

定量降水预报技术研究进展

宗志平 代刊 蒋星

(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 定量降水预报(QPF)是天气预报最重要的业务之一。对21世纪以来QPF的国内外业务现状、集合概率预报技术、短时临近预报技术、检验技术以及订正技术等做了简要综述,初步总结了各类研究所取得的主要进展,包括:QPF准确率的稳步提高得益于数值模式的持续发展,以及预报员对于模式产品的应用订正能力的不断提高;以数值集合预报为基础的概率QPF(PQPF)为用户提供预报不确定性信息,是一种更为科学的天气预报形式;另外,数值模式的实时天气学检验及订正技术的发展为“增加预报员的附加价值”提供有力支撑。最后,提出了目前QPF研究存在的主要问题和需要加强的几个研究方向,分别是:(1)进一步加强数值模式对于大气水汽场的同化和模拟,采用新的模型来描述下垫面与边界层之间的水汽交换,以及大气中真实云和降水物理过程;(2)降水观测和预报的随机特点还没有被充分考虑,需要进一步研究不同时空尺度上的模式预报能力,发展有效的QPF订正技术方法;(3)对于PQPF还存在着理解上的困难和误区,如何将预报不确定性信息传递给用户需要进一步研究;(4)短时临近QPF应由雷达回波外推方法向结合数值模式预报的混合外推技术转变,提高对对流降水系统的预报能力;(5)针对传统的统计评分检验方法的不足,应引入新的QPF检验技术方法,但新方法的解释应用还需不断地积累经验。

关键词: 定量降水预报, 集合预报, 检验, 预报业务

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.05.004

The Research Progress of Quantitative Precipitation Forecast

Zong Zhiping, Dai Kan, Jiang Xing

(National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Quantitative precipitation forecast (QPF) is one of the most important operations in weather forecast. A brief overview is made for current domestic and foreign operational situation and techniques of ensemble probability forecast, short-term forecasting and nowcasting, verification methods and error corrections. Preliminary conclusions have been made for some research progress, the improvement of QPF accuracy comes from the development of numerical models and the improvement of correction capability for the application of numerical model productions. Based on the numerical ensemble forecast, the probability QPF (PQPF), as a more scientific weather forecast method, can provide us with uncertainty forecasting information. Moreover, the improvement of real-time synoptic verification and error correction method of numerical model products provide strong support for 'adding forecasters additional value'. Finally, based on this summary of progress, main problems and research fields of QPF research have been introduced. (1) Further strengthening the capability of moisture data assimilation and simulation, using a new model to describe the moisture exchange between land surface and boundary layer and cloud and precipitation physical Processes. (2) Precipitation observation and forecast's random characteristics have not been considered sufficiently yet, the numerical forecast capability of different spatial and temporal scales and QPF correction methods should be made a close study of. (3) It should be considered how to deliver forecast uncertain information to users due to misunderstanding the meaning of PQPF. (4) The techniques of short-term and nowcasting QPF should be exchanged from radar extrapolation to mixed extrapolation combined with numerical model forecast for improving convective precipitation forecast capability. (5) Based on the shortcoming of traditional statistical methods, new verification methods for QPF should be introduced, but objective explanation and application of the new method takes time to gather experiences.

Keywords: quantitative precipitation forecast (QPF), ensemble forecast, verification, operational forecast

1 引言

强降水引发的洪涝灾害是我国最严重的气象灾害之一。据统计,1990年以来因暴雨洪涝造成的年均

直接经济损失达1200多亿元;1998年长江流域大洪水造成受灾人口超过1亿人,死亡1800多人,经济损失1500多亿元。因此,做好定量降水预报(QPF)是天气预报的最重要业务之一。

近些年来,随着观测系统和预报技术的发展,定量降水业务预报取得长足的进展,主要表现在:随着数值模式时空分辨率的不断提高,以及模式物理过程

收稿日期:2012年5月31日;修回日期:2012年7月6日
 第一作者:宗志平(1974—),E-mail:zongzp@cma.gov.cn
 资助信息:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906001、GYHY201006010-2)

的不断改进, QPF业务在向更高时空分辨率、更长预报时效、更高预报准确度迈进; 以集合预报为基础的概率QPF (PQPF) 的出现, 提供了一种更为科学的天气预报形式, 也得到了越来越广泛的应用; 短时临近QPF预报技术的发展, 支撑着极端强降水灾害预警的及时发布; 另外, 数值模式的实时天气学检验及订正技术的发展, 以及预报员对于模式过程的深入理解和产品的应用经验累积, 为“增加预报员的附加价值”提供了有力支撑。尽管如此, QPF预报精细化及准确率离用户的需求还有较大的差距。如在水文预报中, 要求QPF的空间和时间分辨率分别达到10km和1h, QPF准确度也要达到10%以上^[1, 2]。而目前的QPF还没有达到这些要求。

