

雷暴尺度天气集合数值预报研究

孔凡铀

(俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心, 诺曼 73072, 美国)

摘要: 集合数值天气预报目前是全球中期业务数值预报的核心支柱, 在区域性短期天气预报中集合预报也已有广泛业务应用。中小尺度灾害性对流天气过程具有强烈非线性特征以及更为复杂的湿微物理过程, 加上极高的空间和时间分辨率要求, 其数值模式预报面临更大的不确定性及挑战。延展集合预报技术到雷暴天气尺度也就成为自然合理的选择。故此, 对雷暴尺度天气集合数值预报所面临的科学问题、主要构造技术、研究现状、仍存在的问题及挑战等做了力所能及的综述和讨论。

关键词: 集合预报, 雷暴, 数值预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.004

A Study of Storm-Scale Ensemble Forecast

Kong Fanyou

(Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, Norman 73072, USA)

Abstract: Ensemble numerical weather prediction plays essential roles to medium-range weather forecast, and also becomes more popular in regional short-range weather forecast. Since hazardous convection weather systems have very high nonlinearity, complex moist microphysics processes, and very high temporal and spatial variation, the numerical prediction for such events are more challenged. It is thus more desire to employ ensemble technique to storm-scale weather prediction. This paper reviews key scientific questions, ensemble technique used, current status, main challenges and problems faced in storm-scale ensemble forecast.

Keywords: ensemble forecast, thunderstorm, numerical prediction

0 引言

现代气象预报的重要手段之一是运用建立在复杂数理基础上的数值天气模式以及各种常规和遥感技术获取的巨量观测资料通过大规模超级计算机产生的数值天气预报。由于大气运动及天气过程所固有的随机混沌特性, 任何微小的观测资料误差及模式本身误差所带来的不确定性均会导致基于单一数值模式的未来时段的天气预报产生偏差。预报的未来时效越长, 偏差就会越大。集合数值预报是提高天气过程可预报性的有效途径。集合数值预报技术就是同时运行若干个(通常是10~20个)略有不同的数值预报。各个预报可以是基于不同数值模式或是加上具有微小扰动的不同初始大气条件或是不同启动时间或同一模式不同的物理参数化配置等。最后通过对这些预报进行数学处理并提取出已计入各种由观测误差、分析误差、数值模式本身及物理参数化误差所带来的预报不确定性影响, 能更加准确描述未来天气过程的概率分布预报,

大幅提高数值天气预报的可靠性, 尤其是对各种突发灾害性天气过程的预报可靠性。

集合数值天气预报是目前世界各主要气象预报中心6~10 d全球中期业务数值预报的核心, 如欧洲中期天气预报中心(ECMWF), 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属美国国家环境预报中心(NCEP)、日本气象厅(JMA)、英国气象局(UKMO)等^[1-4]。在区域性1~3 d短期天气预报中集合预报也已有广泛业务应用^[5-6], 如NCEP的短期集合预报系统(Short-Range Ensemble Forecast, SREF)^[7]。这些全球中期集合预报系统以及区域短期集合预报系统所用的水平网格距在十几到几十千米, 远不能分辨对流性天气过程, 预报模式一般采用积云参数化来处理大气对流运动与大尺度天气环流间的热力动力交互作用及降水过程。研究发现提高模式水平分辨率对提高降水预报准确性尤其有帮助^[8-10]。与天气尺度系统误差增长主要受斜压扰动控制不同, 对流尺度系统的误差增长还同时受到潜热及湿对流不稳定性控制。一方面, 准确预报预警与深对流过程相伴的灾害性天气如龙卷、冰雹、雷电、洪水、大

收稿日期: 2017年10月17日; 修回日期: 2018年3月22日
第一作者: 孔凡铀(1957—), Email: fkong@ou.edu

风等是民生及经济的迫切需要。另一方面，由于中小尺度灾害性对流天气过程具有强烈非线性特征以及更为复杂的湿微物理过程，加上极高的空间时间分辨率要求，其数值模式预报面临更大的不确定性及挑战。延展集合预报技术到雷暴天气尺度也就成为自然合理的选择。这方面的研究始于约十几年前，在近几年开始逐渐得到强化，国际气象界对风暴尺度集合预报前景展现出极大兴趣^[11-13]。雷暴尺度集合预报一般指模式水平网格距不超过5 km的集合数值天气预报系统。在这样高的网格分辨率下，数值模式一般不再采用积云参数化方案，而是采用不同复杂程度的微物理方案直接显式处理云内微物理过程。文献中将3~5 km水平网格距预报系统又称为“对流许可”模式系统（convection-allowing model, CAM；亦有用convection-permitting model），而把1 km及更高分辨率（几百米）预报系统称为“对流可分辨”（convection-resolving）。本文讨论涉及的主要是具有CAM分辨率的雷暴尺度集合预报系统。

欲开展雷暴尺度集合预报研究及评估其后续的业务部署，首先需要回答一系列科学问题，包括：1) 3~4 km网格距雷暴尺度集合数值预报相对于较粗网格（10~25 km网格距）短期集合预报及更高分辨率（1~2 km或更细）的单一确定性预报有何性价比优势；2) 如何优化设计雷暴尺度集合预报系统技术？这一问题又可分为适于雷暴尺度集合数值预报的初值扰动技术、适于雷暴尺度集合数值预报的侧边界扰动及下边界扰动、适合于雷暴尺度集合数值预报的模式物理过程参数化配置；3) 同化高密度观测资料如多普勒天气雷达资料对雷暴尺度集合数值预报的影响及价值；4) 适于雷暴尺度的最有效的集合同化技术；5) 最有效的集合预报后处理及集合预报产品，包括集合产品订正；6) 这类集合预报产品在对灾害性天气预报预警所具有的独特价值和影响。

