

基于雷达数据的风暴体识别、追踪及 预警的研究进展

韩 雷¹ 王洪庆¹ 谭晓光² 林隐静¹

(1. 北京大学物理学院大气科学系,北京 100871;2. 中国气象局北京城市气象研究所)

提 要: 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警方法是最早出现的临近预报技术,也是天气雷达系统和强天气预警业务的基本组成部分。风暴体识别、追踪及预警方法可以分为三大类:持续性预报法、交叉相关法和单体质心法,它们都属于外推预报法。其中,持续性预报法目前已经被后两者取代。首先较详细地介绍了交叉相关法和单体质心法的研究历史和主要算法,然后集中介绍了近几年来在外推预报基础上发展起来的一些新方法。最后,结合悉尼奥运会期间的 FDP 项目,讨论了临近预报技术的检验和准确性评价,重点介绍了列联表方法。

关键词: 风暴体 临近预报 交叉相关法 单体质心法

Review on Development of Radar-based Storm Identification, Tracking and Forecasting

Han Lei¹ Wang Hongqing¹ Tan Xiaoguang² Lin Yinjing¹

(1. Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. Institute of Urban Meteorology, CMA)

Abstract: The current development on storm identification, tracking and forecasting based on weather radar data are reviewed. Storm identification, tracking and forecasting, as the earliest now-casting techniques, are the basic and essential parts of radar and severe weather warning operations. At present, they include three aspects: cross correlation algorithm, cell centroid tracking algorithm, persistence prediction method, which are called as extrapolation. Among them, Persistence prediction method has been replaced by the former two methods. Firstly, the history and main algorithms of cross correlation and cell centroid method are presented in detail. Secondly, a few new methods based on the extrapolation are described. Finally, in combination with FDP project

during Sydney Olympic Games, test and evaluation on nowcasting technique are also discussed.

Key Words: storm nowcasting cross correlation centroid tracking

引 言

基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警方法是最早出现的临近预报技术,也是天气雷达系统和强天气预警业务的基本组成部分。从 1950 年代开始,利用天气雷达对风暴进行自动识别、跟踪和预报的研究已经进行了近半个世纪,发展了很多理论和方法。这些方法大致可以分为三大类:持续性预报法(Persistence)、交叉相关法(Cross Correlation)和单体质心法(Centroid Tracking)。由于这些方法在预报风暴体的运动和演化过程都是使用了外推技术,所以被统称为外推预报法(Extrapolation)。

经过几十年的努力,在外推预报的基础上临近预报技术目前已经发展为三大类方法:外推预报、概念模型专家系统和数值模式预报。其中,风暴体的识别、追踪及预警方法除了可单独作为一种临近预报方法外,还是绝大多数专家系统的重要组成部分。

临近预报是指对未来 0~2 小时之内,对特定地点的对流天气系统的预报。预报一般包括 3 个部分:风暴的生成(Initiation)、演变(Evolution)和运动(Movement)^[1]。概念模型专家系统和数值模式预报方法可对上述 3 个部分进行预报,而风暴的识别、追踪和外推预报法只能预报风暴的演变和运动。对各种临近预报技术的全面的综述,请参见文献[2]和[3]。

基于雷达资料的风暴体识别、追踪与预警方法的主要过程包括:通过天气雷达资料探测已经生成的风暴体,提取风暴体的统计和形态特征,然后使用追踪方法从连续的雷达图像序列中提取出这些风暴体,最后外推预报雷暴体的演变和运动。

风暴体的识别、追踪和预警的结果是其它基于雷达数据的强天气探测算法的重要输入,如冰雹探测、下击暴流探测和降水预报等算法。有关强天气探测算法,请参见文献[4]。

风暴体的生命史特征是临近预报必须考虑的。1998 年, Wilson^[2]在总结前人工作的基础上指出:83%的普通单体风暴的生命史小于 30 分钟。但对多单体和超级单体风暴,88%的风暴体的生命史大于 30 分钟,47%的风暴体可维持 1 小时以上。上述的生命史特征,是各种外推预报的准确率随时间迅速下降的重要原因。

在外推预报中,持续性预报法又叫线性外推法。由于它只是简单地假设所有的雷达回波的大小和强度在预报期间内保持不变,且以定常速度平移进行预报,其结果与其它两种外推预报法相比差距较大,目前已经很少使用。因此,本文将只介绍外推法中的交叉相关法和单体质心法的研究进展。另外,在上述外推法的基础上,近年来又出现了一些新的方法,把它们笼统地归于外推法是不合适的,所以在本文中将其放在新方法部分中进行集中介绍。