本文对21世纪以来QPF的国内外业务现状、集合概率预报技术、短时临近预报技术、检验技术以及订正技术等方面的工作进展作了简要综述, 并在此基础上提出了目前QPF研究存在的主要问题和需要加强的几个研究方向, 以及中央气象台QPF业务的发展思考。

2 定量降水预报的业务进展

2.1 国外定量降水预报业务进展

从1960年开始, 美国国家环境预报中心(NCEP) 下属的水文气象预报中心(HPC) 率先实施QPF以及深入的QPF检验方案。经过多年的努力, 制作QPF产品过程已经从一个依靠广泛预报经验的人工方法演变到更多依靠对数值模式的解释和订正, 以及对集合预报产品应用的过程。

目前, HPC每天定时发布未来72h时效内逐6h累积QPF、未来72h时效内逐24h累积QPF、未来第4~5d的48h累积QPF、未来5d累积QPF、未来3~7d的日降水概率等产品。2011年1月开始试验第4~5d逐6h QPF, 2011年4月开始业务化运行PQPF业务。为了制作这些产品, 预报员首先在N-AWIPS (NCEP Advanced Weather Interactive Processing System) 平台上按照制作规范绘制降水量等值线(1.5in^①以上间隔等雨量线都为1in间隔), 然后通过数学插值方法形成空间分辨率为32km的格点QPF。预报员绘制等值线时, 综合参照了定量降水估测产品(QPE)、卫星云图及其他观测资料, 在数值模式产品检验订正的基础上, 结合自己的预报经验和专业知识。在制作PQPF时, 主要参考依据是确定性预报(包括GFS, NAM, ECMWF等) 以及NCEP短期集合预报系统(SREF) 构成的多模式集成预报产品, 从中提取降水的概率预报, 用于获取QPF预报的不确定性信息。

HPC对其QPF产品进行检验评估表明, 预报准确率

稳定提高(图1), 尤其是较长时效的24~60h的预报提高得更明显^[3, 4]。至2012年, HPC通过集合预报产品的应用、格点化技术的发展以及订正预报平台的改进, 提高了7d内强降水预报准确率, 并使格点预报产品空间分辨率降低到32km。在未来的计划中, HPC希望通过进一步提高数值模式性能和分辨率, 改进快速更新同化分析与预报以及各专业客观预报方法, 不断升级业务系统平台, 使预报准确率不断提高、预报产品更加精细、预报时效不断延长。QPF预报准确率将比模式产品技巧提高10%, 水平分辨率从32km提高到2.5km。

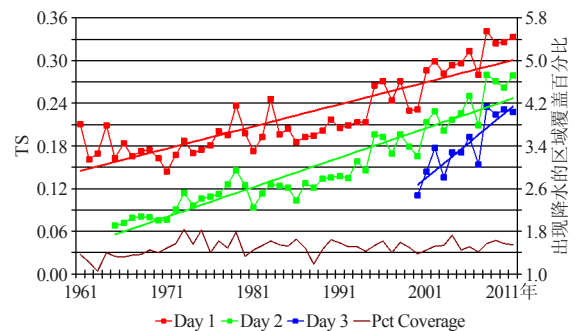


图1 1960—2011年美国水文气象预报中心(HPC) 1in以上降水TS评分

2.2 国内定量降水预报业务

国内的QPF业务主要由中央气象台负责, 其QPF业务产品包括未来24h时效内逐6h累积QPF、未来168h时效内逐24h累积QPF, 以及旬降水量预报、过程降水量预报等特色QPF产品。从2011年开始, 24h时效内6h累计的QPF格点化产品业务也在预报业务中正式开展。为了制作上述QPF产品, 中央气象台已经建立了以多种观测资料和数值天气预报为基础, 综合应用多模式集成预报、集合概率预报、配料法强降水等级预报等多种方法, 充分利用天气系统和物理量检验订正、降水预报格点化等多种技术手段的精细化QPF业务技术框架。

