

代刊,曹勇,钱奇峰,等. 2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势. 气象, 42(12):1445-1455.

中短期数字化天气预报技术现状及趋势^{* 1}

代 刊 曹 勇 钱奇峰 高 嵩 赵声蓉 谌 芸 钱传海

国家气象中心,北京 100081

提 要: 建立无缝隙集约化的天气预报业务体系,需要进一步加强中短期天气预报业务技术的发展。通过对现状回顾,指出经过 2011—2015 年的气象现代化建设,在我国国家级和部分省级业务单位已初步建立了数字化中短期业务预报技术流程,其包括数值模式系统、客观方法释用、预报主观编辑制作以及精细化格点后处理四个方面。但与国外发达国家相比,我国中短期业务技术还存在数值模式发展水平不高、客观预报技术方法未全面深入开展、缺乏有效技术工具支撑预报员进行订正、格点化的处理技术基础薄弱等问题。文章在发展现状和问题分析的基础上,提出未来应提高自主数值模式系统的基础支撑作用,深入发展海量预报信息的客观提取及订正技术,加强开发主观和客观融合的技术和工具平台,完善精细化的格点处理技术的发展思路,并进行具体阐述。最后,从技术发展的基础数据支持、路线选择、发展规律以及交流共享四个方面提出参考意见。

关键词: 中短期天气预报,无缝隙业务体系,预报技术体系,格点化预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.002

Situation and Tendency of Operational Technologies in Short- and Medium-Range Weather Forecast

DAI Kan CAO Yong QIAN Qifeng GAO Song ZHAO Shengrong
CHEN Yun QIAN Chuanhai

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Operational technologies in short- and medium-range weather forecast need further strengthening for the development of seamless and intensified weather forecast operational framework. Through reviewing present status of development, we find that, by the meteorological modernization during 2011—2015, the preliminary digitization for the technical flow in the short- and medium-range operational forecast has been developed in the national and some provincial operational units of China, including the numerical weather prediction system, the objective method application, the subjective editing and the downscaling gridded post-processing. However, comparison with the developed countries shows that there are still some problems in the short- and medium-range operational technologies of China, such as lower-level development of numerical model, insufficiency of complete and in-depth application of the objective technical method, lack of effective technology tools to support calibration of forecasters and the weak foundation of processing technique for gridding. Based on the review of present status of development and the analysis of current problems, suggestions are made that in the future development, the foundation role of the independent numerical model system should be enhanced, the objective techniques of forecast information extraction and calibration should be further developed, platform of subjective and objective blending techniques and tools should be developed greatly, and the development concepts of the downscaling gridded

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002 和 GYHY201206005)共同资助

2016 年 3 月 10 日收稿; 2016 年 8 月 29 日收修定稿

第一作者:代刊,主要从事集合预报、定量降水预报方向的研究. Email:daikan1998@163.com

processing technique should be improved, followed by detailed exposition. Finally, ideas for reference are provided on four aspects, which are the basic data support for technical development, selection of the technical route, laws of technical development as well as exchange and sharing of techniques.

Key words: short- and medium-range weather forecast, seamless operational framework, framework of weather forecast technology, gridded weather forecast

引言

为应对天气预报需求从以产品为中心向以用户为中心的转变,中国气象局在 2016 年发布的《现代气象预报业务发展规划(2016—2020 年)》中指出,未来重点任务是完善从临近短时预警(0~12 h)、中短期预报(1~10 d)到延伸期预报(11~30 d)的无缝隙集约化业务体系(Brunet et al, 2015),以及大力发展客观化、精准化的技术体系,并提出“发展两头,巩固中间”的发展思路。这里,“中间”即指中短期业务体系。中短期预报业务是传统天气预报业务内容的主要组成部分,具有发展时间长、基础好、成熟度较高等特点。然而,面对新形势下的用户需求,目前以主观为主、客观为辅的业务技术体系表现出预报准确率提升缓慢、量化及精细化水平有限、预报员工作量不断攀升等缺陷,制约着中短期天气预报业务体系的发展和效益发挥。因此,中短期预报业务技术支撑需要被进一步巩固和加强。本文对目前我国中短期业务技术的发展现状以及存在的问题进行了总结,并对未来的发展思路进行阐述,以期为建立现代化的数字天气预报技术流程,满足精细化、多元化的预报服务需求提供参考。

1 现状分析

1.1 数字化的预报技术流程

2014 年中国气象局预报司在《国际天气预报业务现状调查报告》中指出,目前我国预报业务产品适应气象服务需求的能力较弱,需要实现“由站点预报向格点预报转变,由确定性预报向概率预报”的预报预测产品的发展思路。经过 2011—2015 年的气象现代化建设,我国在国家级和部分省级业务单位已初步建立了数字化中短期业务预报技术流程(如图 1),主要包括数值模式系统、客观解释应用方法、预报主观编辑制作以及精细化格点后处理四个方面。

这里,数值模式系统是中短期预报业务的基础;基于海量的实时及历史预报及观测数据,客观解释应用方法用于消除预报误差以及提取有效预报信息;预报员基于预报理论和经验,应用主观编辑工具进行站点、格点和灾害落区产品的制作,进一步提高预报准确率;最后,经过精细格点后处理程序,形成高时空分辨率的精细化格点产品。

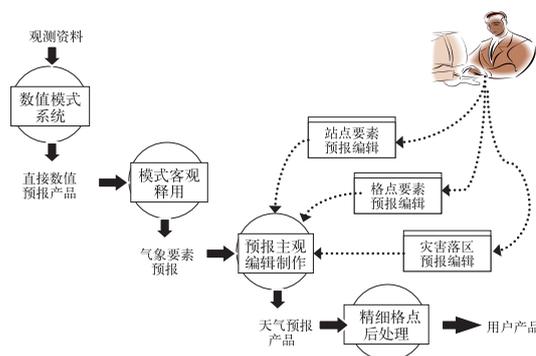


图 1 数字化的天气预报业务技术流程

Fig. 1 The flow chart of digital forecast process

1.2 数值模式系统提供基础

数值模式发展为保持中短期天气预报精准度的提高率奠定了基础。在我国,预报员在业务中能参考到最先进的国内外全球模式产品,如:欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的全球模式空间分辨率达到 9 km/137 层(Holm et al, 2016);我国业务常规 T639 模式也达到了 30 km/60 层。数值模式的预报能力不断提升,T639 可用预报时效 6.5 d 左右(管成功等,2008),ECMWF 全球确定性模式(EC)则达 8~9 d。此外,我国自主研发的 GRAPES (Global/Regional Assimilation Prediction System) 全球模式系统 2016 年进入业务流程(刘艳等,2016),个例检验评估表明其对中国区域的降水预报已经超过原有的 T639 模式系统。Forbes 等(2015)计算 EC 模式对热带外地区(南北纬 30°以外地区)1 d 时效降水预报的概率空间稳定公平误差评分(SSEPS)(Haiden et al, 2012),结果表明 21 世纪以