1 雷暴尺度集合预报研究概览

对雷暴尺度集合数值预报的早期研究集中在采用积云模式在水平均理想大气廓线条件下利用人为在低层施加热泡激发对流云团，试图探讨不同扰动对应的误差增长形式^[14]。尽管该项研究未能完善，但较早提到了“雷暴尺度集合（storm-scale ensemble）”一词。Elmore等^[15-17]以业务粗网格模式预报中提取感兴趣格点上的模式大气廓线作为云模式水平均环境驱动一组云模式集合，探讨由云模式集合得到的雷暴的分布和生命史的长短特征是否能提供有用的强烈天气指引（severe-weather indicators）。一些学者^[18-19]采

用3 km网格距对不同 β 中尺度个例进行集合模拟，通过引入高斯分布随机误差源研究了不同微小误差在对流过程中的增长和传播特性，发现对流系统中的误差结构和传递有其独特性，在湿对流活动区域即使非常小的初始误差也会快速增长并污染短期确定性预报。Kong等^[11-12]较早尝试进行了用ARPS模式在完全数值天气预报框架下，并包含有多普勒天气雷达同化的一个实际龙卷雷暴个例的雷暴尺度集合预报试验。该研究采用了简单但经过改进的尺度滞后平均预报方法（SLAF）和有限的5个集合成员，通过24、6和3 km嵌套网格进行一系列集合预报数值模拟，发现各层分辨率网格上集合预报均优于单个确定性预报，但从对流系统结构及演变特征上，3 km网格要远优于两个较粗网格。此项研究还对模式误差增长以及雷达同化影响进行了探讨。

在集合预报系统的构建方法上，各种适用于已经发展相对成熟的全球中期集合预报系统的技术在理论上均可用于雷暴尺度集合预报系统。然而由于后者具有相对小的有限区域，可以通过降尺度从全球中期或区域短期集合预报获得初始扰动以及与之匹配的侧边界扰动。文献中用到的雷暴尺度集合系统构建方法主要有初始场及侧边界场扰动加单一模式单一物理参数化、单一初值和侧边界条件单一模式多物理参数化、单一初值和侧边界条件多模式多物理参数化、初值和侧边界扰动加单（或多）模式多物理的混合集合等。传统的时间滞后方法在雷暴尺度集合系统仍有应用，如ESRL的试验性高分辨快速更新预报（High Resolution Rapid Refresh, HRRR）时间滞后集合（HRRR-TLE）^[20]。随机扰动（stochastic perturbation）技术，包括随机物理过程扰动（SPPT、STTP）和随机动能后向散射扰动（SKEB）也开始应用到雷暴尺度集合研究中^[21-22]。随着近年来集合卡曼滤波分析与集合预报系统在全球中期集合预报业务系统中的有效应用，其在雷暴尺度集合预报系统的有效性研究也得到如NCAR、CAPS、NSSL等研究中心或实验室的日益重视。

美国俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心（Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS）近年在雷暴尺度集合数值预报（Storm-Scale Ensemble Forecast, SSEF）领域进行了大量研发工作，从2007年开始与NOAA下设的风暴预报中心（Storm Prediction Center, SPC）及国家强风暴实验室（National Severe Storm Laboratory, NSSL）合作建立和试验跨美国范围3~4 km分辨率的雷暴

尺度集合数值预报。在中国与深圳市气象局于2013年合作建立开发了并业务运行华南区域4 km分辨率的雷暴尺度集合数值预报系统。2016年与重庆市气象局和重庆绿色智能技术研究院三方合作,建立起水平网格分辨率高达3 km跨西南范围的雷暴尺度快速同化分析集合预报系统(Storm-Scale Rapid Analysis and Forecasting System Ensemble, SSRAFS_ENS),逐3 h对实时雷达、卫星、及其他观测资料同化并运行11个成员的24 h雷暴尺度集合数值天气预报,以及每12 h运行11个成员、分辨率为(27 km×27 km)~(9 km×9 km)~(3 km×3 km)的全国范围嵌套网格96 h区域中尺度集合天气预报。

欧洲目前进入或近期计划进入业务运行的雷暴尺度集合数值预报系统包括英国UKMO的MOGREPS-UK(2.2 km格距,12个成员)^[23-24]、德国的COSMO-DE-EPS(2.8 km格距,20个成员)^[25]和法国气象局的AROME-EPS(计划2.5 km,12个成员)^[26]。