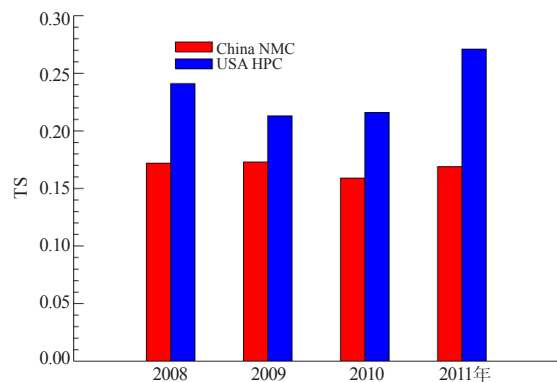


图2 2008—2011年中央气象台与美国水文气象中心的24h暴雨的年平均TS对比

① 1in=25.4mm, 下同

中央气象台的QPF预报准确率逐年稳步提高,如1999年的暴雨年平均预报评分约为0.050,至2011年达到0.169,预报准确率提高了约70.4%。但与发达国家相比还存在一定的差距。对比中央气象台与美国水文气象中心2008—2011年的24h暴雨的年平均TS评分(图2),表明平均差距在0.067左右。由于检验区域和检验方法的不同,该比较还存在不确定性,但从科学研究、支撑技术和业务运行的整体来看,我国的QPF业务水平还落后于发达国家,问题主要表现在:

(1) 降水预报没有实现真正定量化,精细化水平有待提高。目前,中央气象台的QPF产品仍以等值线落区预报为主,精细化程度仍不高。同时预报系统平台建设跟不上预报业务快速发展的需求,自动化程度不高,格点化等关键技术尚未取得实质性突破。

(2) 预报员对数值模式的特征(包括优点和缺点来源)了解不足,缺少对数值预报深入、长时序的检验和分析,且尚无客观定量化的订正方法和指标,相比美国HPC,对数值模式订正能力不足。同时,从事QPF业务的预报员越加年轻化,预报经验处在积累、提高之中。

(3) QPF预报仍以全球确定性数值模式为主要参考依据,缺少中尺度模式和集合预报模式的支持。虽已在业务中逐步开始应用集合预报,但其统计后处理技术、业务平台建设都处于起步中。多模式动态权重集成、“配料法”等客观技术已取得一定的成果,但仍需要不断完善。

(4) 数值模式低层水汽场的预报、地形或城市化对降水的影响、暖区降水的定量预报等关键技术难题仍没有解决,也是制约降水预报尤其是极端降水预报准确率提升的关键因素。

(5) 很多省级台站没有设置QPF业务,暂时还无法形成中央台指导—地方台订正反馈的全国统一QPF的业务体系。

针对上述问题,结合发达国家QPF业务发展经验,中央气象台制定了如下QPF业务的发展思路:以《现代天气业务发展指导意见》为指导,围绕提高预报准确率和精细化,以在数值模式基础上增加附加值为核心,以较为完善的多源资料显示、分析、加工,格点化制作的专业化业务平台为基础,以数值模式检验订正技术、集合预报产品统计后处理技术、动力和统计相结合的数值预报产品释用技术为支撑,通过对预报员专业化能力的培养,提高QPF的精细化和准确率。

中央气象台未来三年QPF业务的具体发展目标为:发布1~5d 24h间隔格点化QPF,0~24h时效的6h间隔格点化QPF;客观制作并发布6~7d逐日QPFF;

1~5d 24h间隔格点化QPF,相比数值模式预报有正技巧,大雨、暴雨技巧稳步提高;至2015年暴雨1和2d的预报准确率分别要达到18%和15%,比目前提高近5%。

3 定量降水预报的数值预报技术进展

3.1 数值预报系统对 QPF 业务支撑

Olson等^[5]指出QPF业务准确率的稳步提高主要得益于数值模式预报能力的提高。至2012年,HPC预报员能够参考到包括美国全球确定性(GFS)和集合(GEFS)数值预报产品、北美区域确定性(NAM)和集合(NAEFS)数值预报产品、短期集合数值预报产品(SREF)RUC产品(2012年5月开始被RAP替代)等,其余全球数值预报产品包括UKMET(英国气象局提供)、ECMWF(欧洲中期天气预报中心提供)、CMC(加拿大气象局提供)等。HPC预报员对于12h时效内的QPF,主要预报依据是实况资料,数值预报为辅;对于大于12h时效的,则以数值模式预报为主。

在我国,从2007年底开始业务运行的T639模式在空间分辨率、初始场同化技术、空间分辨率、台风Bogus技术、产品丰富性等方面都较T213有长足的进步,有力地保障了QPF业务的发展。此外,ECMWF、NCEP、日本、德国等国家或机构的模式产品在中央气象台QPF业务中也得到充分应用;T213集合模式、ECMWF集合模式预报产品也在发挥越来越重要的作用。

