第5卷 第6期
2011年12月

沙漠与绿洲气象
Desert and Oasis Meteorology

对流天气临近预报业务系统的新发展

梁 丰
(北京市气象局,北京 100089)

摘 要:对流天气的临近预报是近年来中国气象局重点发展的一个新的业务领域,目前临近预报业务系统中主要的算法,仍然是基于雷达资料的外推预报。本文基于2008年奥运会期间在北京实施的世界天气研究计划临近预报国际示范项目-B08FDP的运行情况,介绍了国际先进的临近预报业务系统及其在临近预报算法方面的新进展,并给出了奥运示范期间临近预报系统总体预报性能的检验结果。

关键词:对流天气;临近预报系统;检验
中图分类号:P456 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2011)06-0001-06

New Development of Convective Weather Nowcasting Systems

LIANG Feng
(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China)

Abstract: Recent years, convective weather nowcasting, as a new operational forecasting field , had gained attention of China Meteorological Administration. The major algorithms of nowcasting are still based on extrapolation of Radar data. State-of-the-art nowcasting operational systems and advances in the nowcasting algorithms are presented in this paper on the basis of our experiences in running the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project of the World Weather Research Project. The verified results of general performances in the Olympic demonstration period of those nowcasting systems were also provided.

Key words: convective weather; nowcasting systems; verification

临近预报(nowcasting)一般指对流性天气(雷暴、冰雹、龙卷等)的0~2 h预报。早期的临近预报技术方法主要是基于雷达回波、卫星云图或闪电定位等数据的外推预报。其中,又以基于雷达资料的临近预报技术发展最快,20世纪60—70年代开发出"区域追踪"(area tracker, Kessler[1], 1966)和"单体追踪"(cell tracker, Barclay 和 Wilk[2], 1970)两种算法。"区域追踪"法通过对不同时间的雷达反射率图像求交叉相关,来确定回波移动的方向和速度(Rinehart[3], 1978; Tuttle[4], 1990);"单体追踪"法首先识别单个风暴,再求每个风暴质心的移动。经过不断的改进、扩展,这两种算法目前仍是业务临近预报系统中应用最为广泛的外推预报算法。

1976年第一个业务化的自动临近预报系统SHARP在加拿大的魁北克预报中心投入应用(Bellon and Austin[5], 1978)。随后,很多国家的气象部门也逐步建立起业务化的临近预报系统,对灾害性强天气的临近预报和预警起到了积极作用。2000年悉尼奥运会期间,世界气象组织世界天气研究计划(WWRP)组织了第一次临近预报系统的国际示范项目——悉尼2000奥运会预报示范(S2KFDP,

收稿日期:2011-08-09
作者简介:梁丰(1972-),女,高级工程师,主要从事暴雨天气预报研究。E-mail: liangfeng@bjmb.gov.cn

Keenan 等[6],2003),项目结束后 WWRP 成立了专门的临近预报工作组,对临近预报技术的发展起到了重要的推动作用。

由于临近预报系统对于雷达资料的高度依赖,发展中国家在临近预报业务系统的建设方面明显落后于发达国家。我国从 1998 年开始全面建设新一代天气雷达系统,为了做好 2008 年北京奥运会气象服务,中国气象局优先在京津冀地区建立起新一代天气雷达的区域网,并向世界气象组织申请举办了第二次临近预报国际示范项目——北京奥运会预报示范(B08FDP,Wang 等[7],2011)。2005 年,B08FDP 项目在北京市气象局正式启动,共有来自美国、加拿大、澳大利亚和中国的 8 个临近预报系统参加了示范运行,这些系统基本上代表了当前国际临近预报业务系统的最高水平。本文基于 B08FDP 项目的示范运行情况,介绍临近预报业务系统的新发展。第二部分简述 B08FDP 项目的参加系统,第三部分介绍系统在临近预报算法方面的新进展,第四部分给出系统的总体预报性能检验,最后是未来发展方向的讨论。

1 B08FDP 项目的参加系统

1.1 BJ-ANC

北京市气象局在引进美国大气科学研究中心(NCAR)的雷暴临近预报系统 Auto-Nowcaster(ANC)的基础上,对多个雷暴分析和临近预报核心算法进行了本地化改进和拓展研发而建立的北京地区雷暴自动临近预报系统。BJ-ANC 的主要产品包括:30、60 min 和 2 h 强雷暴单体追踪预报,30、60 min 雷暴回波预报和雷暴演变趋势预报,对流强降水定量预报,边界层辐合线位置预报,以及对流层低层热动力和微物理反演场。