来,其预报能力呈现上升的总趋势,即在过去 10 年间模式降水的预报可用时效相当于提高了 1 d 左右。图 2 给出国家气象中心 1 d 时效暴雨预报 TS 评分曲线,可见自 2011 年在业务中广泛使用 ECM-WF 全球确定性模式和 T639 模式之后,预报员的暴雨预报总体水平得到显著提升,平均 TS 评分从 0.155 提升到 0.173;另外,预报员和模式的暴雨评分曲线的变化波动较为一致,表明数值模式的发展才是业务预报能力长期变化趋势的决定因素,而数值模式之上的预报技术流程重点在于增加产品的准确率和精细化水平。

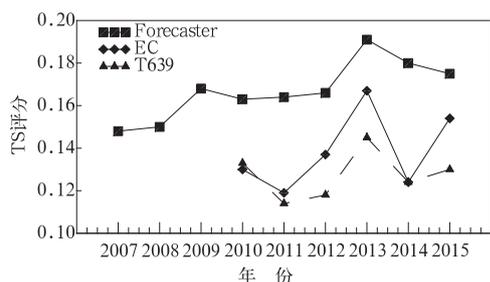


图 2 国家气象中心 1 d 时效暴雨(24 h 累积降水量 ≥ 50 mm)预报 TS 评分时间曲线及相应 EC 和 T639 模式评分

Fig. 2 Evolution of heavy rain (24 h precipitation ≥ 50 mm) threat scores of forecasters, EC model and T639 model

尽管得益于全球模式预报性能的提高,我国中短期业务预报能力得到不断增强。但对于容易引发灾害的中小尺度天气(如春、夏季的对流性降水),则一直以来是预报的难点,进展缓慢。如 2016 年 5 月 7—8 日福建西北部出现强降水过程,引发山体滑坡重大自然灾害,造成 41 人失联。对比 T639 模式预报和实况,显示模式对于江西东北部和福建西北部的暴雨及大暴雨出现了漏报(其余全球模式如 ECMWF、NCEP 和 Japan 等也没有预报出来)。同样的例子在预报业务中还有很多,表明只依靠全球模式进行中短期业务预报存在很多局限性(Ebert, 2003)。为促进对于中小尺度天气的业务预报能力,各国都在发展高分辨率业务模式(尤其是可显示表现对流的数值模式, convection-permitting models, CPM),如美国天气研究与预报模式 WRF(Weather Research and Forecasting; Michalakes et al, 2001)、英国业务化的 UKV(United Kingdom Model)对流

模式(Tang et al, 2013)、欧洲联合小尺度模式 COSMO(Consortium for Small-scale Modeling; Baldauf et al, 2011)、研究到业务应用中尺度模式 AROME(Applications of Research to Operations at Mesoscale; Seity et al, 2011)和日本非静力中尺度模式(Saito et al, 2006)。我国也发展了 GRAPES_Meso 中尺度模式(陈德辉等, 2008),毛冬艳等(2014)检验结果表明该模式能够在一定程度上较好地描述过程的发生发展,但对于极端强降水、受地形影响的强降水等,预报能力有限。此外,华北和华东区域的 WRF 模式、华南区域的 GRAPES_TMM 都得到建立和业务运行(魏东等, 2010; 王雨等, 2013),但其研发应用没有形成合力,导致业务支撑能力还不够。

1.3 客观解释应用方法提取预报信息

客观解释应用方法的发展加强了从海量预报数据中提取有效预报信息的能力。随着多中心业务数值模式的引进,尤其是集合预报系统的业务化应用,传统以模式输出统计(MOS)方法为主的客观预报技术已无法满足业务应用需求。需要面向不同的业务发展要求,发展新的客观预报技术方法,从海量的模式预报数据中快速、有效地提取和订正预报信息,降低预报系统误差,提高预报准确率和增加灾害性天气的预警能力,从而解放人的生产力,让预报员在更高层次释用预报信息。如美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的天气预测中心(Weather Prediction Center, WPC),针对温度、气压等连续变量发展了 Blender 权重集成技术,针对降水非连续变量发展了拟偏差订正集合(Pseudo-bias-corrected Ensemble, ENSBC)定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecasts, QPF)技术(Novak et al, 2014)。Novak 等(2014)的检验评估表明,预报员的主观 QPF 预报与 ENSBC 方法相比,显然没有体现出明显的优势。

在我国,近年来通过气象现代化建设,针对台风、暴雨、分类强对流、高/低温、冻雨、雾等灾害性天气的客观预报技术方法得到快速发展。如在台风路径预报中,国家气象中心与福建省气象台联合开发了“台风路径集合预报订正方法”(Typhoon Track Ensemble Correction, TYTEC),于 2012 年 7 月开始业务试用,并在 2013 年基于历史数据研制了最优方案,2014 年将单模式订正拓展到多模式(钱奇峰

等, 2014)。该方法利用集合成员的早期预报检验进行优化选择, 达到有效提取预报信息的目的。图 3 给出 2010—2015 年主观和客观台风路径 24 h 预报误差对比, 可以看到: TYTEC 方法明显地降低了模式原始预报误差, 且从 2012 年开始业务应用后, 主观路径的预报水平得到显著地提升。

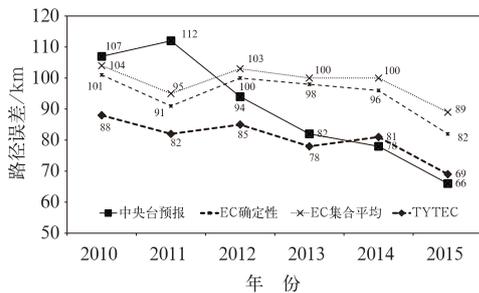


图 3 2010—2015 年主观和客观台风路径 24 h 预报误差对比

Fig. 3 The comparison of tropical cyclone track errors between subjective forecast and objective forecast from 2010 to 2015