1 交叉相关法

1.1 交叉相关法的研究历史

1953 年 Ligda 就已经提出使用雷达回波数据来外推预报降雨的概念,1960 年 Noel 等第一批使用计算机获得雷达回波运动^[2]。1978 年 Rinehart^[5]使用交叉相关法获得了风暴体回波内部各个子区域的移动矢量,提出了 TREC 算法(Tracking Radar Echoes by Correlation)。与之前的只能获得整个回波的平均移动矢量相比,这是一个很大的进步。

对 TREC 算法得到的移动矢量进行仔细分析,可以得到更丰富的风暴体内部结构。

1995 年, Li^[6] 在 TREC 的基础上提出了 COTREC (Continuity of TREC Vectors) 算法。采用变分技术, 在二维连续等假设条件下, 通过连续时刻图像中平均反射率因子的差异观察回波的发展和衰减。1998 年, Lai^[7] 在 TREC 算法得到的运动矢量的基础上, 使用半拉格朗日法进行外推。另外, 王改利^[8] 针对我国长江中下游的梅雨锋暴雨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, 取得了积极的试验结果。

目前使用交叉相关方法的、影响较大的业务系统有 MIT LL (Lincoln Laboratory) 的 ITWS (Integrated Terminal Weather System)^[9], 美国大气科学研究中心 (NCAR) 的 ANC (Auto-nowcaster)^[10], 澳大利亚气象研究中心的 S-PROG (Spectral Prognosis)^[11], 英国气象局的 NIMROD (Nowcasting and Initialisation for Modelling Using Regional Observation Data System)^[12] 等。

1.2 交叉相关法的主要算法

简单地说, 交叉相关法就是把整个数据区域划分成若干小区域, 相邻时刻雷达回波图像的小区域之间计算相关系数, 通过最大相关系数确定相邻时刻图像中的区域对应关系, 进而确定回波区域的平均运动。一个简单的示意图 (摘自文献^[13]) 如下:

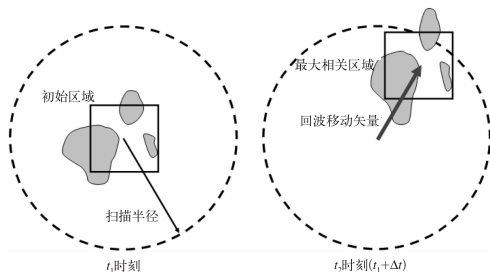


图 1 交叉相关法示意图

对两幅相邻时刻 (t_1, t_2) 的雷达反射率因子回波图像, 分别划分成若干大小相同的子区域。对 t_1 时刻的一个子区域 A, 在 t_2 时刻回波图像的候选区域 (大小由平均风速决定) 中, 将所有可能的子区域分别与 A 做相关计算。 t_2 时刻相关系数最大的子区域 B 即为与 A 匹配的子区域。将 A 和 B 的中心位置连接起来, 即为回波移动矢量。得到回波移动矢量之后, 就可以进行外推预警。

上图中的子区域可以有不同的选择。当选择整个反射率因子回波区域时, 可以得到整个区域的平均运动; 当把一个风暴体回波分离出来作为一个子区域时, 就可以得到单风暴体的运动; 当把子区域进一步设置为更小的区域时, 如 15×15 或 7×7 等, 就可以得到风暴体内部的运动信息。

上述的操作都是在单一仰角的二维 PPI 锥面图像或经过内插的二维 CAPPI 图像上进行的。如果将该操作在多个仰角的 PPI 锥面图像或多个高度的 CAPPI 图像上进行, 就可以得到风暴体的三维运动信息。但是, 交叉相关法无法将各层的运动信息合成到每一个具体的风暴体上去, 因而得不到单个风暴体的特征, 这是交叉相关法的一大弱点。

由上可见, 交叉相关法的优点是算法简单, 缺点是只考虑了回波的水平移动, 计算量大等。另外, 对较大的回波, 交叉相关法有较好的识别和追踪效果。对较小的单体, 尤其是相互距离较近的多个单体, 其识别和追踪效果较差。

2 单体质心法

单体质心法是紧随交叉相关法之后出现的。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, 并且能够提供单体的更详细的特征数据, 因而得到了更快的发展。