3.2 数值模式 QPF 产品的释用技术

目前世界上几大业务中心都开展了降水产品的客观统计系统误差订正业务,如NCEP利用模式输出统计方法(MOS)方法^[6]对站点的降水订正,以及采取简单的Kalman滤波对格点产品订正。目前NCEP的MOS客观预报,从过去站点预报已发展到格点预报,提供美国及周边地区的2.5km分辨率和阿拉斯加地区3km分辨率产品;格点MOS预报从7d提高到14d,预报准确率比模式提高10%,发布频率从1次/d提高到4次/d,水平分辨率从5km提高到2.5km。

基于“配料法”的强降水等级预报近年来在国外发展较快,已经处于业务应用阶段。配料法的核心思想是依据预报量和指示量之间的物理联系来建立相应的预报方程,而不是简单地依赖于回归分析。按照配料法原理而建立的预报方程具有清晰的物理意义,有利于将新的研究成果引入预报模型。该方法最早由Doswell^[7]引入气象研究,并成功地运用于暴洪(Flash flood)预报。我国对“配料法”的研究和应用起步较晚^[8,9]。近2年,湖北省气象局在大量暴雨个例物理

量统计基础上建立的强降水“配料法”也取得较大进展，在数值模式基础上有效提高了暴雨预报准确率。

中央气象台开展了多模式动态权重集成定量降水预报业务，该方法依据预报员的预报思路，考虑不同模式预报之间雨带形状和降水强度的相似，采用动态权重集成。既考虑了各模式成员总体的差异性又考虑了降水的概率分布，对提高极端天气事件的预报准确率有一定效果。该方法与MOS统计方法相比，不依赖于历史资料，实现方便快捷；与集成平均方法相比提高了对极端降水的预报能力。从TS评分和实况对比检验来看，该方法总体上好于单个模式（图3）。

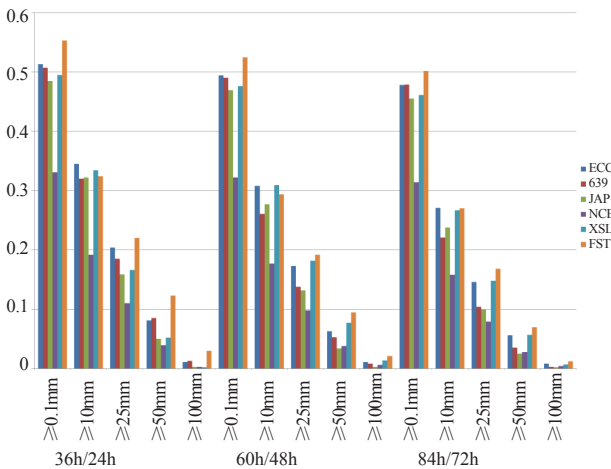


图3 2010—2011年6—8月24~72h时效24h多模式集成降水预报与各模式及预报员评分对比

4 定量降水的集合预报技术进展

概率预报可以描述天气预报的不确定性，符合大气运行规律，是更科学的一种天气预报形式。集合预报的出现，极大地推动了概率预报的发展。集合预报系统能够提供比单一控制或确定性模式更高的预报技巧，而集合能够增加长预报时效的预报精度^[10, 11]。同时，基于集合模式的概率预报比单值预报更具有一致性^[12]。

目前，许多国家的预报中心都发展了全球或区域的集合预报系统。如美国NCEP/EMC已经建立了包括超短期集合预报系统（NCEP Very Short Range Ensemble Forecast System, VSREF）、短期集合预报系统（Short-range ensemble forecast, SREF）、全球集合预报系统（Global ensemble forecast system, GEFS）和北美集合预报系统（North American ensemble system, NAEFS）等无缝隙的集合预报体系。欧洲中期天气预报中心（ECMWF）从1992年开始建立的中期集合预报系统^[13]，目前已经发展成为采用奇异向量初值扰动技术，有51个集合成员的全局集合预报系统；加拿大、英国、日本、澳大利亚等国也相继建立本国的业

务应用的集合预报系统。2005年底，国家气象中心建立在全球T213 L31模式基础上的全球集合预报系统开始投入实时运行。

面对海量的集合预报数据，方便、高效、功能齐全的集合预报业务平台是必不可少的。英国气象局发展了PREVIN（Predictability Visualization）系统^[14]，该系统能够进行“面条图”、“邮票图”、预报场聚类、气旋路径、概率密度函数、概率预报时序图以及概率检验等产品的显示与操作。Kristin等^[15]发展了一个集合预报数据统计可视化框架Ensemble-Vis，该框架能够帮助预报员从集合预报的概率分布当中获得关键的因子。中央气象台也开发了“集合预报工具箱”，涵盖了“邮票图”、“面条图”、“胡须图”、集合平均及离散度、集合概率预报、集合概率匹配平均、集合概率百分比预报、集合中位值/最大值/最小值等多种集合产品的显示及操作，概率匹配集合平均产品对集合预报平均也有较好的改进效果。