又如在暴雨预报中, 国家气象中心通过发展或引进, 到目前为止实现 4 种客观 QPF 技术的业务运行(表 1)(张芳华等, 2016)。针对 2015 年夏季的主客观方法的预报评分对比显示(图 4), 无论对于 08 时还是 20 时起报, 表现最好的“集合最优百分位”方法在 TS 评分上已经略超过预报员, 且其 Bias 评分也稍低于预报员, 更接近于 1。对 2013、2014 年的回算检验结果亦是如此。

表 1 国家气象中心 4 种客观 QPF 技术的信息
Table 1 The four quantitative precipitation forecasts objective forecast methods

客观 QPF 技术	基本原理	研发时间	业务应用时间
多模式集成	基于多种确定性模式降水预报的相似分析, 给定权重集成	2009 年	2012 年
“配料法”等级	基于多种与降水要素相关的物理量统计建模	2012 年	2014 年
降水频率订正 (南京大学引进)	基于模式定量降水预报与实况的频率误差分析	2013 年	2015 年
集合最优百分位	基于不同等级降水的集合预报最优百分位分析及融合	2013 年	2015 年

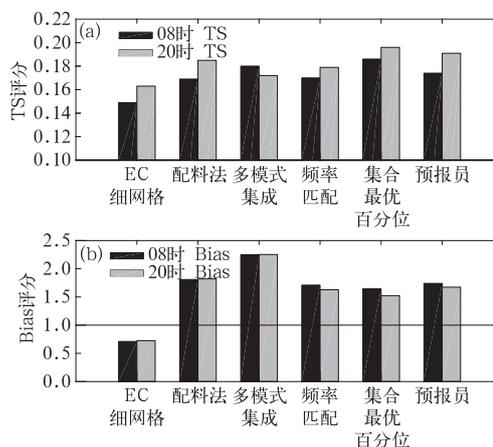


图 4 2015 年 5—8 月 1 d 预报时效的暴雨预报主观和客观方法 TS(a) 和 Bias(b) 评分对比

Fig. 4 Comparison between the TS (a) and Bias score (b) of the subjective method and four objective methods for next day forecast of heavy rain during the period from May to August 2015

尽管在我国客观释用方法得到了广泛的应用, 但纵向深入还有待进一步加强。已有研究表明, 基于多中心的海量模式数据, 应用统计后处理技术, 能够提供天气预报(尤其是高影响天气)的预报准确度(Swinbank et al, 2015)。美国(Novak et al, 2014)、英国(Bennett et al, 2014)等国家都发展了相应的客观释用技术, 利用海量的模式预报数据, 通过指定或计算最优的权重, 提取更有效的预报信息。对比我国, 客观释用方法的深入业务应用还存在差距, 表现在: 预报信息集成度不高, 大多基于单模式或几个模式预报, 没有充分利用确定性和集合预报提供的海量信息; 尚不能满足多类型、长时效的预报需求, 不同类型灾害性天气的客观预报方法的发展水平参差不齐, 如暖区暴雨、分类强对流、台风强度、降水相态等预报技术的发展还比较缓慢; 对预报不确定性信息的传递有限, 概率预报技术的发展重视不足; 尽管方法研究取得进展(Liu et al, 2014), 但成果转化和应用还达不到业务需求。

1.4 预报主观编辑工具发挥人的作用

目前, 预报员在整个中短期业务流程中仍将处于核心位置。预报员基于天气概念模型构建、对模式预报优缺点的深入理解以及决策服务经验, 可进一步改善产品的预报精度, 尤其是高影响天气的预

报能力 (Funk, 1991; Reynolds, 2003; Mass, 2003; Roebber et al, 2004; Novak et al, 2014; Homar et al, 2006; Sills, 2009)。然而,随着业务精细化发展,预报员迫切需要便捷、高效的主观编辑工具来制作和发布大量的、多种类的预报产品。如在美国天气局,预报员需要对数百个模式预报结论进行快速检验评估,从中找出最有可能的预报结论;并使用成熟的 GFE (Roberts et al, 2005)、N-AWIPS 等预报编辑平台快速订正或制作天气预报产品;最后利用 FFMP (Flash Flood Monitoring and Prediction; Smith, 2003)、SCAN (The System for Convection Analysis and Nowcasting; Smith et al, 1999)、SAFESEAS (System on AWIPS for Forecasting and Evaluation of Seas and Lakes; Hirschberg et al, 2000)、SNOW (System for Nowcasting of Winter Weather; Rasmussen et al, 2001) 等多种工具实现预警、影响决策等信息的制作和发布 (朱小祥等, 2014)。在我国,近年来,部分发达省份相继开发了预报编辑工具以满足业务需求。如广东发展了格点订正系统 (GIFT), 可编辑 7 种突发天气,可控制生消、持续、重点关注时间,并能实现如涡旋重定位等智能订正。此外,国家气象中心基于 MICAPS 发展了“精细化格点站点一体化订正平台” (高嵩等, 2014), 提供基于单点、区域或等值线的多种格点编辑功能,支持格点数据的多种显示方式 (等值线、栅格、数字等)。

与发达国家相比,我国的天气预报业务中还缺乏支持预报员发现、分析模式误差的技术及工具,例如:尽管从 2008 年开始,国家气象中心开展“数值模式天气学检验”业务,并发展了相应的预报可靠性、稳定性和不确定性的检验评估方法,但还比较初步,以主观定性为主;其次是缺乏支撑预报员进行精细化订正的智能工具,尽管已经取得初步进展,但其应用成熟度和智能化水平不高;最后,缺乏帮助预报员进行影响决策服务的技术平台,导致预报员不能有效融合致灾阈值和地理、经济、人文等信息,做出满足用户需求的影响天气预报。

1.5 格点后处理提高产品精细化水平

格点化处理技术的发展进一步提升产品精细化水平,增强用户可用性。如美国 WPC 在 2013 年,基于 30 年高分辨率的 PRISM 分析数据 (Daly et al, 2008), 发展自动化的格点后处理技术,将 30 km 分