1.2 CARDS

加拿大气象局的临近预报业务系统。它兼有雷达资料显示、交互分析和自动外推预报的功能,能够提供强天气识别、雷暴单体追踪预报、未来 90 min 区域及特定地点降水预报产品。

1.3 GRAPES-SWIFT

系统由广东省气象局和中国气象科学研究院联合开发的强对流天气短时临近预报业务平台,利用雷达资料外推技术和统计方法制作临近预报。主要产品包括 2D 雷达反射率拼图,定量降水估计,0~3 h 定量降水预报,对流天气潜势和风暴单体识别、追踪和预报。

1.4 MAPLE

加拿大 McGill 大学开发的降水临近预报系统,基于雷达观测,利用统计方法预报回波强度和降水量。

1.5 NIWOT

美国大气科学研究中心开发的 1~6 h 对流降水预报系统,使用雷达外推与数值预报相融合(blending)技术,数值模式预报的对流发展和消亡的趋势被用于改进相应的雷达回波外推预报。NIWOT 的主要产品是 1~6 h 内逐小时雷达回波预报,水平分辨率 1 km。

1.6 STEPS

澳大利亚气象局和英国气象局合作,在悉尼 FDP 的参加系统 S-PROG 的基础上开发的雷达降水估测和预报系统。STEPS 对 S-PROG 的回波追踪算法进行了改进,并增加了降水概率预报的功能。STEPS 使用统计模式计算降水的空间和时间分布、雷达降水估测误差,从而生成 0~90 min 的降水集合预报。集合预报的结果被用来计算未来 60 min 超过某降水阈值的概率。

1.7 SWIRLS

香港天文台开发的临近预报系统,参加 B08FDP 示范的版本是在第二版基础上针对北京特点改进的。系统包含了若干个短时临近预报子系统,分别负责观测数据处理、临近预报算法、预报产品生成和分发以及可视化功能。主要产品包括:定量降水估计/预报(QPE/QPF),降水概率预报,回波追踪预报和强对流天气(暴雨、雷电、下击暴流、冰雹、强飑线等)预报。

1.8 TIFS

澳大利亚气象局开发的交互式预警制作系统,预报员可通过该系统调看临近预报系统的自动预报产品,并在此基础上编辑制作预警产品。在 B08FDP 项目中,TIFS 开发了临近预报集成算法,基于 B08FDP 的多个参加系统制作临近概率预报产品。

2 临近预报系统的一些新算法

2.1 雷达外推与数值预报融合算法

大量研究表明,基于外推算法的临近预报系统,其准确率随时间迅速下降(Browning[8],1980;Wilson 等[9],1998),这种准确率的迅速降低主要是由于系统对风暴演变过程的预报失败所导致。S2K FDP 的实践表明,即使制作未来 30~60 min 的预报也必须考虑雷暴的初生、发展和消亡。仅仅使用雷达外推技

术的临近预报系统对 2 h 以上的雷暴预报能力十分有限,因此,悉尼奥运会后很多临近预报系统都开始发展数值模式与雷达外推相融合的技术。参加 B08FDP 项目的 8 个临近预报系统中,NIWOT, SWIRLS 和 GRAPES-SWIFT 均使用了这种技术,将预报的时效延伸到 3~6 h。

NIWOT 系统的融合算法。假定雷达外推算法对降水落区的预报是最好的,数值模式对降水范围的变化有一定的预报技巧。如果预报发布时刻有大于 35 dBZ 的回波出现,则使用雷达外推算法预报未来回波的位置,再根据模式预报的回波(将预报的雨水(rain water)通过 Z-R 关系转换得到)区域对雷达外推法预报的回波面积进行调整。如果预报发布时刻没有大于 35 dBZ 的回波,而数值模式预报未来有回波,则使用模式预报结果。另外,NIWOT 允许对自动生成的融合预报结果进行人工修改。

SWIRLS 的融合算法。首先利用“位相修正(phase correction)”技术对数值天气模式预报雨带的位置误差进行修正,同时根据实况观测的雨量调整模式的雨量强度,调整后的模式结果与雷达外推结果进行融合。在融合算法上,雷达外推的逐小时雨量预报和经修正的模式预报由双曲线函数确定权重因子,随着预报时效的增加数值模式预报结果的权重逐步增加(等权重点在 3 h 预报左右)。权重因子的双曲线函数可以根据雷达外推和数值预报过去的预报效果来动态调整(Wong and Lai[10],2006)。