这里有必要专门对美国NOAA试验基地所涉及的雷暴尺度集合预报研究作一较详细综述。

1.1 NOAA 灾害性天气预报试验基地春季预报试验

美国NOAA灾害性天气预报试验基地(Hazardous Weather Testbed, HWT)春季预报试验(Spring Forecast Experiment, SFE)从2007年开始将雷暴尺度集合数值预报列为下一代对流灾害天气预报的主要试验产品依托,由CAPS在NOAA科学技术应用协作研究(Collaborative Science, Technology, and Application Research Program, CSTAR)项目资助下为HWT春季预报试验提供核心SSEF预报及产品。在2007年春季预报试验中,CAPS在全球首次实时运行基于WRF-ARW的4 km水平网格距10个成员的雷暴尺度集合预报,周一到周五每日产生前一日21 UTC起报的33 h集合预报,模式区域覆盖三分之二美国本土,采用51垂直层,采用由NCEP SREF扰动成员降尺度提供初值和边界场扰动加多物理参数化的混合集合^[27-28]。在2008年春季预报试验中首次加入了实时雷达数据同化,采用CAPS自己开发的ARPS三维变分(3DVAR)及云分析模块对模式区域内120部多普勒天气雷达径向风速和雷达回波反射率作实时同化^[29],预报启动时间改到00 UTC。2009年开始又加入WRF-NMM和ARPS模式动力框架,集合成员数增加到20个以上,模式覆盖区域扩大到四分之三美国本土,还首次在如此大范围运行了1 km水平网格距单一确定性预报(所用计算资源为20个4 km网格距集合成员预报的4倍多)^[30]。从2010年起CAPS SSEF模式区域扩大到全美国本土范

围^[31-32],集合成员数最高达到51个(2011年),预报时效逐步延长到36 h(2011年)、48 h(2013年)、60 h(2014年及以后)。从2015年开始,CAPS SSEF模式网格距由4 km减小到3 km。除一直运行基于三维变分与云分析同化的雷暴尺度集合预报,CAPS从2013年开始试验用自己发展的高效并行化集合卡曼滤波(EnKF)分析模块实时同化雷达及其他常规观测资料,自2016年又加入GSI同化与业务RAP相同常规观测数据流^[33-35]。

1.2 CLUE 超级集合

2007—2012年,CAPS是唯一运行并向HWT每年春季预报试验提供雷暴尺度集合预报产品的研究中心。SPC从2011年开始尝试利用EMC和NSSL等业务以及试验性全年运行的高分辨确定性预报来构建“雷暴尺度集合机会”(Storm-Scale Ensemble of Opportunity, SSEO)^[36]。随着对雷暴尺度集合研究日益重视及超算资源的普及,参与并向HWT春季预报试验提供雷暴尺度集合预报产品的机构自2013年大幅增加。例如到2015年就有来自CAPS、NSSL、NCAR、AFWA等机构贡献的多达6个集合约70个成员。这些集合由各机构独立设计,具有非常大的不可比性,亦给春季预报试验参与者造成使用上的困惑。

从2016年开始,HWT春季预报试验组织者将各研究中心所贡献的雷暴尺度集合数值预报统一纳入一个名为Community Leveraged Unified Ensemble(CLUE)的超级集合系统^[37],事先共同设定统一的模式网格、垂直层参数、WRF模式除可变化物理过程外的控制参数,以及统一的后处理产品集,按照欲研究解决的科学问题设计划分出若干子集合分由不同机构运行。CLUE的目的是借助“社区”力量通过有控制的预先设计的超级集合,为即将建立的业务化雷暴尺度集合系统提供设计上的决策指导。2016年CLUE超级集合有65个成员,由5个研究中心:CAPS(35)、NOAA国家强风暴实验室(NSSL,15)、美国国家大气研究中心(NCAR,10)、北达科他大学(UND,5)、NOAA地球系统研究实验室全球系统部(ESRL/GSD,1)所贡献,括号中为各中心贡献的集合成员数。2017年CLUE超级集合有79个成员,其中34个由CAPS所贡献。以2017年CLUE为例,总共79个成员的超级集合设计为9个子集合,欲研究和比较的问题包括:多模式核与单一模式核的比较;多物理参数化组合与单一物理组合;单一物理组合与单一物理加随机物理扰动;三维变分同化与集合卡曼滤波同化;不同微物理过程参数化影响;不同雷达分析技术影响等。

1.3 NOAA 水文气象试验基地突发洪水及强降水试验

CAPS从2016年开始为NOAA气象预报中心(WPC)组织的水文气象试验基地(Hydrometeorology Testbed, HMT)年度性夏季突发洪水及强降水试验(Flash Flood and Intensive Rainfall, FFaIR)设计并实时运行10~15个成员构成的3 km水平网格距雷暴尺度集合预报,提供概率匹配平均及邻域概率降水产品,包括雷暴尺度集合预报降水相对不同重现期(recurrence interval)不同累计时长的邻域概率^[38]。

2 雷暴尺度集合预报研究成果

在降水预报方面, Kong等^[30]发现多模式雷暴尺度集合可以显著提高基于SSEF的概率降水预报可靠性,且对于降水分布和模式雷达反射率分布采用概率匹配平均优于简单集合平均^[39]。Schwartz等^[40]发现将“邻域(neighborhood)”方法^[41]——即在一定影响半径内获取平均的集合概率的方法,与传统集合后处理相结合可以提高降水概率预报指导的可用性,强调对这类基于高分辨模式的邻域概率采用分维数技巧评分(Fraction Skill Score, FSS)。Wolff等^[42]也指出采用CRM高分辨率的预报虽然可以得到与真实对流系统更相似的结构分布以及更多的细节,却不一定能改善格点对格点尺度上的预报技能。只有借助适当的升尺度(或平滑)后处理手段获取比单个网格更大一些尺度上的邻域概率FSS才可达到更高预报技能。Schwartz等^[43]研究表明集合成员数超过20个以后继续增加并不一定能提高雷暴尺度集合预报质量,除非增加的成员可以有效展宽集合样本密度函数分布(PDF)尾段。