辨率的 QPF 预报降尺度为 5 km。在我国,通过国家级、广东、上海等省(市)的格点化预报技术辐射,全国有 13 个省引进或研发了多要素格点化预报技术。如国家气象中心,从 2014 年 3 月格点化产品体系建设启动之后,其技术研发应用取得进展:发展了以模式预报为背景场,结合站点指导预报和精细化地理信息订正的温度、相对湿度等连续变量格点化预报技术;发展了基于多来源格点预报产品系统集成技术,为格点化气象要素预报产品中融合灾害性天气、台风等预报产品信息探索可行的技术方案;重点针对非连续变量——降水,发展了等值线反演、统计降尺度、地形影响降水、变分协调拆分等格点化处理技术,能够提供未来 7 d,空间分辨率为 5 km、时间分辨率为逐 3、6、12 和 24 h 的格点化 QPF 产品。尽管取得发展,但还存在差距,如:由于缺少高分辨率、长历史的降水分析资料,QPF 格点化处理的精细化水平还有进一步提升的空间;除了温度和降水之外,还需要发展湿度、风向风速、云量、降雪、积雪深度等要素的格点化处理技术;此外,需要加强预报要素之间、不同省级之间的格点协调技术的研发。

2 未来技术发展

基于目前发展现状,借鉴国内外的预报技术发展和应用成果,中短期预报业务技术应提高数值模式系统的基础支撑作用,深入发展预报信息的客观提取及订正技术,大力开发主观和客观融合的技术和工具平台,完善精细化的格点处理技术。

2.1 提高数值模式系统的支撑作用

全球数值模式系统是中短期预报的主要支撑基础,各国业务中心都在通过各种方法手段提高模式的预报性能。如 ECMWF 全球确定性模式作为最先进的 NWP 代表之一,其预报技巧不断得到提高。Forbes 等 (2015) 对 ECMWF 全球模式的 2000—2015 年的降水性能进行评估表明,每次 QPF 技巧的提高都对应模式版本的重要升级。2016 年 3 月,ECMWF 再次升级模式空间分辨率至 9 km/137 层,并引入“Cubic-octahedral”的新网格计算方案 (Malardel et al, 2016), 解决了模式“格点暴雨” (grid-point storms) 的问题,例子分析表明对于局地强降水的预报能力更强。在我国,由于 T639 模式的支撑能力不足,为此在《天气研究计划 (2013—

2020 年)》中提出,至 2020 年,建立高分辨率 GRAPES 全球模式系统(分辨率至 10 km),预报能力达 8 d。这其中包括:通过观测资料质量控制和预处理技术、资料同化框架改进与发展、卫星及雷达等非常规资料的同化技术来加强我国高密度观测资料的应用能力;通过高精度动力框架及其对复杂地形的处理技术、研究物理过程对东亚云降水过程和边界层过程的描述等来提高对于东亚天气系统的预报能力。

除全球数值模式之外,尤其需要改善对中小尺度天气的预报技巧。Roebber 等(2004)指出当前主要依靠两种途径:发展高分辨率数值模式系统直接预报天气的精细特征;发展集合预报系统提供预报的不确定性信息。

发展高分辨率模式有利于模拟和预报一些关键的大气现象,例如快速加强的温带气旋(Uccellini et al, 1999)、地形引起的风和降水(Mass et al, 2002)、海陆风环流(Roebber et al, 2000)和对流系统(Nielsen-Gammon et al, 2000),特别是对流尺度模式 CPM 的发展和业务应用,将推动短期精细化要素预报更上一个台阶(Clark et al, 2016)。目前,数值预报中心和各个区域气象中心都在运行 GRAPES_Meso、WRF 等区域数值天气预报模式,需进一步通过整合创新,加强对局地性、突发性中小尺度灾害天气的预报能力。

发展集合模式预报是提高预报精细化水平的另一条重要途径。已有的研究表明,即使是低分辨率的集合模式也可显示出比单个高分辨率模式更高的预报技巧(Stensrud et al, 1999; Wandishin et al, 2001; Gritmit et al, 2002)。相对于确定性模式,集合预报的主要优势在于能够提供概率预报,这将有利于用户根据自身的花费/损失比来进行更科学的决策(Tracton et al, 1993; Palmer, 2002)。另外 Buizza(2008)的研究表明,基于不同起报时刻的集合概率预报较确定性模式更加连续且稳定。在我国,需要建立 GRAPES 全球 1~10 d 集合预报业务系统;构建以 GRAPES_Meso 为核心的超级集合预报系统;此外还有台风集合预报初值扰动技术,延伸期(10~30 d)集合预报系统关键技术,海温扰动方法研究。

最后,需要发展模式的再预报技术(Reforecasting)。再预报(Hamill et al, 2013)技术近年发展较为迅速,其出现为客观预报技术方法的深入应用提

供了有力的支撑。如 ECMWF 基于再预报技术研发实时的极端天气指数产品(EFI, Lalaurette, 2003),以及用于月尺度预报的漂移订正和天气异常概率产品研发。Thomas(2012)的研究显示,基于再预报资料的客观预报技术较 TIGGE 多中心超级集合预报能对强降水有更好的订正效果。

2.2 发展预报信息的客观提取及订正技术

当前气象观测和模式预报信息呈现大数据特征,特别是集合预报的业务化应用(陈良吕等, 2014),使模式结果达到上百个。面对新挑战,需要发展面向不同应用的客观提取及订正技术,主要包括以下五个方面:帮助预报员或用户快速浏览预报数据、理解大气演变的动力特征、获得最可能的预报结果、捕捉极端天气预报信息以及传递预报不确定性信息。

发展海量信息的提取技术用于快速浏览预报数据。主要包括三种途径:(1)通过统计方法来获得预报数据特征,例如针对集合预报,Frederic(1999)发展了管子聚类方法,不仅能够获得主要环流形势特征,还能指示不同极端情况下的预报结果;Neal 等(2016)进一步基于大气分型发展了 Decider 工具用于天气型的概率预报。(2)通过模式输出反演建模来获得模拟的大气观测图像,Bikos 等(2012)的研究表明,利用模式预报的卫星合成图像,有助于快速认识深对流系统形成和发展的大尺度环境特征,并通过预报与观测的对比快速发现对流系统的时间和位置预报偏差。(3)通过数据可视化技术来清晰有效地传达与沟通预报信息,如 Rautenhaus 等(2015)发展了面向集合预报的三维可视化技术,用于获得天气预报的空间分布特征和预报不确定性信息;Liao 等(2015)发展了一个可视化框架用于辅助天气预报的订正流程。