GRAPES 的融合算法。使用模糊逻辑法将由交叉相关追踪算法 COTREC 得到的位移矢量与逐小时更新同化循环模式 GRAPES-CHAF 的水平风场预报相融合,得到外推矢量场。考虑到由于 COTREC 矢量的最小分辨率限制而引起的外插误差和回波像素位置预报中的截断误差,在反射率预报中还使用了格点补偿方案(Feng 等[11],2007)。

2.2 临近概率预报方法

与短期天气预报类似,强对流天气的短时临近预报同样存在很大的不确定性,特别是对较长时效(2~6 h)或较强降水的预报存在较大的误差。为正确地描述这种预报的不确定性,概率预报的方法被引入到短时临近预报的范畴。在 B08FDP 中,STEPS 和 SWIRLS 采用了不同的方式制作降水概率预报,同时 SWIRLS 还提供闪雷概率预报,而 TIFS 则采用 poorman ensemble 的方法基于 B08FDP 其他系统的预报结果制作了风暴追踪的概率预报。

2.2.1 STEPS 的概率预报算法

STEPS 使用随机模式生成未来 60 min 降水量的概率预报。首先,采用谱分解方法将最近 3 个时刻的雷达图分解为不同空间尺度,计算相关来得到降水场的变化率。这一变化率被用来确定随机产生降水场集合预报的统计模式的参数,再通过对外推矢量进行扰动来修改降水集合预报的结果,最后由集合预报计算未来 60 min 超过某一阈值的降水概率预报。

2.2.2 SWIRLS 的概率预报算法

考虑到基于物理或随机扰动的集合预报方法对计算机资源的需求很大,SWIRLS 使用基于时间延迟的集合算法,将前几个时刻的预报视作加入了“扰动”的集合预报成员来制作降水概率预报。时间越早的预报,其权重越低(Wong 等[12],2009)。SWIRLS 还提供闪电概率预报。Yeung 等[13](2007)的研究表明,混合相态(0~20 ℃)层中的等温层雷达反射率(Isothermal radar reflectivity)对闪电发生有指示意义。假定上述等温层雷达反射率超过一定阈值将出现闪电,类似前面降水概率预报的方法,时间延迟的等温层雷达反射率集合预报被用于计算闪电发生概率。

2.2.3 TIFS 的概率算法

TIFS 以提供降水预报的 B08FDP 参加系统为集合预报成员来制作降水概率预报,权重因子取各系统相等。此外,TIFS 使用 B08FDP 系统的雷暴路径预报的误差特性来计算雷暴命中概率预报,即基于各系统对雷暴移动速度和方向的预报误差的二元高斯分布函数,来计算在某一时间段中某一地点受雷暴影响的概率(Dance 等[14],2010)。

3 临近预报系统的总体性能

2008 年北京奥运会期间,参加 B08FDP 项目的 8 个国内外临近预报系统,从 8 月 1 日至 9 月 20 日在北京市气象局进行了 51 d 的实时业务运行。使用实时检验系统 RTFV 对各系统预报结果进行了实时检验,并与悉尼 2000 奥运会时的类似预报检验结果进行了对比,来评估临近预报系统的总体性能(Ebert 等[15],2009)。

3.1 定量降水预报

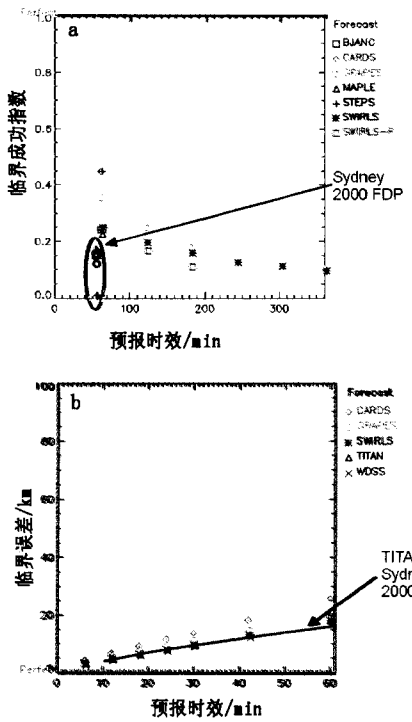
图 1a 给出了临近预报系统对 $\geqslant 1\ \mathrm{mm \cdot h^{-1}}$ 的降水预报的 TS 评分。可以看到,相比与 2000 年悉尼奥运会时,2008 年奥运示范期间各临近预报系统的总体预报性能有明显的提升。这是否是由于北京奥运会的天气比悉尼奥运会要容易预报呢? TITAN 模

沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第5卷 第6期
2011年12月

块是 ANC 系统中的雷达外推预报模块，S2KFDP 时澳大利亚气象局将该模块加入到 TIFS 系统中运行，B08FDP 项目时 TIFS 系统仍然提供了 TITAN 模块的预报结果。因此对比两次示范期间 TITAN 模块的预报性能，可了解两次预报示范期间的预报难度是否存在明显差异。从图 1b 中可以看到，TITAN 系统的雷暴单体轨迹预报误差在这两次奥运会示范期间基本类似，表明两地天气的预报难度差别不大。所以说，经过悉尼奥运会后 8 a 的努力，各临近预报系统在定量降水预报方面确实取得了进步。

前面提到 B08FDP 的参加系统中有不少采用了雷达外推与数值预报融合算法，为了测试加入数值模式结果对预报的影响，香港天文台的 SWIRLS 系统同时提供了融合算法的预报结果和仅使用雷达外推预报的结果(即图 1a 中的 SWIRLS-R)。从 TS 评分来看，采用融合算法的 SWIRLS 略高于仅使用外推算法的 SWIRLS-R，并且随着预报时效的延长，融合算法的优势越明显。但与此同时，融合算法的均方根误差(RMSE)也高于外推算法(图 1d)。融合算法的均方根误差在 2 h 预报达到最大，之后随预报时效的延长而逐渐减少，这反映出模式对 3 h 以上预报的贡献。

从≥10 mm·h^{-1} 的降水预报 TS 评分（图 1c)可以看出，即使对临近预报而言，强降水的准确预报也是非常难的，1 h 预报的 TS 评分平均在 0.1 左右，2 h 以上各系统都在 0.05 以下。



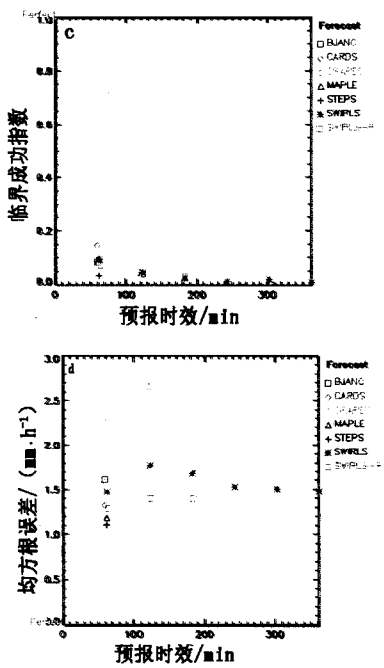


图 1 (a)B08FDP 各系统对≥1 mm·h^{-1} 降水预报 TS 评分与 S2KFDP 各系统(黑色圆圈内)的对比。图例中，SWIRLS-R 代表只使用雷达外推算法的 SWIRLS 系统预报结果，SWIRLS 代表使用雷达外推与数值预报融合算法的 SWIRLS 系统预报结果。(b)B08FDP 和 S2KFDP 各系统雷暴单体轨迹预报的位移误差(单位:km)。其中，TITAN 是唯一的在两次 FDP 中算法保持不变的临近预报系统，橙色实线是它在 S2KFDP 中的预报误差，橙色三角代表它在 B08FDP 期间的单体预报误差。(c)B08FDP 各系统对≥10 mm·h^{-1} 降水预报 TS 评分。(d)B08FDP 各系统降水预报的均方根误差

3.2 雷暴移动路径预报

从图 1b 可以看到，尽管悉尼奥运会后国际气象学界在雷暴自动预报算法改进和雷暴发展动力学方面取得了一些进展，但在雷暴单体移动路径预报方面，临近预报系统的总体性能上与 S2KFDP 时相比并没有明显进步，未来 1 h 单体位置的预报误差为 17~25 km。这可能反映了雷暴路径的可预报性问题。

3.3 降水概率预报检验

从降水概率预报来看，1 mm·h^{-1} 以上的降水预报效果还是不错的，从图 2a 可以看到 SWIRLS 和 STEPS 的可靠性(reliability)评分都不错，但对于 10 mm·h^{-1} 以上的强降水的概率预报技巧明显下降(图 2b)，两个模式都存在虚警率过高的倾向。