对CAPS历年SSEF预报检验显示雷达数据同化对前3~6 h降水预报有显著贡献,雷达资料平均正贡献可以延续12~18 h,甚至更长^[29, 44-46]。Clark等^[47-49]将CAPS春季预报试验的高分辨SSEF与需要加入积云参数化的较粗网格分辨率集合的降水预报作对比,证实SSEF在预报技能以及降水日变化特征方面明显优越于后者。更加具体研究分析表明,通过SSEF产生的定量降水预报及概率降水预报在预报评分方面要远好于采用较粗网格的NCEP业务化的SREF集合^[50-51]。Iyer等^[52]发现SSEF在定量降水预报及概率降水预报上的这种优势甚至可以延续到“第二日预报(Day-2)”(36~60 h)。Iyer等^[52]的研究还对比了2015年HWT春季预报试验的几组不同雷暴尺度集合预报0~60 h概率匹配平均定量降水预报评分(ETS)及概率降水预报评分(ROC面积),发现采用不同初值和侧

边界扰动与多物理参数化配置的混合集合(hybrid ensemble)加雷达数据同化具有最佳的表现。

Kain等^[53]分析CAPS 2011年春季预报试验SSEF数据发现雷暴尺度集合预报所得出的初始对流单体发生时间(Convection Initiation, CI)与实况之差呈现准高斯分布特征,且不存在系统性集合偏差,从而揭示SSEF能提供有用且仅需要最小程度订正的CI概率预报指导。同时,该研究也揭示出试图由SSEF用某种自动识别具体对流单体的努力本身还不具有足以预报潜在爆发性深对流活动的的能力,从而建议即便是借助拥有对流允许或对流可分辨的较高网格分辨率的雷暴尺度集合预报,今后CI预报问题也应当立足于对中尺度对流初始生成过程的预报而不是单个对流云体的形成和发展的预报(“For practical purpose, the convection initiation forecasting challenge should be framed in terms of the initiation of mesoscale convective events rather than the formation and growth of individual cumulonimbus clouds”,摘自Kain等^[53])。

Clark等^[54-55]发现由雷暴尺度集合预报各成员输出的小时最大上升气流螺旋度(hourly maximum updraft helicity, UHmax)构建的总路径长度(total path lengths)与实际所发生龙卷风强烈度等级间有强相关性,从而可以作为龙卷发生强度预报的有效和高技能的重要预报因子。Coniglio等^[56]将2008年春季预报试验中的雷暴尺度集合预报数据与探空资料作比较,发现SSEF集合平均对发生对流前及雷暴周边环境大气的预报准确程度优于单一确定性预报,但具体成员可以存在不同程度的系统性偏差。

Beck等^[26]利用目前欧洲3个业务或准业务雷暴尺度集合预报系统(英国MOGREPS-UK、德国COSMO-DE-EPS和法国AROME-EPS)构建出范围重叠的两组多模式集合,通过对两年间共5个月的地面风、温、湿、降水预报检验,发现多模式集合通常获得比各单个集合系统较小些的均方根误差、较大的离散度、改善的ROC(或ROC面积)及Brier评分。不过Johnson等^[57-58]的研究也揭示出雷暴尺度集合预报结果存在按模式或物理参数化集群化(clustering)的问题,从而影响到集合概率预报的可靠度(reliability)。

Duda等^[22]的研究认为在雷暴尺度集合系统中加入随机动能后向散射(SKEB)与多物理参数化相结合可以减小集合平均的最小均方差误差、较平缓的秩直方图(rank histogram)、对降水概率预报有一定程度改善, SKEB也有助提高中高层对流层各天气变量的离散度和改善近地面2 m温度、露点、10 m风的预报

概率,但对近地面量的离散度增加作用不明显。考虑到单一模式集合系统比多模式多物理集合系统有便于维护操作,以及更适合于连续循环更新EnKF同化与集合预报一体化系统的特点,Romine等^[21]利用NCAR运行的基于WRF模式的15 km嵌套3 km集合系统模拟研究了扰动侧边界条件、SKEB及随机物理参数扰动(SPPT)对雷暴尺度集合预报可靠度的影响。该集合系统在15 km网格采用每6 h EnKF循环更新同化,3 km网格直接采用15 km降尺度分析场。该研究发现采用SKEB、STTP等随机扰动技术以及增加侧边界扰动确实可以提高降水预报的集合可靠度以及某些集合评分,但同时会降低各单个成员的对模式大气相对探空廓线观测的确定性预报技能,尽管对集合平均技能影响不明显。

采用NSSL目前已业务化的基于雷达及雨量计观测资料制作的定量降水估计产品^[59]做为检验数据,Kong等^[51]对2010年CAPS春季预报试验的SSEF数据进行了检验评分,并与NCEP业务预报系列中的较粗网格分辨率的短期集合预报SREF以及12 km分辨率的北美中尺度预报(North American Mesoscale Forecast System, NAM)比较。图1是3 h累计降水预报的ETS

