

郑永光,薛明,陶祖钰. 2015. 美国 NOAA 试验平台和春季预报试验概要. 气象, 41(5):598-612.

美国 NOAA 试验平台和春季
预报试验概要^{*}

郑永光¹ 薛 明² 陶祖钰³

1 国家气象中心,北京 100081
2 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA
3 北京大学物理学院,北京 100871

提 要: 美国国家海洋大气局(NOAA)从 2000 年开始以试验平台(Testbed)的形式逐步探索了气象科研向业务转化工作。目前,试验平台已成为美国气象事业的有机组成部分。本文首先简要介绍了美国各个试验平台的概况及其主要成果,重点介绍了灾害天气试验平台(hazardous weather testbed,HWT)的组织、春季预报试验和取得的进展。强对流天气、定量降水、飓风和航空气象等的预报试验结果表明,发展包括不同类型强对流天气和对流风暴、定量降水预报、热带气旋大风等的各种概率预报是美国天气业务的重要发展方向。2003 年以来的灾害天气试验平台春季试验表明,“对流可分辨”(Convection Allowing)的高分辨率集合数值预报是发展精细化概率预报业务的基础;数值模式同化技术及其预报检验和应用技术的开发是提高强对流天气和定量降水预报概率预报的技术支撑。美国地球静止业务环境卫星 R 系列(GOES-R)资料应用试验场的工作方式和成果可作为我国风云 4 号(FY-4)静止试验卫星相关工作的借鉴。

关键词: 业务科研结合, 试验平台, 概率预报, 春季试验, “对流可分辨”, 数值模式, 集合预报

中图分类号: P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.008

An Overview of NOAA Testbeds and Spring Experiment
in the United States

ZHENG Yongguang¹ XUE Ming² TAO Zuyu³

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081
2 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA
3 School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Effective and smooth transitions from research and development to operational implementation play important parts in promoting the development of meteorological enterprise. Since 2000, the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of the United States of America has begun to organize several test beds to implement the transitions from research and development to operations, and the test beds have become an integral part of the weather enterprise, bridging research and forecast services. This paper briefly introduces an overview of the different test beds of NOAA and their main achievements, and highlights organization and Spring Experiment of the HWT (Hazardous Weather Testbed). By forecasting experiments in severe convective weather, quantitative precipitation forecast, hurricanes, and aviation weather, we can see that developing the probabilistic forecast products of different types of severe convective weather, quantitative precipitation forecast, and the tropical storm force winds is an important

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430106)、中国气象局预报技术集成与应用项目(CMAGJ2013ZX-ZH1)和国家自然科学基金项目(41375051)共同资助
2014 年 9 月 4 日收稿; 2015 年 1 月 6 日收修定稿
第一作者:郑永光,主要从事中尺度气象学和强对流预报方法和机理研究. Email:zhengyg@cma.gov.cn

development goal of the U. S. weather service. The Spring Experiment of HWT showed that high-resolution “convection allowing” numerical weather prediction (NWP) models [hereafter convection-allowing models (CAMs)] are the technical foundation for developing fine probabilistic forecasting operation, and the development of CAMs and data assimilation, testing and application of CAMs forecasts can provide objective technical support for probabilistic forecasts of severe convective weather and quantitative precipitation. The achievements and organization of GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite -R series) Proving Ground can also provide a reference for the application of FY-4 (Fengyun-4) satellite data.

Key words: transitions from research to operations, test beds, probabilistic forecasting spring experiment, “convection-allowing”, numerical models, ensemble

引 言

业务和科研工作是当今世界各国气象事业发展的两条主线。毋庸置疑,科研工作是业务发展的基础。但如何使得科研工作更快、更好地为业务提供理论和技术支持、推动业务发展,也就是科研成果顺利地向业务转化、业务和科研工作如何更紧密的结合,是当前各个国家气象事业发展面临的一项重要挑战,被美国国家科学院(National Academy of Sciences, NAS; NAS 2000)称之为“死亡之谷”(Valley of Death)。

“死亡之谷”这个术语来源于工业领域,指的是对于技术投资而言,把研发成果转化为具体实现是非常困难的工作(NAS, 2000),而转化失败,就意味着前期投入将遭受重大的损失。要实现成功转化需要解决以下几个关键问题:(1)对转化的重要性和风险有充分的理解;(2)制定和维护恰当的转化计划;(3)提供足够的资源;(4)研发和业务之间持续的双向反馈。NAS 2000 年总结报告中指出,当时美国国家环境预报中心(NCEP)的环境模拟中心(EMC)在科研向业务转化时存在以下几个方面缺失:(1)不具有测试和评估数值模式新技术和新算法的能力;(2)没有足够的预算实施新技术和新算法的开发和向业务的转化;(3)没有专职人员负责转化工作。