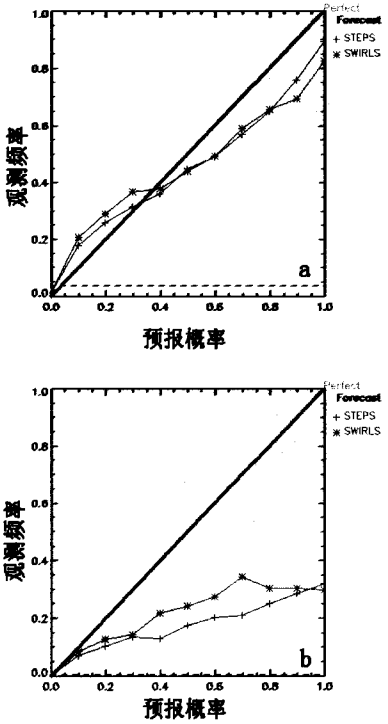


图 2　1 h 累积降水概率预报的可靠性评分
(a 为 1 mm·h^{-1} 以上降水;b 为 10 mm·h^{-1} 以上降水)

TIFS 系统采用逻辑回归法（Applequist 等[16], 2002）利用多个临近预报系统的定量降水预报来计算降水概率，每个临近预报系统的结果都使用由

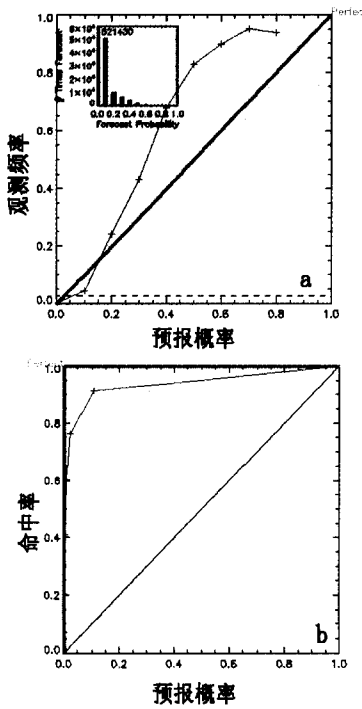


图 3　TIFS 系统提供的 2 mm·h^{-1} 以上降水概率预报的评分(a 为可靠性;b 为 ROC)

2007 年系统测试期间的预报个例计算出的强度系数进行了“校正”,这导致校正结果有偏干的倾向,因而从图 3a 可以看到，最终集成的 2 mm·h^{-1} 以上降水概率预报比观测要偏小。但从对应的 ROC 曲线(图 3b)可以看到,预报具有相当高的命中率和相当低的虚警率,表明通过适当的调整,预报的可靠性评分能够进一步提升。

如前所述,SWIRLS 系统使用不同时次的预报制作概率预报,STEPS 使用随机模式制作概率预报,而 TIFS 使用不同系统的预报制作概率预报。上述检验结果表明这三种方法的预报技巧没有明显的差异。

3.4　雷暴命中概率预报检验

用是否在预报时效内(1 h)出现 40 dBz 以上回波来检验雷暴命中概率预报是否正确。一共有 60 个预报样本同时具备自动预报和人工修正预报两个结果，这 60 个样本大多来自 2008 年 8 月 8 日、10 日、14 日和 24 日。从图 4 可以看到,人工修正的预报比自动预报具有更高的可靠性和更低的虚警率,这反映了有经验的预报专家对客观预报的修正能力(去除虚假预报回波)。

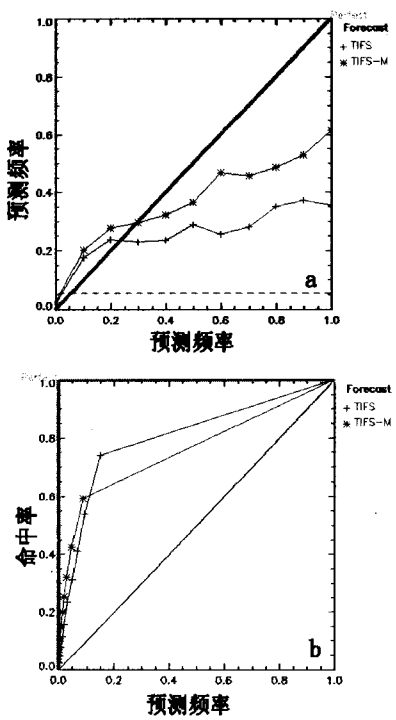


图 4　TIFS 系统自动生成的雷暴命中概率预报(a)与人工修正后的雷暴命中概率预报(b)的评分对比

4　未来发展

2009 年 8 月 31 日，世界气象组织短时临近预

报国际研讨会(WSN09)在加拿大惠斯勒召开,各国专家就短时临近预报技术的发展进行了交流和讨论。与会专家普遍认为,从B08FDP示范情况来看,仅仅基于雷达资料的临近外推预报技术发展空间已经不大,通过blending技术将数值预报与外推预报相融合,来提高2~6 h对流天气预报准确率是短时临近预报未来的一个发展方向。但是,blending技术能否成功,关键在数值模式的预报效果。从会议交流的情况来看,目前高分辨率数值模式的平均预报性能还不能满足blending的要求。因此,2~6 h对流天气短时预报技术的前进,需要通过雷达气象研究和数值预报研究的科学家的紧密合作来实现。