由于集合预报不正确的“集合离散度—可预报性”关系^[16]，以及集合成员个数的不足^[17]，还有集合成员之间的非独立性^[18]，都会给集合预报带来偏差。因此，针对QPF集合预报的统计后处理技术近年来发展很快，如Sloughter等^[19]基于贝叶斯集合平均技术制作PQPF产品；Yuan等^[20]利用人工神经网络的方法订正PQPF；Glahn等^[21]发展的集合核密度模式输出统计EKDMOS方法，是对传统MOS方法的改进；Cui等^[22]发展了针对NAEFS的统计后处理技术，包括偏差订正和统计降尺度方法。

5 短时临近定量降水预报技术进展

对于短时强降水的有效预报主要依靠短时临近QPF业务技术的发展，这里短时临近预报主要是指0~6h时效的预报。1954年，Ligda^[23]首先提出外推雷达回波作为短时临近降水预报的基础，其后的二十多年中，随着计算性能的提升，各种各样的外推方法被发展出来，这在Wilson等^[24]的综述性文章中有较详细的讨论。在20世纪80年代，业务“临近预报”系统开始建立，较有名的如英国气象局的“Nimrod”系统^[25]，其主要的创新性在于将雷达回波外推技术和数值模式降水预报产品相结合，延长了预报时效，是目前短时临近QPF的主要发展方向。之后，2000年悉尼和2008年北京奥运会的短时临近预报示范项目有效促进了业务“临近预报系统”的发展。中国气象局2008年启动了业务建设项目“灾害天气短时临近预报预警业务系统建设与改进”，开发具有自主知识产权的灾害天气短时临近预报系统（Severe Weather Automatic Nowcast System, SWAN），为我国的短时临近QPF业

务提供了支撑。

外推技术的发展主要得益于计算技术方法的改进,然而该技术仍然是线性和确定性的,因此需要进一步研究如下问题:首先要认识到降水系统在所有时间尺度上的非线性特征,并要在预报中反映该特征;其次,预报员需要了解该技术的限制和不确定性;第三,由于对流系统的生命周期较短,为了增加预报时效,需要预报对流系统的初生及其发展和移动,这也是目前研究的活跃领域。

随着数值模式的时空分辨率不断提高,基于雷达观测的短临预报与传统的数值预报结合更加紧密,已经从同化雷达资料延伸到利用模式输出场来指示短临预报中对流系统的初生、发展和移动。比如Moszkowiz^[25]利用实时雷达观测来检验模式预报的准确性,如果模式表现一定的预报技巧,则可以假定模式预报能被用于短临预报。英国气象局利用Nimrod系统^[26]来融合雷达临近预报和数值模式预报产品,主要概念是利用模式风场来调整雨区的外推。Terada等^[27]将山区降水分解为地形降水和非地形降水两个分量,其中地形降水分量采用模式风场外推,而非地形降水分量采用雷达观测外推。

6 定量降水预报的检验订正技术进展

6.1 定量降水预报的检验技术

传统的点对点统计检验评分方法非常直观,易于理解,并得到长期的使用。然而,随着数值模式空间分辨率的不断提高,“双惩罚”现象突显出来^[28]。如一个数值模式预报雨带位置偏移了半个波长,而另一个模式没有报出雨带位置,则前一个模式在计算统计评分的时候会惩罚两次。

针对传统检验方法的缺陷,过去10年,基于空间分析的检验新方法得到快速发展。传统的点对点的检验方法已经发展到面对面、多尺度的对比检验。基于空间分析的检验方法大致可以划分为空间滤波对比和空间移动对比两类。空间滤波对比方法如:领域对比方法^[29]和尺度分离对比方法^[30]。空间移动对比方法如:基于“视觉流场”的形变对比检验方法^[31]和基于特征属性的对比方法^[32, 33]。

随着集合概率预报的出现和应用,对于集合概率预报产品的检验也变得更加重要。集合概率预报检验方法可以划分为三种类型:(1)用于检验集合分布是否属于某个概率分布函数的方法,包括排列直方图^[34, 35]、连续排列概率评分^[36]、相对技巧评分、最小生成树(MST)^[37-39]、边界框^[40];(2)用于评估概率预报的概率密度函数的方法,如无知评分^[41, 42]、Wilson概率评分^[43];(3)事件概率预报检验方法,如