发展天气学诊断分析技术用于理解大气演变的动力特征(陶祖钰, 2012; 周小刚等, 2013; 2014)。随着观测手段和模式分辨率的提高,传统基于槽脊演变、锋面气旋发展等理论的诊断分析方法已经不能满足预报需求。如由于高分辨率预报场包含了不同尺度的大气运动信息,若直接分析,则无法识别主要大气运动特征,为此 Thaler 等(2009)发展了准地转诊断包,用于反演准地转物理量,帮助预报员理解天气尺度系统动力特征。此外,位涡理论也在国外天气预报业务中得到广泛应用,其守恒特性可用于诊断气

旋锋面等系统的发生发展(Mansfield, 1996);而非守恒特性可将热力和动力过程联系起来,分析天气系统的发展演变及发现模式的预报误差(Michael et al, 2008)。

发展客观订正集成技术用于获得最可能的预报结果。发展基于多中心的超级集合预报技术,尽量集成更多的有效预报信息,如美国和加拿大联合建立了北美集合预报系统,并发展了偏差订正后处理系统(Cui et al, 2012),检验表明最终预报结果最优;Gilbert 等(2015)开展了“模式的国家级融合”(National Blend of Models)项目,目的在于通过集成多种数值模式天气预报以提供一致性高、预报技巧最优的预报指导产品。基于再预报资料,发展相应的客观预报技术,如 Thomas 等(2006)基于再预报资料发展了相似预报技术,较原始预报更能反映实际降水分布细节。

发展极端天气预报技术用于捕捉灾害性天气信息。相对于确定性预报只给出未来天气的单一场景,集合预报能够给出未来天气的多个可能场景,这使得低频率的灾害性事件的捕捉几率大大增加,因此基于集合预报发展极端天气的预报技术具有先天优势。如 ECMWF 的 Lalaurette(2003)发展的极端天气指数(EFI)预报技术已经在业务中得到应用。国家气象中心已经在业务中引入极端天气指数综合产品,能帮助预报员或用户快速获得未来天气的异

常或极端性概况,进行早期预警。此外,Hewson 等(2010)将锋面、气旋自动判别技术应用到集合预报当中,识别典型灾害性天气的移动、演变、分布等特征。

发展概率预报技术用于传递预报的不确定性信息。应用研究表明,概率预报较单值预报更有价值,其既反映了天气变化确定性的一面,又反映了天气变化的不确定性和不确定程度。但若采用集合模式直接计算的概率预报结果,则由于模式自身的预报误差而使得概率预报并不可靠,需要发展概率预报订正技术。Stensrud 等(2007)将概率预报订正方法归纳为两类:一种是回归模型方法,例如 Logisitc 回归模型;另一种参数估及方法,即假设降水服从一定的分布函数然后估计分布的参数。国家气象中心采用基于 Logistic 回归建模的概率定量降水预报订正技术,有效改善了概率定量降水预报的可靠性(图 5),订正后的可靠性曲线与对角线基本重合);在美国 WPC,则采用非对称正态分布(Toth et al, 1990)进行参数估计,并计算概率定量降水及百分位预报,其优点在于与预报员主观预报分布一致。另外,英国气象局在 2002 年年建立了概率猜测早期预警系统(FGEW)(Legg et al, 2004),基于 ECMWF 集合系统生成英国 12 个区域的区域概率预报,并在此基础上制作灾害性天气预警产品,帮助预报员发布 2~5 d 的早期灾害性天气预警;Neal 等(2014)在

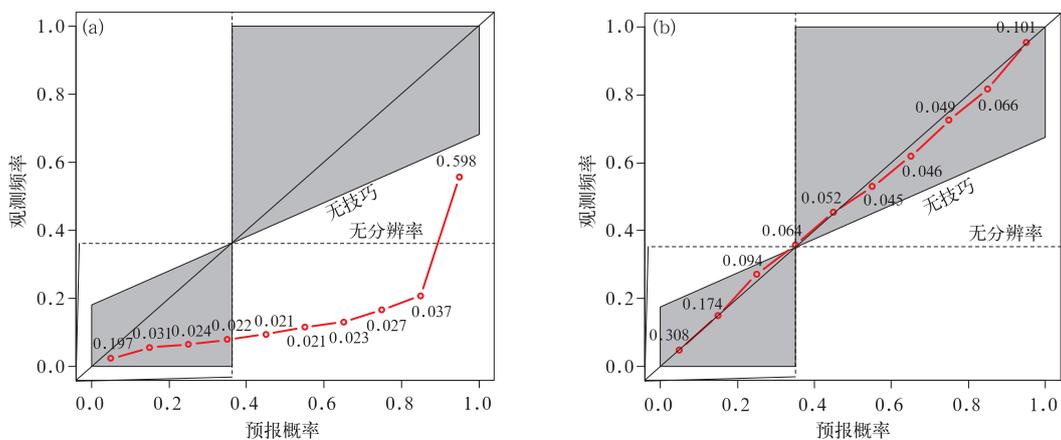


图 5 小雨量级概率预报的可靠性曲线分析

(图中虚线为可靠性曲线,若越靠近对角线,则概率预报越可靠)

(a)EC 集合模式原始预报, (b)Logistic 回归订正后预报

Fig. 5 The reliability diagram of 1 d light precipitation probability forecast (24 h accumulated precipitation ≥ 0.1 mm)

(Dotted line is the reliability curve, the closed to the diagonal line, the more reliable the probability forecast)

(a) EC model raw forecast, (b) calibrated forecast by Logistic model

2014 年进一步基于全球及区域集合预报系统 (MOGREPS) 发展针对两天以内的灾害性天气预警系统 (MOGREPS-W) 用于补充 FGEW。

2.3 发展主观和客观融合的预报技术及工具

随着数值模式不断发展和客观方法深入应用, 预报员为产品提供的附加价值将越来越有限, 需要发展主观和客观融合的预报技术及工具, 帮助预报员分析模式误差、订正预报误差以及解释预报结果。