此外,来自EUMASAT的专家也介绍了他们在利用卫星资料开展临近预报方面的新进展。由于气象雷达一般是测雨雷达,而卫星观测可以提供未形成降水前的云的发展的信息,因此,利用高时空分辨率的卫星观测资料可以监测早期的对流发展,从而提高预报预警的时效。同时,由于雷达的布设需要大量的经费投入,发展中国家往往无力大规模建设多普勒雷达网,而卫星的覆盖范围广,发展中国家也可利用共享的卫星资料开展临近预报。当然,要真正将卫星资料用于短临预报业务还存在很多有待解决的问题,最基本的一点就是绝大部分现有的业务卫星资料的时空分辨率和观测精度还不能满足短临预报的需要。但无论如何,基于卫星资料的短时临近预报技术研究已成为世界气象组织大力支持的一个发展方向。

参考文献:

[1] Kessler E. Computer program for calculating average lengths of weather radar echoes and pattern bandedness[J]. J Atmos Sci,1966,23:569-574.

[2] Barclay P A,Wilk K E. Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations [C]. ESSA Tech Mem,ERLTM-NSSL 1970:46,63.

[3] Rinehart R E. A pattern recognition technique for use with conventional weather radar to determine internal storm motions. Recent Progress in Radar Meteorology [J]. Atmos Technol,1981:119-134.

[4] Tuttle J D,Foote G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar [J]. J Atmos Oceanic Technol,1990,7:218-232.

[5] Bellon A,Austin G L. The evaluation of two years of real time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP)[J]. J Appl Meteor,1978,17:1778-1787.

[6] Keenan T,J Wilson P Joe. The Sydney 2000 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project:Overview and current status [J]. Bull Amer Meteor Soc,2003,84:1041-1054.

[7] Wang J J,T Keenan P Joe. Overview of the Beijing 2008 Olympics Forecast Demonstration Project [M]. Beijing, China Meteorological Press,2011.

[8] Browning K A. Local weather forecasting [J], Proc R Soc London Ser A,1980,371:179-211.

[9] Wilson J W,Crook N A,Mueller C K,et al. Nowcasting Thunderstorms:A Status Report[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998,79:2079-2099.

[10] Wong W K,Lai E S T. RAPIDS-Operational Blending of Nowcast and NWP QPF [R]. 2nd International Symposium on Quantitative Precipitation Forecasting and Hydrology,Boulder,USA, 4-8 June 2006.

[11] Feng Y,Zeng Q, Liang Q,et al,Introduction to GRAPES-SWIFT nowcasting system [R]. Proceedings of the 21st Guangdong-Hong Kong-Macau Scientific and Technological Seminar on Hazardous Weather,Hong Kong,2007,1:24-26.

[12] Wong W K,Yeung LHY,Wang YC,et al. Towards the Blending of NWP with Nowcast-Operation Experience in B08FDP [R]// Whistler B C.WMO Symposium on Nowcasting,30 Aug-4 Sep 2009,Canada,2009.

[13] Yeung LHY,Lai EST,Chiu KS. Lightning initiation and intensity nowcasting based on isothermal radar reflectivity-a conceptual model [R]. 33rd International Conference on Radar Meteorology, Cairns,Australia, 6-10 August 2007.

[14] Danc S,Ebert E, Scurrah D. Thunderstorm strike probability nowcasting [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2010,27:79-93.

[15] Ebert E,Liang F, Kong R,et al. 2009:Real time nowcast verification during the 2008 Beijing Olympics Forecast Demonstration Project,WMO Symposium on Nowcasting, 30 Aug-4 Sep 2009,Whistler,B.C.,Canada.

[16] Applequist S,Gahrs G E,Pfeffer R L,et al. Comparison of methodologies for probabilistic quantitative precipitation forecasting [J]. Weather and Forecasting, 2002,17:783-799.