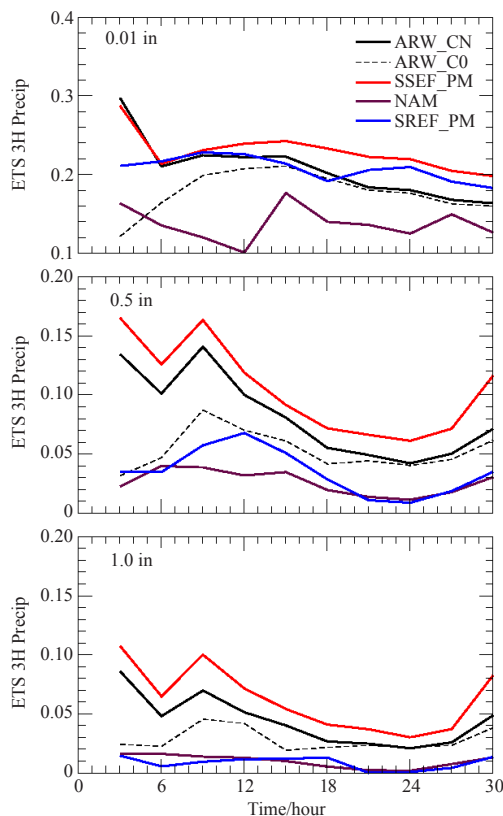


图1 2010年春季预报试验3 h累计降水ETS评分

Fig. 1 ETS scores for 3-hourly accumulated precipitation in 2010 HWT Spring Forecast Experiment

评分,值大为优。可以看到采用CAM高分辨率的雷暴尺度集合预报的概率匹配平均(SSEF_PM)要优于较粗网格分辨率的单一确定性业务预报NAM,也明显优于短期集合业务预报(SREF_PM),尤其在较强阈值范围。采用CAM高分辨率的雷暴尺度集合中的单一成员(ARW_CN)也显著优于业务NAM预报,以及在较强阈值范围优于SREF_EM。图中虚线(ARW_C0)为与ARW_CN成员完全相同但没有初始雷达数据同化的预报,其目的是比较同化雷达资料对降水预报的影响。从图1可以看到同化雷达数据对降水预报评分的明显提高,尤其在预报前3~6 h。对雷暴尺度集合预报与较粗网格分辨率业务化短期集合预报的降水概率预报的ROC评分同样显示出前者的明显优势^[51]。

图2是HWT 2010年春季预报试验中每日试验产品的一个样例。HWT春季预报试验每个试验日根据前一天SPC强对流天气展望(Day-1 Outlook)确定一个关注窗口区域。图2是5月19日试验日堪萨斯州俄克拉荷马州区域的逐6 h累计降水不同模式18 h预报产品及同时段(12—18 UTC)的观测降水,图中显示了雷暴尺度集合预报(SSEF)、NCEP业务化短期集合预报(SREF)及北美中尺度业务预报(NAM)的结果,其中集合预报分别显示了简单集合平均和概率匹配平均。可以看到SSEF概率匹配平均预报具有最接近实况的降水分布、结构及强度。SREF概率匹配平均预报呈现西北—东南雨带走向,中心位于堪萨斯州北部太偏西北且峰值较弱。NAM业务预报降水中心也偏西北,只是降水强度要高于SREF概率匹配平均。

2016年6月23—24日发生在西弗吉尼亚的暴发性洪水个例正值HMT 2016 FFaIR试验期间,CAPS为其运行15个成员构成的多模式(ARW和NMMB)多物理加初边界扰动的3 km网格距雷暴尺度集合预报,并提供实时雷暴尺度集合定量降水预报概率产品。该次暴发性洪水过程造成23人死亡,全州55个县有44个被宣布进入州紧急状态。在Maxwelton雨量站录得24 h 238 mm峰值雨量,麋鹿河(Elk River)水文站录得33.37 ft (1 ft=0.3048 m)纪录最高水位。图3显示雷暴尺度集合预报对这一极端天气个例可以提前24 h甚至48 h较好预报出强降水的主要落区范围及峰值强度。

3 仍存在的问题、挑战及未来方向

近十来年的雷暴尺度集合预报研究与实践取得了可称得上丰硕的成果,为数不少的业务准业务预报系统也已投入运行。然而若干重要科学问题仍然未能解决。归纳起来有:雷暴尺度集合预报集合离散度偏低、概率预报可靠度低、传统预报评分应用到高分辨