发展数值模式的天气学实时检验评估技术帮助预报员分析误差。美国 Bua 等 (2008) 将整个天气预报过程划分为预报偏差监测、误差原因及影响诊断、确定最有可能发生的预报结论和在偏差检验和订正的基础上更新预报四个步骤。需要多种技术手段方法帮助预报员实现上述流程, 如基于空间分析、特征提取、物理量敏感性分析、卫星水汽图像的位涡诊断、历史预报偏差统计检索等检验评估方法; 研究针对数值模式分析及预报的气象要素影响天气系统和大气环流的偏差检验技术; 研究基于多模式对比、趋势分析、集合预报分析等技术的模式预报评估方法。美国 NCEP 的天气预报中心 (WPC) 发布的基于目标识别方法 (Christopher et al, 2009) 的降水预报检验产品, 能帮助预报员分析每块降水区域的位置、强度和分布误差。

发展智能化的预报订正平台帮助预报员订正误差。完善、高效的预报订正平台能支持对海量数据的快速分析, 对多种预报产品的便捷调整, 以及对预报经验的固化, 实现智能化的订正能力。如美国的图形化预报编辑平台 GFE (Dickman, 2002) 中提供了智能编辑工具和智能初始化工具来将预报员的经验快速融入到预报结果当中 (图 6)。

发展支持影响预报的技术工具帮助预报员解释预报。在预报产品的基础上做出影响预报或预警, 是将来预报员的重要工作内容。然而, 由于缺乏相关的基础数据和技术支撑, 即使预报员做出了准确的预报, 也不能保证发布有价值的影响预报。例如对于山洪泥石流风险预警, 降水预报是输入量, 还需结合地面覆盖、土壤湿度、径流、地形、基础设施、交通条件及人群分布等多种信息, 才有可能做出有效的气象风险影响预报。因此, 需要大力发展支持影响预报的技术和工具。如美国的山洪监测与预报系统 (FFMP), 能够结合多种的 QPE、QPF、雷达和山洪指导阈值等数据, 并将这些数据转换到基于高精

度的小流域区域, 帮助预报员进行山洪监测和预警 (Smith et al, 2000)。

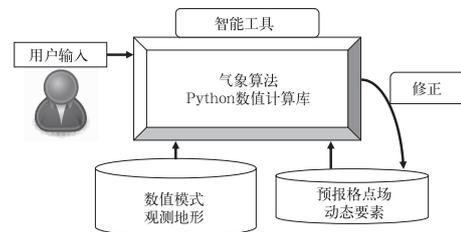


图 6 美国 GFE 的智能化工具示意图
Fig. 6 The GFE (Graphical Forecast Editor) smart tool diagram

2.4 发展精细化的格点处理技术

格点处理技术能够将天气预报产品转换或降尺度为更具用户应用价值的精细化格点产品, 主要技术包括如下两个方面:

发展预报产品——格点要素场转换处理技术。对于主观落区或站点预报产品, 需要发展主观预报反演技术, 转换为格点场 (Ruth, 1992), 并恢复预报过程中丢失的预报信息; 发展统计及地形降尺度技术, 进一步提高格点产品的空间分辨率 (Schaaake et al, 2004); 发展变分协调拆分技术提高格点产品的时间分辨率。

发展格点产品的协调一致性技术。通过发展预报要素一致性技术, 保证预报变量的三维空间分布和时间演变的一致性, 以及变量 (如降水、温度、云量、风等) 之间一致性。通过发展上下级、相邻省份的协调方法, 保证国家级与省级、相邻省份边界的一致性。如在美国 NDFD 中心 (Harry et al, 2003), 一旦地方气象局 (WFO) 的格点预报到达 NDFD 的中心服务器, 有软件会自动检验边界上的一致性。如果不连续性大于预先设定的阈值, 提交产品的 WFO 会自动获得警示可能出现的问题, 而 WFO 有机会更新其预报来保持预报的一致性。

3 结论与讨论

本文对中短期天气预报业务技术的发展现状、存在的问题和差距以及未来发展进行了阐述。可见, 未来预报技术的发展以客观化、定量化和自动化为标志, 通过主客观融合的途径, 人的作用在更高的层面发挥。在预报业务技术的发展中, 需要注意以

下几点:

(1) 加强高质量的基础数据支持。高质量的基础数据是业务技术研发的前提条件,例如:精细化格点后处理技术离不开长时间、高分辨率的分析场资料;降水相态预报建模需要高质量、连续的天气现象观测数据;模式误差背景分析需要存储海量资料的历史预报数据库;山洪风险预警需要地面植被、地形、临界雨量阈值等基础数据。目前,我国的基础数据研究还比较薄弱,这在一定程度上限制了预报技术的发展。

(2) 根据问题导向和用户需求进行技术选择。文中基本涵盖了中短期业务技术的未来发展主要方向,也给出多个技术实例,但并不是每种都适合各自的业务场景和需求。国家级和各省级气象台应有针对性地进行技术选择,来解决实际业务问题和满足用户需求。另一方面,同一业务目标也可通过不同的技术途径解决,如对于极端天气预报,美国采用了标准化距平技术,而欧洲中心采用极端天气指数技术,都取得了较好的效果。因此,可根据实际业务环境来选择某项技术,并持续发展完善。

(3) 遵循技术的发展规律。借鉴技术成熟度曲线理论(Jackie et al, 2008),新技术的发展将会经历萌芽期、膨胀期、谷底期、稳步爬升期以及生产高峰期。目前,经过近年的气象现代化建设,新技术方法还处于萌芽期或膨胀期,表现在技术方法多但效能低,或预报工具平台期望高但实用能力低,因此需要去粗存精,持续深入地发展,实现业务化的成熟应用。

(4) 加强技术的联合研发和交流共享。技术应用价值的提高需要以广泛实践应用为基础,因此需要加强国内外、国家级和省级、省级之间、高校或科研单位与业务之间的交流共享,形成开放、开源的众创型业务发展平台。

参考文献

陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究. 科学通报, 53(20): 2396-2407.

陈良吕,陈静,陈德辉,等. 2014. 基于 T213 集合预报的延伸期产品释用方法及初步试验. 气象, 40(11): 1293-1301.

高嵩,代刊,薛峰. 2014. 基于 MICAPS3.2 平台的格点编辑平台设计与开发. 气象, 40(9): 1152-1158.

管成功,陈起英,佟华,等. 2008. T639L60 全球中期预报系统预报试验和性能评估. 气象, 34(6): 11-16.