Breier评分^[44]、Breier技巧评分^[45]、可靠性曲线^[46-48]、受试者工作特征曲线ROC^[49, 50]、排列概率评分^[51]和相对排列概率技巧评分。

此外,还有极端天气事件的检验技术也得到应用,如袭击率评分被广泛用于极端事件的检验^[52];Schaefer^[53]研究表明当事件变得稀少时相当袭击评分收敛于袭击率评分;Doswell等^[54]工作表明当正确的拒绝事件数量更大时,Peirce技巧评分收敛于袭击率评分;Stephenson等^[55]发展了一个简单的极端事件渐近模型。

考虑到检验的重要性,许多国家的气象部门和研究机构都在尝试建立起自己的数值模式检验业务系统和平台,如美国水文气象预报中心的数值模式诊断与检验系统,澳大利亚气象局的“RAINVAL”定量降水检验系统,NCAR研究应用实验室(RAL)开发的“Model Evaluation Tools”,以及NOAA地球系统研究实验室针对航空气象建立的“Real Time Verification System”。

6.2 定量降水预报的订正技术

Reynolds^[4]给出了1993—2001年间预报员较NCEP全球AVN模式和区域Eta模式的QPF预报TS评分提高百分比(图4),可以发现,20世纪90年代早期至中期,预报员提高率为30%,至中后期下降至20%左右;结合预报评分趋势分析,预报员将数值模式的预报水平提升了14a左右。统计2008—2011年中央气象台的预报员QPF预报的暴雨TS评分提高百分比,范围也在20%~30%之间。因此,预报员在数值模式基础上所体现的附加值是可观的。

在美国HPC,面对众多的模式产品,预报员已经形成了依靠多年数值预报经验,在仔细进行多模式对比分析检验的基础上评估、订正模式产品的习惯,预报员侧重于模式输出的天气概念模型识别、天气尺度和中尺度分析以及水汽、抬升、不稳定性等降水形成要素分析,而不是单纯依赖于模式降水预报场。中央

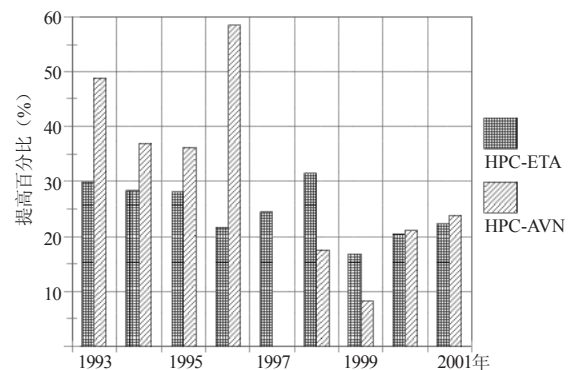


图4 HPC预报员较NCEP业务模式的QPF预报评分提高百分比^[4]

气象台的预报员也越来越认识到数值模式检验订正的重要性,通过业务流程调整来增加预报员检验订正的时间,从2008年开始设立“数值模式天气学检验”业务岗位,每日发布《数值模式天气学检验公报》以支撑预报员对于模式的应用和订正。

除了强调预报员对于模式订正的经验积累之外,近年一系列的主客观订正技术也发展起来。如英国用位涡守恒原理实现了对天气形势场的订正技术^[56],通过人机交互方式改变某高度层次的天气系统的位置或强度,其他各层相应的形势场、物理量也相应改变,并且投入了业务运行;邵爱梅等^[57]提出用变分方法修正数值天气预报高度场的非系统性误差,取得了一定进展;HPC的预报员在综合分析GFS, NAM, ECMWF, UKMET以及集合模式预报产品的性能后,赋予每个模式不同的权重,利用Master Blender系统自动生成等值线产品,并加以简单修改并确定天气系统、降水落区和性质。

Reynolds^[4]指出,随着模式更新频率的加快,预报员越加难以掌握模式预报的系统偏差,因此依靠预报员的模式使用经验来增加附加值变得越加困难。但是模式的初始条件误差、模式动力和计算误差、物理参数化误差等问题始终存在,因此只有依靠预报员的天气概念模型、对模式物理过程的深入理解、实时高效的模式检验评估系统、方便快捷的模式订正系统来获得预报员的附加值。

7 存在的问题及讨论

定量降水预报在气象科技工作者的努力下,在理论方法和实际应用方面都取得了进步与发展。但也应该看到,目前,定量降水预报的精细化和准确率程度离用户需求还有较大差距,以下几个方面研究还需进一步加强。