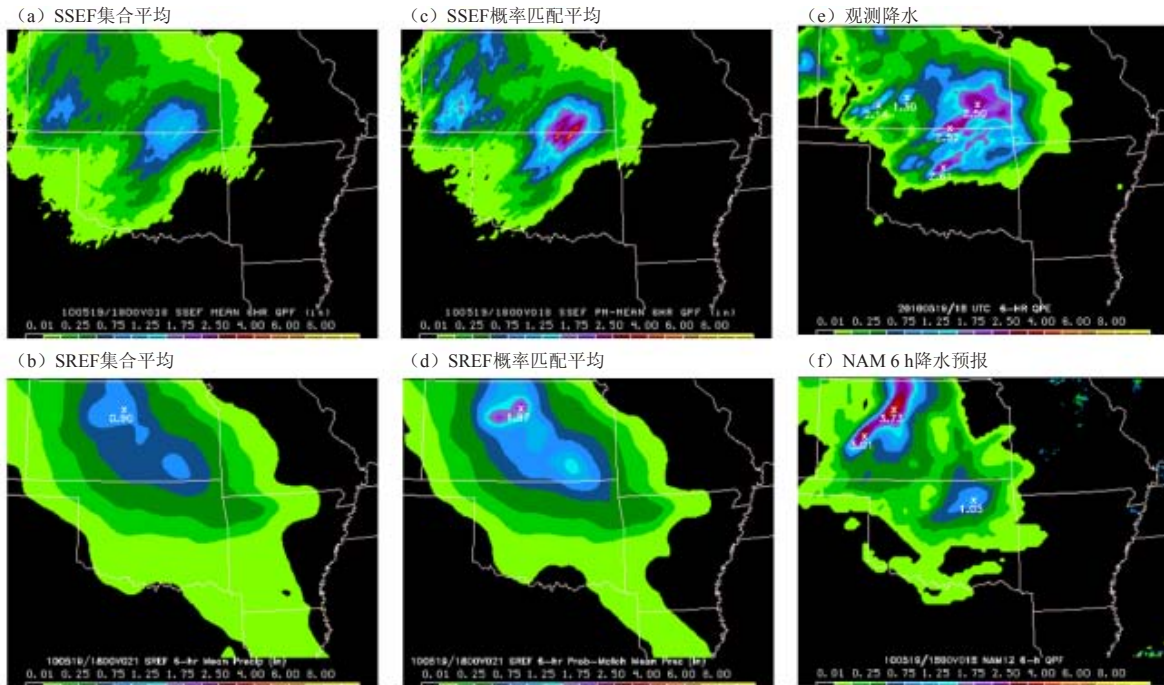


图2 2010年HWT春季预报试验6 h降水产品实例 (2010年5月19日00 UTC起报, 18 h预报12—18 UTC时段累计降水)
Fig. 2 Product example from 2010 HWT Spring Forecast Experiment: 6-hourly accumulative precipitation for 12–18 UTC, initiated at 00 UTC 19 May 2010

集合预报上的先天缺陷等。迄今为止各种研究中为提高雷暴尺度集合离散度的各种尝试, 如各类随机扰动 (SKEB, STTP, SPPT, 土壤层变量扰动)、各种同化技术 (3DVAR, cycling EnKF)、各种初始扰动 (降尺度、多尺度)、各种集合系统设计 (多模式、多物理、多物理参数) 均无法得到足够的与误差量级相匹配的预报集合离散度。邻域概念的应用对概率预报可靠度及概率评分有帮助, 但以牺牲空间尺度分辨率为代价。以对象导向 (object-oriented) 的预报检验可能弥补传统预报评分的不足, 但这类检验评分如何与预报员主观认知上的接纳有待研究。

另一突出问题是雷达数据同化对降水预报的正贡献在预报前几小时快速减退。这一方面要归于目前数值预报模式对雷暴单体的可预报性制约, 即模式初始对流单体系统在预报积分一开始即与实际大气对流云单体呈现不同的演变特征; 另一方面基于连续循环EnKF的雷暴尺度集合同化分析系统尚处于较初期阶段, 其有效性有待证实。HWT春季预报试验以及CLUE超级集合概念可能是有效借助各方力量合作解决尚存问题的发展方向。

需要说明的是, 本文并不是一个关于雷暴尺度集合预报研究及应用的完全性综述。许多十分重要的方面, 如雷暴尺度集合预报概率订正等未有涉及。

参考文献

- [1] Molteni F, Palmer T N. Predictability and finite - time instability of the northern winter circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119(510): 269-298.
- [2] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [3] Buizza R. Potential forecast skill of ensemble prediction, and spread and skill distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(1): 99-119.
- [4] Kalnay E. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [5] Mullen S L, Baumhefner D P. Monte Carlo simulations of explosive cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(7): 1548-1567.
- [6] Hamill T M, Colucci S J. Verification of the Eta-RSM short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(6): 1312-1327.
- [7] Du J, Tracton M S. Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: an update. *Preprints, 9th Conference on Mesoscale Processes*, American Meteorological Society, 2001, 355-356.
- [8] Du J, Mullen S J, Sanders F. Short range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2427-2459.
- [9] Stensrud D J, Bao J W, Warner T T. Using initial conditions and model physics in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(7): 2077-2107.
- [10] Mullen S L, Buizza R. The impact of horizontal resolution and ensemble size on probabilistic forecasts of precipitation by the ECMWF ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(2): 173-191.
- [11] Kong F, Drogemeier K K, Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part I: comparison of coarse- and fine-grid experiments. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(3): 807-833.