2.1 单体质心法的研究历史

最早的单体质心法的研究可追溯至 1970 年代,主要集中在 NSSL 和 Stanford。NSSL 的科学家们开发了一系列算法,可以从雷达反射率因子数据中识别出风暴单体,并追踪和外推单体质心的运动,Stanford 的科学家们则进一步深化了这些算法,在回波的分裂和合并处理方面作了大量的工作^[2]。对识别出的风暴单体而言,可以提取若干统计和形态描述特征,其中质心位置是核心特征之一。另外,风暴的追踪和预警都是基于风暴体质心位置开展的,因此该方法被称作单体质心法,也被称作回波特征追踪法。

早期的单体质心法都是在二维 PPI 锥面上的进行的。1979 年,Crane^[14]通过多 PPI 二维识别结果的空间关联运算,形成三维“Volume Cells”,将单体质心法的研究往前推进了一大步。Bjerkaas 等^[15],Austin 等^[16],Rosenfeld^[17],Dixon 等^[1],Johnson^[18]等对 Crane 的工作进一步完善,发展出目前在业务上被广泛应用的 TITAN(Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting)^[1]和 SCIT(Storm Cell Identification and Tracking)^[18]算法。

单体质心法近几年仍在不断发展。2003 年,为了减少追踪错误率,Stumpf^[19]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。由于 TITAN 和 SCIT 具有良好的识别、追踪性能和直观的操作界面,在业务应用中获得了一致好评,已成为目前强对流天气临近预报中的主流方法。TITAN 已经应用在 ANC 临近预报系统(北京市气象局 2004 年引进),SCIT 也已经应用在美国国家新一代天气雷达网的 WDSS(Warning Decision Support System)^[20]业务系统中(我国的 CINRAD 建设中已经引进)。

2.2 单体质心法的主要算法

与交叉相关法不同,单体质心法首先要识别出单体,并计算其质心位置、体积和投影面积等特征,然后在前后两个时刻的扫描数据中进行单体匹配追踪,最后通过连续多时刻的匹配追踪结果外推预警。各种业务算法的主要差异体现在识别过程上,在追踪和预警过程上的差别不大。

最初出现的质心法,只在某一个低层仰角的二维 PPI 锥面(或经过内插得到的某一高层的 CAPPI 平面)上进行,得到的质心等单体特征都是二维的。后期的算法综合使用了多 PPI 锥面资料,将二维扩展到三维,得到的质心、体积、回波顶高等单体特征都是三维的。由于二维的算法被包含在三维的算法中,下面只介绍三维风暴体识别、追踪算法。

风暴体的识别方法是基于三维雷达反射率因子体扫描数据进行的。在事先确定的一个(或一组)反射率因子阈值后,识别可分为一维、二维和三维 3 个识别步骤:(1)搜索并记录每一根径向线上满足反射率因子阈值的采样点构成一维段;(2)在同一 PPI 锥面上搜索并记录连续相邻径向线上的段形成二维风暴体分量;(3)将不同仰角的 PPI 上的风暴体分量组合成三维风暴体。对每一个识别出的三维风暴体计算加权质心、体积和投影面积等统计和形态特征。目前业务中应用的 TITAN 和 SCIT 算法就是基于上述思路实现的。

1994 年,汤达章等^[21]首先在二维图像中使用多阈值法实现回波块(可能包含若干个尺度较小、分布散乱的回波)的分割,然后对每一个二维的回波块计算矩不变量及亮度综合因子等特征。

对风暴体的追踪,各种单体质心法的具体实现步骤不一样,但一般都会利用后面的预警结果来辅助追踪。SCIT 采用了模式识

别中的近邻法,简单实用。TITAN 则根据 3 个原则:宁短不长、特征相似和演变限制,构造一个代价函数,将追踪问题转化为组合最优化问题,得到追踪的结果。

对于预警过程,各种单体质心法都相差不多,基本上都是外推预警。另外,Tsonis 等^[22],Wilson^[2]等人指出,是否使用风暴强度和大小变化趋势的信息对预报结果影响并不大。

与交叉相关法相比,单体质心法计算量小,能够更有效地识别和跟踪风暴单体(如飑线中的各个单体)。另外,由于质心法将风暴单体都分离出来,因此可以计算每个单体的特征,并分析其演变过程,从而为人们提供了一个分析风暴的工具,这是交叉相关法无法做到的。