(1) 利用现代化观测手段和技术减小数值模式中大气水汽场和动力场的初始条件的误差。进一步加强数值模式对于大气水汽的同化和模拟,采用新的模型来描述下垫面与边界层之间的水汽交换,以及大气中真实云和降水物理过程。进一步提高数值模式的预报精度。

(2) 对降水观测和预报的随机特点还没有充分考虑,预报员需要进一步研究不同时空尺度上的模式预报能力,发展有效的QPF订正技术方法。

(3) 短时临近QPF应由雷达回波外推方法向结合数值模式预报的混合外推技术转变,并提供短临预报的不确定性信息,提高对对流降水系统的预报能力。加强预报员对各种非常规观测资料的实时综合分析能力,也是提高短时临近QPF的重要途径。

(4) 对于集合概率预报产品PQPF,用户还存在着理解上的困难和误区,如何将预报不确定性信息传递给用户需要进一步研究。

(5) 针对传统的统计评分检验方法的不足,应引入新的QPF检验技术方法,但新方法的解释应用还需不断地积累经验。

8 中央气象台QPF业务发展思考

首先需进一步提高QPF的精细化水平。未来3~5年,中央气象台将把目前仍以降水落区预报为主的QPF发展为格点化的QPF,并逐步延长到120h时效,实现120h时效内任意时效的累加;逐步实现24h间隔降水预报的格点化;同时大力发展PQPF。

其次,进一步提高QPF准确率。对于短期或更长时效的QPF准确率的提高在很大程度上依赖于数值模式的进步,从模式的资料同化、初始场、云物理过程、水循环模拟等方面改进模式预报,进而改善定量降水预报效果。同时需要加强QPF客观订正技术方法研究,主要包含:数值模式偏差检验技术,多模式集成预报技术改进,集合预报的不确定性信息在QPF中的应用,考虑地形高度、坡度和下垫面等地理信息因子影响的格点插值技术等。

总体而言,定量降水预报发展主要基于数值模式的进步,同时也基于预报员对于天气系统识别、概念模型建立和降水机制的理解,以及对于数值预报产品的解释应用能力的提高。

参考文献

- [1] Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. *J Hydrol*, 2002, 260: 216-230.
- [2] Zehe E, Becker R, Bardossy A. The influence of spatial variability of soil moisture and precipitation on runoff production. Presentation at the International Workshop on Catchment scale Hydrologic Modeling and Data Assimilation, Wageningen, 2001.
- [3] David A O, Norman W J, Brian K. Evaluation of 33 Years of Quantitative Precipitation Forecasting at the NMC. *Wea Forecasting*, 1995, 10: 498-511.
- [4] Reynolds D. Value-added quantitative precipitation forecasts: How valuable is the forecaster? *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 876-878.
- [5] Olson D A, Junker N W, Korty B. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC. *Wea Forecasting*, 1995, 10: 498-511.
- [6] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 1203-1211.
- [7] Doswell C A. Flash flood forecasting: An ingredient-based methodology. *Wea Forecasting*, 1996, 11: 560-581.
- [8] 唐晓文, 汤剑平, 张小玲. 基于业务中尺度模式的配料法强降水定量预报. *南京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 277-283.
- [9] 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 基于“配料”的暴雨预报. *大气科学*, 2010, 34(4): 754-764.
- [10] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1999, 125: 2887-2908.
- [11] Demeritt D, Cloke H, Pappenberger F, et al. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting.