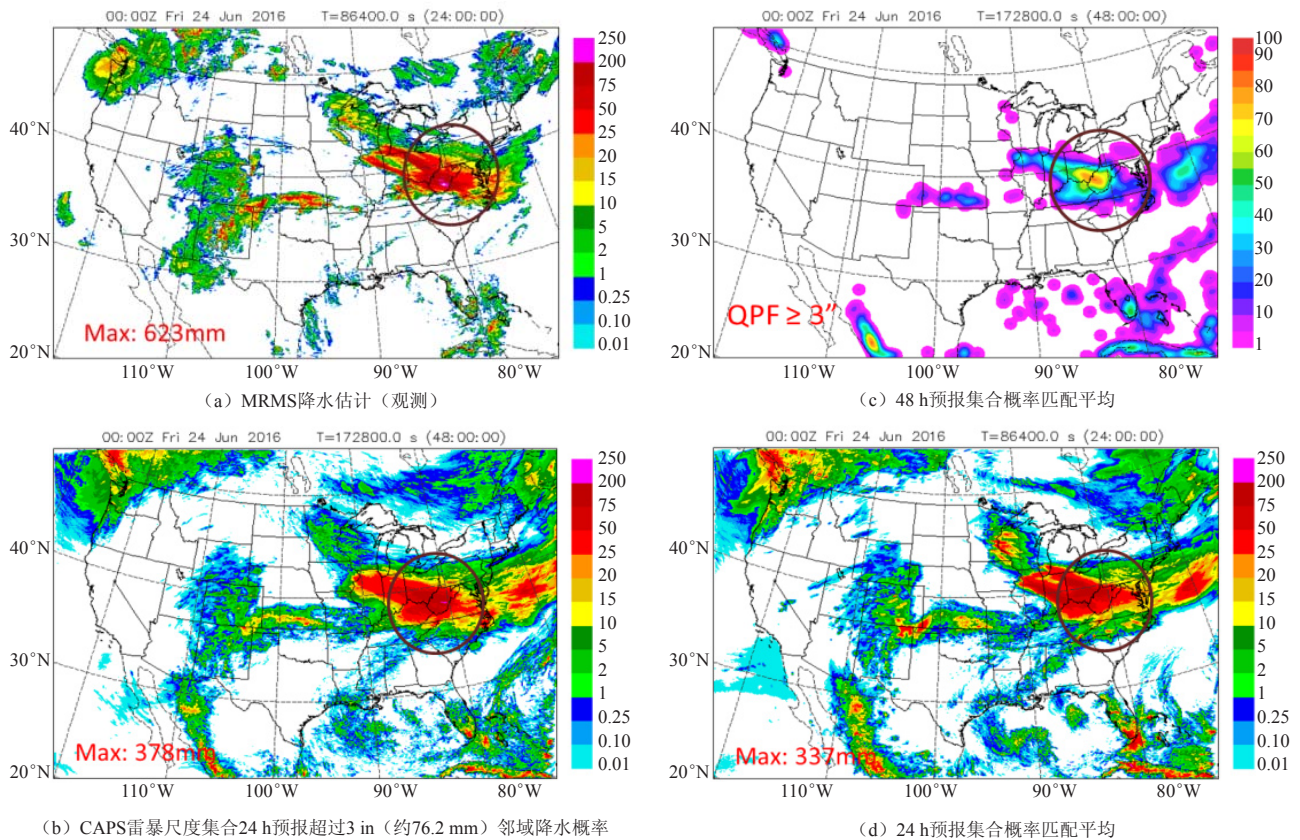


图3 2016年6月23日00 UTC到24日00 UTC 24 h累计降水
Fig. 3 24 h accumulated precipitation between 00 UTC 23 June to 00 UTC 24 June 2016

- [12] Kong F, Droegemeier K K, Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: storm-scale experiments. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 759-782.
- [13] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(1): 55-74.
- [14] Sindic-Rancic G, Toth Z, Kalnay E. Storm-scale ensemble experiments with the ARPS model: preliminary results. *World Meteorological Organization-Publications-WMO td*, 1998: 5.56-5.57.
- [15] Elmore K L, Stensrud D J, Crawford K C. Ensemble cloud model applications to forecasting thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(4): 363-383.
- [16] Elmore K L, Stensrud D J, Crawford K C. Explicit cloud-scale models for operational forecasts: a note of caution. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(4): 873-884.
- [17] Elmore K L, Weiss S J, Banacos P C. Operational ensemble cloud model forecasts: some preliminary results. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(5): 953-964.
- [18] Walser A, Schar C. Predictability of precipitation in a cloud-resolving model. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(2): 560-577.
- [19] Hohenegger C, Luthi D, Schar C. Predictability mysteries in cloud-resolving models. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(8): 2095-2107.
- [20] Alexander C, Benjamin S G, Weygandt S S, et al. Time-lagged 3-km ensemble high-resolution rapid refresh (HRRR) forecasts for key convective storm, fire weather and wind energy events in 2013. 26th Conference on Weather Analysis and Forecasting/22nd Conference on Numerical Weather Prediction, 2014: 124.
- [21] Romine G S, Schwartz C S, Berner J, et al. Representing forecast error in a convection-permitting ensemble system. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(12): 4519-4541.
- [22] Duda J D, Wang X, Kong F, et al. Impact of a stochastic kinetic energy backscatter scheme on warm season convection-allowing ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(5): 1887-1908.
- [23] Tennant W. Improving initial condition perturbations for MOGREPS-UK. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2324-2336.
- [24] Golding B, Roberts N, Leoncin G, et al. MOGREPS-UK convection-permitting ensemble products for surface water flood forecasting: rationale and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(5): 1383-1406.
- [25] Gebhardt C, Theis S E, Paulat M, et al. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. *Atmospheric Research*, 2011, 100(2-3): 168-177.
- [26] Beck J, Bouttier F, Wiegand L, et al. Development and verification of two convection-allowing multi-model ensembles over Western Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(400): 2808-2826.
- [27] Kong F, Xue M, Bright D, et al. Preliminary analysis on the real-time storm-scale ensemble forecasts produced as a part of the NOAA hazardous weather testbed 2007 spring experiment. 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction, Salt Lake City, Utah, American Meteorological Society, 2007, CDROM 3B.2.
- [28] Xue M, Kong F, Weber D, et al. CAPS realtime storm-scale ensemble and high-resolution forecasts as part of the NOAA hazardous weather testbed 2007 spring experiment. 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction, American Meteorological