陶祖钰,郑永光. 2012. 位温、等熵位涡与锋和对流层顶的分析方法. 气象, 38(1): 17-27.

钱奇峰,张长安,高拴柱,等. 2014. 台风路径集合预报的实时订正技术研究. 热带气象学报, 30(5): 905-910.

刘艳,薛纪善,张林,等. 2016. GRAPES 全球三维变分同化系统的检验与诊断. 应用气象学报, 27(1): 1-15.

毛冬艳,朱文剑,樊利强,等. 2014. GRAPES_MESO V3.3 模式强天气预报性能的初步检验. 气象, 40(12): 1429-1438.

王雨,公颖,陈法敬,等. 2013. 区域业务模式降水预报检验方案比较. 应用气象学报, 24(2): 171-178.

魏东,尤凤春,范水勇,等. 2010. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)模式探空质量评估分析. 气象, 36(8): 72-80.

张芳华,曹勇,徐晔,等. 2016. Logistic 判别模型在强降水预报中的应用. 气象, 42(4): 398-405.

周小刚,王秀明,陶祖钰. 2013. 准地转理论基本问题回顾与讨论. 气象, 39(4): 401-409.

周小刚,王秀明,陶祖钰. 2014. “等熵思维”到“等熵位涡思维”回顾与讨论. 气象, 40(5): 521-529.

朱小祥,刘震坤,罗兵,等. 2014. 美国 AWIPSII 系统开发进展及业务应用. 气象科技合作动态, (S1): 1-30.

Baldauf M, Seifert A, Förstner J, et al. 2011. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. Mon Wea Rev, 139(2): 3887-3905.

Bennett A, Pearman I, Moseley S, et al. 2014. Met Office post-processing of operational NWP forecasts. World Weather Open Science Conference (WWOSC), Montréal, Canada. <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/wwosc/documents/ACB-WWOSC2014-v2.pdf>.

Bikos D, Daniel T L, Otkin J, et al. 2012. Synthetic Satellite Imagery for Real-Time High-Resolution Model Evaluation. Wea Forecasting, 27(3): 784-795.

Brunet G, Jones S, Mills B, et al. 2015. Chapter 1. Introduction. WMO-1156, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 311-330.

Bua W, Jascourt S. 2008. New NWP Training Course: Effective Use of NWP in the Forecast Process. The 2008 33rd Annual Meeting of the National Weather Association, Louisville, KY.

Buizza R. 2008. The value of probabilistic prediction. Atmos Sci Lett, 9: 36-42.

Christopher A D, Barbara G B, Brown R, et al. 2009. The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. Wea Forecasting, 24(5): 1252-1267.

Clark P, Roberts N, Lean H, et al. 2016. Convection-permitting models: A step-change in rainfall forecasting. Meteorol Appl, 23(2): 165-181.

Cui Bo, Toth Z, Zhu Yuejian, et al. 2012. Bias Correction for Global Ensemble Forecast. Wea Forecasting, 27(2): 396-410.

Daly C, Halbleib M, Smith J I, et al. 2008. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. Int J Climatol, 28(15):

- 2031-2064. DOI:10.1002/joc.1688.
- Dickman I R. 2002. NWS Eastern Region Interactive Forecast Preparation System (IFPS) Implementation. Preprints, Interactive Symp on the Advanced Weather Interactive Processing System (AWIPS), Orlando, FL, Amer Meteor Soc, 28-32.
- Ebert E E, Damrath U, Wergen W, et al. 2003. The WGNE assessment of short-term quantitative precipitation forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(4):481-492.
- Forbes, R, Haiden T, Magnusson L. 2015. Improvements in IFS forecasts of heavy precipitation, ECMWF Newsletter No. 144, 21-26.
- Frederic A. 1999. Tubing: An alternative to clustering for the classification of ensemble forecasts. *Wea Forecasting*, 14(5):741-757.
- Funk T W. 1991. Forecasting techniques utilized by the forecast branch of the national meteorological center during a major convective rainfall event, *Wea Forecasting*, 6(4):548-564.
- Gilbert K K, J P Craven, D R Novak, et al. 2015. An Introduction to the National Blend of global Models Project. Special Symposium on Model Postprocessing and Downscaling, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 3. 1.
- Grimt E P, Mass C F. 2002. Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Northwest Pacific. *Wea Forecasting*, 17:192-205.
- Haiden T, Rodwell M, Richardson D S, et al. 2012. Intercomparison of global model precipitation forecast skill in 2010/11 using the SEEPS score. *Mon Wea Rev*, 140(8):2720-2733.
- Hamill T M, Jeffrey S W, Mullen S L, et al. 2006. Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions. *Bull Amer Meteor Soc*, 87(1):33-46.
- Hamill T M, Bates G T, Whitaker J S, et al. 2013. NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(10):1553-1565.
- Harry R G, David P R. 2003. The new digital forecast database of the National Weather Service. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(2):195-201.
- Hewson T D, Helen A T. 2010. Objective identification, typing and tracking of the complete life-cycles of cyclonic features at high spatial resolution. *Meteor Appl*, 17(3):355-381.
- Hirschberg P A, Smith S B, Mercer M M. 2000. National Weather Service SAFESEAS - Update on a new marine/coastal monitoring and forecasting capability for AWIPS. Preprints, 16th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Long Beach, CA, Amer Meteor Soc, 128-131.
- Holm E, Forbes R, Lang S, et al. 2016. New model cycle brings higher resolution. ECMWF Newsletter, (147):14-19.
- Homar V, Stensrud D J, Levit J J, et al. 2006. Value of human-generated perturbations in short-range ensemble forecasts of severe weather. *Wea Forecasting*, 21(3):347-363. DOI: 10.1175/WAF920.1.
- Jackie Fenn, Mark Raskino. 2008. Mastering the Hype Cycle. How to Choose the Right Innovation at the Right Time. Brighton: Harvard Business Press.
- Lalaurette F. 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129:3037-3057.
- Legg T P, Mylne K R. 2004. Early warnings of severe weather from ensemble forecast information. *Wea Forecasting*, 19(5):891-906.
- Liao H S, Wu Y C, Chen L, et al. 2015. A visual voting framework for weather forecast calibration, IEEE Visualization Conference 2015, Chicago, 25-32.
- Liu J, Xie Z. 2014. BMA probabilistic quantitative precipitation forecasting over the Huaihe basin using TIGGE multimodel ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 142(4):1542-1555.
- Malardel S, N Wedi, W Deconinck, et al. 2016. A new grid for the IFS. ECMWF Newsletter, (146):23-28.
- Mansfield D A. 1996. The use of potential vorticity as an operational forecast tool, *Met Apps*, 3(3):195-210.
- Mass C F. 2003. IFPS and the future of the National Weather Service. *Wea Forecasting*, 18(1):75-79.
- Mass C F, Ovens D, Westrick K, et al. 2002. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The results of two years of real-time numerical weather prediction over the Pacific Northwest. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(3):407-430.
- Michael J B, Lackmann G M, Mahoney K M. 2008. Potential Vorticity (PV) thinking in operations: The utility of nonconservation. *Wea Forecasting*, 23(1):168-182.
- Michalakes J, Chen S, Dudhia J, et al. 2001. "Development of a next generation regional weather research and forecast model" in developments in teracomputing. In Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Singapore: World Scientific.
- Neal R A, Boyle P, Grahame N, et al. 2014. Ensemble based first guess support towards a risk-based severe weather warning service. *Met Apps*, 21:563-577.
- Neal R, Fereday D, Crocker R, et al. 2016. A flexible approach to defining weather patterns and their application in weather forecasting over Europe, *Met Apps*, accepted. DOI:10.1002/met.1563.
- Nielsen-Gammon J W, Strack J. 2000. Model resolution dependence of simulations of extreme rainfall rates. Preprints, 10th PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, Boulder, CO, PSU/NCAR, 110-111.
- Novak D R, Christopher B, Brill K F, et al. 2014. Precipitation and Temperature Forecast Performance at the Weather Prediction Center. *Wea Forecasting*, 29(3):489-504.
- Palmer T N. 2002. The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: From days to decades. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128:747-774.
- Rasmussen R, Dixon M, Hage F, et al. 2001. Weather Support to