- Environ Hazards, 2007, 7: 115–127.
- [12] Buizza R. The value of probabilistic prediction. *Atmos Sci Lett*, 2008, 9: 36–42.
- [13] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 73–119.
- [14] Legg T P, Mylne K R, Woolcock C. Use of medium-range ensembles at the Met Office I: PREVIN–A system for the production of probabilistic forecast information from the ECMWF EPS. *Met Apps*, 2002, 9: 255–271.
- [15] Kristin P, Andrew W, Bremer P T, et al. Ensemble-Vis: A framework for the statistical visualization of ensemble data. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops*, 2009.
- [16] Gneiting T, Raftery A E. Weather forecasting with ensemble methods. *Science*, 2005, 310: 248–249.
- [17] Atger F. Spatial and interannual variability of the reliability of ensemble-based probabilistic forecasts: Consequences for calibration. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 1509–1523.
- [18] Eckel F A, Walters M K. Calibrated probabilistic quantitative precipitation forecasts based on the MRF ensemble. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 1132–1147.
- [19] Sloughter J M, Raftery A E, Gneiting T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 3209–3220.
- [20] Yuan H, Gao X, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. *Wea Forecasting*, 2007, 22: 1287–1303.
- [21] Glahn H R, Peroutka M, Wiedenfeld J, et al. MOS Uncertainty Estimates in an Ensemble Framework. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 246–268.
- [22] Cui B, Toth Z, Zhu Y J, et al. Bias Correction for Global Ensemble Forecast. *Wea Forecasting*, 2012, 27: 396–410.
- [23] Ligda M G. The horizontal motion of small precipitation areas as observed by radar. Technical Report 21. Cambridge, Massachusetts: MIT, 1953.
- [24] Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2079–2099.
- [25] Moszkowicz S. Verification of NWP model rain evolution using radar data and its application to the rainfall nowcasting. Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, 2004.
- [26] Golding B W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteorological Applications*, 1998, 5: 1–16.
- [27] Terada M, Kataoka K, Ikebuchi S, et al. The development of short-term rainfall prediction system in mountainous region by the combination of extrapolation model and meso-scale atmospheric model. Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, 2004.
- [28] Rossa A, Nurmi P, Ebert E. Overview of methods for the verification of quantitative precipitation forecasts. In Michaelides S. *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*, 2008: 417–450.
- [29] Ebert E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorological Applications*, 2008, 15: 53–66.
- [30] Briggs W M, Levine R A. Wavelets and field forecast verification. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 1329–1341.
- [31] Hoffman R N, Liu Z, Louis J F, et al. Distortion representation of forecast errors. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 2758–2770.
- [32] Davis C, Brown B, Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 1772–1784.
- [33] Davis C, Brown B, Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 1785–1795.
- [34] Anderson J L. A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations. *Journal of Climate*, 1996, 9: 1518–1530.
- [35] Hamill T M. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 550–560.
- [36] Hersbach H. Decomposition of the continuous rank probability score for ensemble prediction systems. *Wea Forecasting*, 2000, 15: 559–570.
- [37] Smith L A. Disentangling uncertainty and error: On the predictability of nonlinear systems. //Mees A I. *Nonlinear Dynamics and Statistics*. Boston: Birkhäuser, 2001: 31–64.
- [38] Smith L A, Hansen J A. Extending the limits of forecast verification with the minimum spanning tree. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1522–1528.
- [39] Wilks D S. The Minimum Spanning Tree (MST) histogram as a verification tool for multidimensional ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1329–1340.
- [40] Weisheimer A, Smith L A, Judd K. A new view of forecast skill: Bounding boxes from the DEMETER ensemble seasonal forecasts. *Tellus*, 2004, 57(3): 265–279.
- [41] Good I J. Rational decisions. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological*, 1952, 14: 107–114.
- [42] Roulston M S, Smith L A. Evaluating probabilistic forecasts using information theory. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 1653–1660.
- [43] Wilson L J, Burrows W R, Lanzinger A. A strategy for verification of weather element forecasts from an ensemble prediction system. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 956–970.
- [44] Brier G W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon Wea Rev*, 1950, 78: 1–3.
- [45] Murphy A H. A new vector partition of the probability score. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, 12: 595–600.
- [46] Hsu W R, Murphy A H. The attributes diagram—A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts. *International Journal of Forecasting*, 1986, 2: 285–293.
- [47] Smith L A. The maintenance of uncertainty. *Proceedings International School of Physics “Enrico Fermi”*, Course CXXXIII. Bologna: Societa Italiana di Fisica, 1997: 177–246.
- [48] Brocker J, Smith L A. Increasing the reliability of reliability diagrams. *Wea Forecasting*, 2007, 22(3): 651–661.
- [49] Mason I. A model for assessment of weather forecasts. *Australian Meteorological Magazine*, 1982, 30: 291–303.
- [50] Swets J A, Pickett R M. *Evaluation of Diagnostic Systems: Methods from Signal Detection Theory*. New York: Academic Press, 1982.
- [51] Epstein E S. A scoring system for probability forecasts of ranked categories. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8: 985–987.
- [52] Gilbert G K. Finley’s tornado predictions. *American Meteorological Journal*, 1884, 1: 166–172.
- [53] Schaefer J T. The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea Forecasting*, 1990, 5: 570–575.
- [54] Doswell C A, David J R, Keller D L. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Wea Forecasting*, 1990, 5: 576–585.
- [55] Stephenson D B, Casati B, Ferro C, et al. The extreme dependency score: A non-vanishing score for forecasts of rare events. *Meteorological Applications*, 2008, 15: 41–51.
- [56] Carroll E B, Hewson T D. NWP Grid Editing at the Met Office. *Wea Forecasting*, 2005, 20: 1021–1033.
- [57] 邵爱梅, 希爽, 邱崇践. 修正数值天气预报的非系统性误差的变分方法. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(2): 235–244.