- Society, 2007, CDROM 3B.1.
- [29] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime storm-scale ensemble and high-resolution forecasts as part of the NOAA hazardous weather testbed 2008 spring experiment. 24th Conference on Severe Local Storms, Savannah, GA, American Meteorological Society, 2008: 12.2.
- [30] Kong F, Xue M, Thomas K W, et al. A real-time storm-scale ensemble forecast system: 2009 spring experiment. 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, Nebraska, American Meteorological Society, 2009: 16A.3.
- [31] Kong F, Xue, Thomas K W, et al. Evaluation of CAPS multi-model storm-scale ensemble forecast for the NOAA HWT 2010 spring experiment. 25th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: P4.18.
- [32] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime storm scale ensemble and high resolution forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2010 spring experiment. 25th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: 7B.3.
- [33] Jung Y, Xue M, Wang Y, et al. Multi-Scale ensemble Kalman filter data assimilation and forecasts in Central United States. WMO 6th Symposium on Data Assimilation, College Park, MD, , 2013.
- [34] Jung Y, Zhao G, Xue M, et al. CAPS real-time continental US domain 3-km EnKF data assimilation and forecasts for the NOAA hazardous weather testbed spring forecasting experiment. WMO 7th symposium on Data Assimilation, Florianopolis, Brazil, 2017, <http://pocanga.cptec.inpe.br/inscricaoDas/program.xhtml#>
- [35] Kong F, Xue M, Jung Y, et al. An overview of CAPS storm-scale ensemble forecast for the 2015 NOAA HWT spring forecasting experiment. 27th Conference On Weather Analysis and Forecasting/23rd Conference On Numerical Weather Prediction, 2015: 32.
- [36] Jirak I L, Weiss S J, Melick C J. The SPC storm-scale ensemble of opportunity: overview and results from the 2012 hazardous weather testbed spring forecasting experiment. Preprints, 26th Conference on Severe Local Storms, Nashville, TN. American Meteorological Society, 2012: P9.137.
- [37] Clark A J, Jirak I L, Dembek S R, et al. The community leveraged unified ensemble (CLUe) in the 2016 NOAA/hazardous weather testbed spring forecasting experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, in press.
- [38] Brewster K, Kong F, Snook N, et al. 2017 CAPS storm-scale ensemble forecasts for the hydrometeorology testbed ffair experiment. 8th Conference on Transition of Research to Operations, AMS, Austin, Texas, 2018: 13A.5.
- [39] 李俊, 杜钧, 陈超君. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 2015, 41(6): 674-684.
- [40] Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. Toward improved convection-allowing ensembles: model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. Weather and Forecasting, 2010, 25: 263-280.
- [41] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.
- [42] Wolff J K, Harrold M, Fowler T, et al. Beyond the basics: evaluating model-based precipitation forecasts using traditional, spatial, and object-based methods. Weather and Forecasting, 2014, 29(6): 1451-1472.
- [43] Schwartz C S, Romine G, Smith K, et al. Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble Kalman filter. Weather and Forecasting, 2014, 29(6): 1295-1318.
- [44] Kain J S, Xue M, Coniglio M C, et al. Assessing advances in the assimilation of radar data and other mesoscale observations within a collaborative forecasting–research environment. Weather and Forecasting, 2010, 25(5): 1510-1521.
- [45] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime multi-model convection-allowing ensemble and 1-km convection-resolving forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2009 spring experiment. 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, NB, American Meteorological Society, 2010: 16A.2.
- [46] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. Prediction of convective storms at convection-resolving 1 km resolution over continental United States with radar data assimilation: an example case of 26 May 2008 and precipitation forecasts from spring 2009. Advances in Meteorology, 2013: 9.
- [47] Clark A J, Gallus W A, Xue M, et al. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-permitting and large convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2009, 24(4): 1121-1140.
- [48] Clark A J, Gallus W A Jr., Xue M, et al. Growth of spread in convection-allowing and convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 594-612.
- [49] Clark A J, Gallus W A Jr., Xue M, et al. Convection-allowing and convection-parameterizing ensemble forecasts of a mesoscale convective vortex and associated severe weather. Weather and Forecasting, 2010, 25(4): 1052-1081.
- [50] Schwartz C, Kain J, Weiss S, et al. Next-day convection-allowing WRF model guidance: a second look at 2 km versus 4 km grid spacing. Monthly Weather Review, 2009, 137(10): 3351-3372.
- [51] Kong F, Xue M, Brewster K, et al. Storm-scale ensemble forecasting for the NOAA Hazardous Weather Testbed. 6th European Conference on Severe Storms, 2011: 171.
- [52] Iyer E R, Clark A J, Xue M, et al. A comparison of 36-60 hour precipitation forecasts from convection-allowing and convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2016, 31(2): 647-661.
- [53] Kain J S, Coniglio M C, Correia J, et al. A feasibility study for probabilistic convection initiation forecasts based on explicit numerical guidance. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1213-1225.
- [54] Clark A J, Kain J S, Marsh P T, et al. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm applied to convection-allowing forecasts. Weather and Forecasting, 2012, 27(5): 1090-1113.
- [55] Clark A J, Gao J, Marsh P T, et al. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity. Weather and Forecasting, 2013, 28(2): 387-404.
- [56] Coniglio M C, Elmore K L, Kain J S, et al. Evaluation of WRF model output for severe-weather forecasting from the 2008 NOAA hazardous weather testbed spring experiment. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 408-427.
- [57] Johnson A, Wang X, Xue M, et al. Hierarchical cluster analysis of a convection-allowing ensemble during the hazardous weather testbed 2009 spring experiment. Part II: ensemble clustering over the whole experiment period. Monthly Weather Review, 2011, 139(12): 3694-3710.
- [58] Johnson A, Wang X, Kong F, et al. Hierarchical cluster analysis of a convection-allowing ensemble during the hazardous weather testbed 2009 spring experiment. Part I: development of the object-oriented cluster analysis method for precipitation fields. Monthly Weather Review, 2011, 139(12): 3673-3693.
- [59] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results, and future plans. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(10): 1321-1338.