3 近年来出现的新方法

在交叉相关法和单体质心法的基础上,近几年来又提出了一些新的方法。受篇幅限制,下面只对其中的主要方法做简要介绍。

1999 年,Wolfson^[23]提出了一个“风暴增长衰减追踪器”,专门针对较大尺度的多单体风暴或飑线等风暴系统,设计了一个椭圆滤波器,来识别和追踪风暴包络(Storm Envelope)。结合 ITWS 中的交叉相关追踪器,可以给出风暴系统的增长和衰减趋势。但当风暴系统的强度或空间位置剧烈变化时,该方法的效果就会大大下降。

2002 年,Handwerker^[24]开发了一个三维风暴跟踪器(TRACE3D),可以捕捉到早期的、未成熟的风暴。TRACE3D 设计了一个特别的识别算法,即:先使用一个初始阈值将整个雷达图像分为若干个 ROIP(Regions of Intense Precipitation),然后对于每一个 ROIP,反射率因子在(35,max-ref-10)之间的所有点都归为一个 RC(Reflectivity Core),从而达到动态、

自适应地识别早期风暴的目的。TRACE3D 的识别过程如图 2 所示。

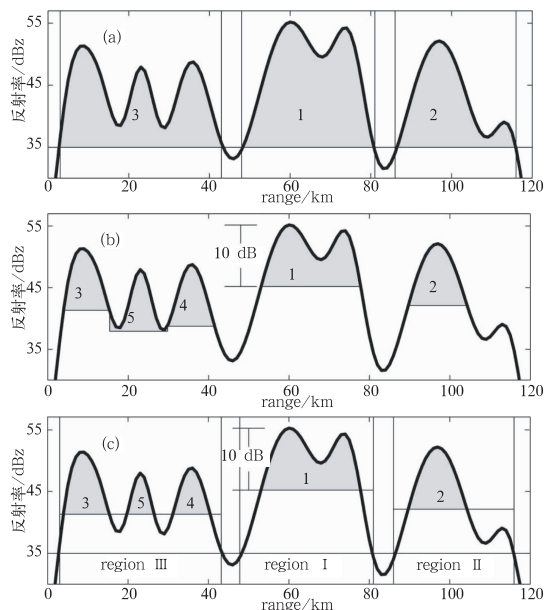


图 2 TRACE3D 的识别方法示意图

2003 年,Lakshmanan^[25]提出了一种新的风暴识别方法。他使用了 K 均值聚类方法,可以根据需要进行不同尺度的风暴识别、追踪和预警。针对反射率因子回波图像的特点,使用了分层纹理分割技术来控制类间距离,达到了更好的识别效果。

2005 年 Xu^[26]和 2006 年 Lakshmanan^[27]在统计的框架内,使用了 Bayes 学习、Gibbs 抽样、MCMC 等现代统计方法,提出了基于统计方法的时空动态模型(Spatio-temporal Dynamical Model)来预报风暴的移动、演变。

4 风暴识别、追踪与预警结果的检验

4.1 检验方法

习惯上人们常使用列联表方法,即使用探测概率(POD)、虚假警报比(FAR)和临界成功指数(CSI)来衡量预报的好坏。但正如 Wilson^[2]指出,对临近预报的准确性进行评

价和比较是非常困难的,采用 *POD* 和 *FAR* 所得到的统计数据并不能充分地表明其实际的性能。例如对于一个在时间或空间上有略微偏差的预报,很难给出一个精确的评价分数来。尽管如此,上述的统计数据还是能够在一定程度上帮助人们比较各种不同的方法在相同测试条件下的表现。

1997 年, Brown^[28] 选择了 3 种外推法进行了测试,即 *TITAN*、*PER*(持续性预报法)和 *FSL* 的交叉相关外推器(*Forecast Systems Laboratory Cross-Correlation Extrapolator*)^[29]。30 分钟预报的实验结果如表 1 所示:

表 1 *TITAN*、*FSL* 和 *PER* 的试验结果

评价指标	<i>TITAN</i>	<i>FSL</i>	<i>PER</i>
<i>POD</i>	0.37	0.35	0.23
<i>FAR</i>	0.66	0.63	0.77
<i>CSI</i>	0.22	0.22	0.13

从表中可以看出,持续性预报法明显落后于 *TITAN* 和 *FSL*,而代表质心法的 *TITAN* 和代表交叉相关法的 *FSL* 表现非常接近。

在使用 *SCIT* 对 6561 个风暴的测试中, *SCIT* 能正确地识别出 68% 的最大反射率因子超过 40dBz 的风暴和 96% 的超过 50dBz 的风暴。而被 *SCIT* 取代的 *WSR-88D* 风暴系列算法的正确识别率分别只有 24% 和 41%。

