 341 ~ 360 .
- 41 王笑芳,丁一汇. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究. *大气科学*,1994,18(2):173 ~ 183 .
- 42 杜秉玉,姚祖庆. 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 .
- 43 Hemler R S, Lipps F B, Ross B B. A simulation of a squall line using a nonhydrostatic cloud model with a 5 km horizontal grid. *Mon Wea Rev*,1991,119: 3012 ~ 3033 .
- 44 Zhang D L, Gao K, Parsons D B. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PreSTORM. Part I: Model verification. *Mon Wea Rev*,1989,117: 960 ~ 994 .
- 45 张沛源,周海光,胡绍萍. 双多普勒天气雷达风场探测的可靠性研究. *应用气象学报*,2002,13(4):485 ~ 496 .
- 46 周海光,张沛源. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. *气象学报*,2002,60(5):585 ~ 593 .
- 47 Sleigh M W, Fox N I, Collier C G, et al. The Performance of the GANDOLF Nowcasting System during the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany, 2001 .
- 48 Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2001,16:117 ~ 132 .
- 49 Crook N A, Sun J. Assimilating radar, surface and profiler data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany, 2001 .
- 50 Donaldson N, Pierce C, Sleigh M, et al. Comparison of Forecasts of Widespread Precipitation during the Sydney 2000 Forecast Project. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany, 2001 .
- 51 Brown B, Bally J, Brooks H, et al. Forecast Verification Activities for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany, 2001 .
- 52 Elizabeth E, Laurence J, Barbara G, et al. Verification of Nowcasts from the WWRP Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *Weather and Forecasting*,2004,19:73 ~ 96 .

A BRIEF REVIEW ON THE DEVELOPMENT OF NOWCASTING FOR CONVECTIVE STORMS

Chen Mingxuan¹⁾ Yu Xiaoding¹⁾²⁾ Tan Xiaoguang¹⁾ Wang Yingchun¹⁾

¹⁾ (*Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089*)

²⁾ (*China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081*)

Abstract

Nowadays, the nowcasting technique and research for convective storms have an exciting advancement along with the rapid development of Doppler weather radar and many else meso and micro-scale meteorological observation instruments. At present, main nowcasting techniques comprise three aspects: identification, tracking and extrapolation forecast, numerical model forecast, knowledge-based forecast technique. Cross-correlation technique and echo feature identification and tracking algorithms are well-performed extrapolation techniques mainly based on weather radar data and are utilized by many operational nowcasting systems, but there are very short forecast period and low accuracy. Now the techniques that assimilate radar, mesonet and micro-scale data into fine meso and micro-scale numerical models to nowcast initiation, evolution and dissipation of thunderstorms are very promising and robust. Techniques are progressing rapidly but not mature for operation. Knowledge-based nowcasting techniques are more observation-based. They combine and analyze a variety of fine meteorological data sources, including radar and satellite data, then theorize conceptual models of initiation, evolution and dissipation of thunderstorms, especially, the close relation between boundary layer convergence lines and enhanced convection, as well as integrate fine numerical models outputs initiated with or without radar data and extrapolation techniques results, then build expert system of thunderstorm nowcasting to gain information about not only the development but also the initiation and dissipation of thunderstorms and convective rainfall. Verification and qualitative assessment of forecast also show that the expert systems outperform all other techniques for operational nowcasting thunderstorms and convective precipitation in accuracy and period. The expert systems are one of the primary techniques for nowcasting convective storms evolution in the near future. Auto-Nowcaster developed by NCAR is one of the state-of-the-art expert systems for nowcasting thunderstorms.

Key words: Nowcasting Algorithm Expert system