- Deicing Decision Making (WSDDM): A winter weather nowcasting system. *Bull Amer Meteorol Soc*, 82(4):579-596.
- Rautenhaus M K, Schafer A M, Westermann R. 2015. Three-dimensional visualization of ensemble weather forecasts-Part 1: The visualization tool Met. 3D (version 1. 0). *Geosci Model Dev*, 8:2329-2353. DOI: 10.5194/gmd-8-2329-2015, 2015.
- Reynolds D. 2003. Value-added quantitative precipitation forecasts: How valuable is the forecaster? *Bull Amer Meteor Soc*, 84(7): 876-878.
- Roberts, W F, Cheatwood L K. 2005. Examples of GFESuite and D2D Use in Operations During 2004, 21st Int Conf on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanograp, San Diego, CA, Amer Meteor Soc.
- Roebber P, Shultz D M, Colle B A, et al. 2004. Toward improved prediction: High-Resolution and Ensemble Modeling Systems in operations. *Wea Forecasting*, 19(5):936-949.
- Roebber P J, Gehring M G. 2000. Real-time prediction of the lake breeze on the western shore of Lake Michigan. *Wea Forecasting*, 15(3):298-312.
- Ruth D P. 1992. The Systematic Interpolative Radial Search (SIRS)—A Method to Compute Gridpoint Values from Contours, TDL Office Note 92-14, U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, 16.
- Saito K, Fujita T, Yamada Y, et al. 2006. The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon Wea Rev*, 134(4):1266-1298.
- Schaake J, Henkel A, Cong S. 2004. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western US Preprints, 18th Conf. on Hydrology, Seattle, WA Amer Meteor Soc, CD-ROM, 5.
- Seity Y, Brosseau P, Malardel S, et al. 2011. The AROME-France convective-scale operational model. *Mon Wea Rev*, 139(3): 976-991.
- Sills D M L. 2009. On the MSC forecasters forums and the future role of the human forecaster. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(5): 619-627.
- Smith G. 2003. Flash flood potential: Determining the hydrologic response of FFMP basins to heavy rain by analyzing their physiographic characteristics. Rep. to the NWS Colorado Basin River Forecast Center, 11.
- Smith S B, Churma M, Roe J, et al. 2000. Flash Flood Monitoring and Prediction in AWIPS Build 5 and Beyond. Preprints, 15th Conf. On Hydrology, Long Beach, CA, Amer Meteor Soc, 229-232.
- Smith S B, S Goel, M T Filiaggi, et al. 1999. Overview and Status of The AWIPS System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN). Preprints, 15th International Conf. on IIPS, AMS, Dallas, 326-329.
- Stensrud D J, Brooks H E, Du J. et al. 1999. Using ensembles for short-range forecasting. *Mon Wea Rev*, 127:433-446.
- Stensrud D J, Yussouf N. 2007. Reliable probabilistic quantitative precipitation forecasts from a short-range ensemble forecasting system. *Wea Forecasting*, 22(1):3-17.
- Swinbank R, Kyouda M, Buchanan P, et al. 2015. The TIGGE project and its achievements. *Bull Amer Meteorol Soc*, 97(1): 49-67.
- Tang Y, Lean H, Bornemann J. 2013. The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection. *Meteorol Appl*, 20(4):417-426.
- Thaler E R, Nutter P. 2009. Moving Quasigeostrophic Theory into the 21st Century. Preprints, 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting, Amer Met Soc, Omaha, NE, 8B.3.
- Thomas M H. 2012. Verification of TIGGE Multimodel and ECMWF Reforecast-Calibrated Probabilistic Precipitation Forecasts over the contiguous United States, *Mon Wea Rev*, 140(7): 2232-2252.
- Toth Z, Szentimrey T. 1990. The binormal distribution: A distribution for representing asymmetrical but normal-like weather elements. *J Climate*, 3(1):128-136.
- Tracton M S, Kalnay E. 1993. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea Forecasting*, 8:379-400.
- Uccellini L W, Kocin P J, Sienkiewicz J M. 1999. Advances in forecasting extratropical cyclogenesis at the National Meteorological Center//The Life Cycles of Extratropical Cyclones. *Amer Meteor Soc*, 317-336.
- Wandishin M S, Mullen S L, Stensrud D J, et al. 2001. Evaluation of a short-range multimodel ensemble system. *Mon Wea Rev*, 129:729-747.