1998 年, Wilson^[2] 在总结了前人的试验结果后指出,所有的实验均表明无论交叉相关法,还是单体质心法,短时预警的效果均较好。但随着时间的推移,预警准确率都迅速地下降。这是因为风暴的生命史太短,在预报期间内生长和消亡的变化太快导致的。对普通单体风暴,预报有效期一般只有 30 分钟。对于较大尺度的风暴系统,如飏线、超级单体和多单体风暴等,预报有效期则可以达数小时。

1999 年, Wolfson^[23] 的试验表明,在 *IT-WS* 的交叉相关追踪器的基础上再使用风暴增长衰减追踪器,能明显提高较大尺度风暴系统的预报效果。

4.2 悉尼奥运会期间对各种风暴识别、追踪算法的检验和比较

2000 年悉尼奥运会期间, *WWRP* 的 *FDP* 项目(*World Weather Research Programme, Forecast Demonstration Projects*)对国际上多个先进的临近预报系统进行了测试。Wilson 等对测试结果进行了系统的总结。详细的测试结果请参阅文献[30]和[4],此处只简单介绍其中基于雷达资料的风暴识别、追踪及预警算法的测试结果。

FDP 项目中,使用风暴外推算法的系统一共有 6 个。其中,使用了交叉相关法的系统有 *S-PROG* 和 *NIMROD*,使用质心法的有 *TITAN* 和 *WDSS*, *ANC* 综合使用了 *TITAN* 和 *SCIT* 的结果, Gandol^[31] 使用探空资料或数值模式的输出结果来外推预报。评测期间有 3 部雷达(*Kurnell, C-Pol* 和 *Wollongong*)可以使用。

试验的结果表明:在硬件条件相同的情况下,各种外推法对风暴速度、移动位置等都给出了相似的预报结果。2001 年, Wilson^[30] 使用了 5 个指标(预报位置的偏差、强度预报的偏差、预报生成的能力、预报生长的能力和预报消亡的能力)来评价 *NIMROD*、*S-PROG*、*ANC* 和 *TITAN* 的预报结果。通过分析奥运会期间有强天气过程的 6 天的资料,指出 *ANC* 和 *TITAN* 对预报位置的平均误差最小,大概在 0~20km 之间; *NIMROD* 和 *S-PROG* 的平均误差较大,大概在 15~40km 之间。

2004 年, Paul^[4] 认为在这次 *FDP* 试验中风暴的识别、追踪和预警的误差,主要有下面 3 个来源:(1)雷达的扫描间隔;(2)雷达自身

的硬件条件(如比较陈旧的 Wollongong 雷达造成了算法性能的降低);(3)地物回波的影响。

5 总结

本文介绍了基于雷达资料的风暴体识别、追踪及预警方法的研究进展,对其中的交叉相关法、单体质心法以及新近出现的方法做了重点介绍。经过长期的研究,基于交叉相关法和单体质心法已经出现了一些比较成熟的算法,它们在目前的临近预报业务中发挥着重要作用。另外,这些算法也是概念模型专家系统的重要组成部分。交叉相关法和单体质心法的缺点是预报有效期较短,没有预报风暴生成的能力。

近年来出现的新方法在风暴识别方面进行了更多的尝试,试图从大、小两个方面提高探测风暴的能力及预警准确性,即识别较大范围的风暴包络和识别早期的、较小的风暴单体。另外,值得注意的是:随着具有统计专业背景学者的加入,各种现代统计方法的使用逐渐增多,他们引入的统计方法能带来更多积极的研究成果。

对于临近预报结果的评分检验技术,目前普遍使用的仍然是列联表方法。虽然列联表方法给出的评分检验结果具有较好的参考价值,但仍然存在很多不确定性。如何选择合适的临近预报评价方法,仍是一项需要进一步研究的工作。

另外,正如 Wilson^[2]所指出的,临近预报技术的发展趋势就是外推预报、概念模型专家系统和数值模式预报三种方法之间的相互融合。外推预报和数值模式预报的结果可以被融合进专家系统方法中,专家系统得到的边界层辐合线的识别等结果也可以作为外推预报和数值模式预报的输入数据。

本文中提及的所有方法都是基于雷达反

射率因子数据的。新一代的多普勒天气雷达资料中除反射率因子外,还有径向速度和谱宽。因此,综合使用这三种资料是提高风暴体识别、追踪和预警准确率的一个发展方向。

参考文献

- [1] Dixon M., and G. Wiener. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1993, 10:785-797.
- [2] Wilson J. W., Crook, N. A., Mueller, et al. Nowcasting thunderstorms: a status report [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1998, 79: 2079-2099.
- [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[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(6):754-766.
- [4] Joe Paul, Burgess Don, Potts Rod, et al. The S2K Severe Weather Detection Algorithms and Their Performance[J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19: 43-63.
- [5] Rinehart R E., Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar [J]. *Nature*, 1978, 273: 287-289.
- [6] Li L., Schmid W., Joss, J.. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1995, 34:1286-1300.
- [7] Lai E. S. T.. TREC application in tropical cyclone observation[C]. ESCAP/WMO Typhoon Committee Annual Review, 1999. 135-139.
- [8] 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*, 2005, 31(10): 12-15.
- [9] Evans J. E., E. R. Ducot. The Integrated Terminal Weather System[J]. *Lincoln Lab. J.*, 1994, 7: 449-474.
- [10] Mueller C. K., T. Saxen, R. D. Roberts, et al. NCAR Auto-Nowcast system[J]. *Weather and Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [11] Seed A. W.. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2003, 42: 381-388.
- [12] Golding B. W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts[J]. *Meteor. Appl.*, 1998, 5: 1-16.

- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社,2006:180-231.
- [14] Crane R. K.. Automatic cell detection and tracking. IEEE Trans[J]. Geosci. Electron., 1979, GE-17: 250-262.
- [15] Bjerkaas C. L., E. E. Forsyth. Real-time automatic tracking of severe thunderstorms using Doppler weather radar[C]. Preprints, 11th Conf. on Severe Local Storms, 1979. 573-576.
- [16] Austin G. L., A. Bellon. Very-short-range forecasting of precipitation by objective extrapolation of radar and satellite data[M]. Nowcasting, K. Browning, Ed., Academic Press, 1982. 177-190.
- [17] Rosenfeld D.. Objective method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 1987, 4: 422-434.
- [18] Johnson J. T., MacKeen P. L., Witt, A., et al. The Storm Cell Identification and Tracking algorithm; an enhanced WSR-88D algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13: 263-276.
- [19] Greg Stumpf. Improvements to SCIT tracking-SCIT filter[C]. TAC Meeting Decision Briefing, 28 Oct. 2003. NSSL/NOAA.
- [20] Eilts M.. Severe weather warning decision support system[C]. Preprints, 18th Conf. on Local Severe Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 1996. 536-540.
- [21] 汤达章. 雷达回波跟踪的两种方法及精度比较[J]. 热带气象学报, 1994, 5(3): 146-153.
- [22] Tsonis A. A., G. L. Austin. An evaluation of extrapolation techniques for the short-term prediction of rain amounts[J]. Atmos. Ocean, 1981, 19: 54-65.
- [23] Wolfson M., Forman B., Hallowell R., et al. The growth and decay storm tracker. 8th Conference on Aviation[C]. American Meteorological Society, Dallas, TX, 1999. 58-62.
- [24] Jan Handwerker. Cell tracking with TRACE3D—a new algorithm[J]. Atmospheric Research, 2002, 61: 15-34.
- [25] V Lakshmanan. Multiscale Storm Identification and Forecast[J]. Atmospheric Research, 2003, 67-68: 367-380.
- [26] Xu K, Wikle CK, Fox NI. A kernel-based spatio-temporal dynamical model for nowcasting weather radar reflectivities[J]. J. Amer. Statistical Association, 2005, 100(472): 1133-1144.
- [27] V. Lakshmanan. A technique for creating probabilistic spatio-temporal forecasts[C]. ICAPR 2007, accepted.
- [28] Brown B. G., E. Brandes. An Intercomparison of 2D storm motion extrapolation algorithms[C]. Preprints, 28th Conf. On Radar Meteorology, Austin, TX. Amer. Meteor. Soc., 1997. 495-496.
- [29] Jackson M. E. An echo motion algorithm for air traffic management using a national radar mosaic[C]. Preprints, Fifth Int. Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 1993. 299-303.
- [30] Wilson J. W., Ebert E., Saxen T. R., et al. Sydney 2000 Field Demonstration Project; Convective storm nowcasting [J]. Weather and Forecasting, 2001, 13: 131-150.
- [31] Pierce C. E., P. J. Hardaker, C. G. Collier, et al. GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation [J]. Meteor. Appl., 2000, 7: 341-360.