在上述经验教训的基础上,美国国家海洋大气局(NOAA)从 2000 年开始,采取试验平台(Testbed)的形式探索了科研成果顺利地向业务转化的途径及业务和科研紧密结合的方式。本文对美国各个试验平台的工作进行简要总结,重点介绍灾害天气试验平台(HWT)的组织工作和取得的主要成果,为我国的气象业务和科研结合工作提供参考。

1 美国国家海洋大气局试验平台概况

Ralph 等(2013)对美国 NOAA 试验平台的概况和主要成果进行了系统总结。NOAA 各个试验平台广泛地涵盖了美国气象业务、应用和技术发展的各个方面,既包含了对气象规律的新科学认识 and 更先进的数值模式和预报工具,也包含了怎样更深刻地认识气象信息和为公众提供更好的公共服务成果。Ralph 等(2013)认为试验平台已经成为美国气象事业不可分割的一部分,通过新工具和测试新方法的转化,建立起了气象科研和预报业务服务之间的桥梁。NOAA 试验平台的流程概念图如图 1 所示。

NOAA 试验平台可以追溯到 20 世纪 90 年代开始持续到现在的美国天气研究计划(USWRP)。目前已经有非常多的部门参与试验平台工作,除了 NOAA 的下属机构外,还包括美国国家航空航天局(NASA)、美国联邦航空局(FAA)、美国国防部(DoD)、美国国家大气研究中心(NCAR)和部分大学等。每一个试验平台都有一个管理团队和一些执行成员,每年大约有 100~500 万美元的资金支持。NOAA 有一个“试验平台和试验场协调委员会”(Testbeds and Proving Ground Coordinating Committee)负责支持和指导各个试验平台的工作。

NOAA 目前主要有以下十个试验平台:(1)联合飓风试验平台(Joint Hurricane Testbeds, JHT), (2) NOAA 水文气象试验平台(NOAA's Hydrometeorology Testbed, HMT), (3)卫星资料同化联合中心(Joint Center for Satellite Data Assimilation, JCSDA), (4)灾害天气试验平台(Hazardous Weather Testbed, HWT), (5)短时预报研

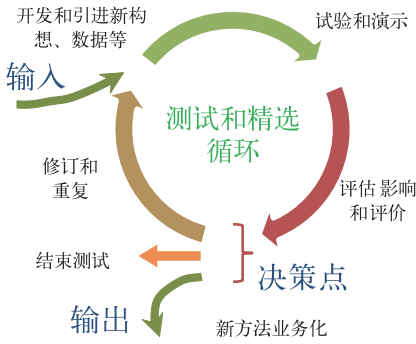


图 1 美国试验平台流程概念图,包括
创新、试验和演示、评估与结论等
[根据 Ralph 等(2013)重新绘制]

Fig. 1 Conceptual schematic of the testbed
process for a hypothetical project, tool, or
concept—including innovation, demonstration,
evaluation, and, where suitable, a transition
to operations (from Ralph et al, 2013)

究和转化平台 (Short-Term Prediction Research and Transition, SPoRT), (6) 开发试验平台中心 (Developmental Testbed Center, DTC), (7) 气候试验平台 (Climate Testbed, CTB), (8) GOES-R 卫星资料试验场 [GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellites - R Series, 地球静止业务环境卫星-R 系列) Proving Ground], (9) 航空天气试验平台 (Aviation Weather Testbed, AWT), (10) 观测系统模拟试验平台 (Observing System Simulation Experiment Testbed, OSSE)。

下面基于 Ralph 等(2013)的介绍和相关文献、网站等简述各个试验平台的概况。

1.1 联合飓风试验平台

JHT 建立于 2000 年底,由美国国家飓风预报中心(NHC)负责,主要任务是顺畅和迅速地把新技术、研究成果、观测进展应用到改进热带气旋分析和预报业务中。其主要的合作研究伙伴是 NOAA 大西洋海洋与气象实验室(AOML)的飓风研究部(HRD)。Rappaport 等(2012)总结了 JHT 第一个 10 年取得的主要成果是显著降低了热带气旋路径业务预报的误差。研究转化为业务最显著的成果是国家飓风预报中心发布的热带气旋超过一定风速阈值的概率预报产品(图 2);该概率预报产品是在过去 5 年 NHC 热带气旋路径和强度误差分布基础上使用 Monte Carlo 方法生成 1000 条路径,并使用一

个简单风速-半径关系模型来生成不同风速阈值的概率分布(DeMaria et al, 2009)。2011—2013 年 JHT 在热带气旋地面风场分析、热带气旋强度快速增强预报、基于雷达资料的热带气旋中心气压确定技术等方面也取得了显著进展(Landsea et al, 2014);其中基于雷达资料的热带气旋中心气压确定技术使用了雷达反射率因子和径向速度资料来确定热带气旋中心位置、最大入流和出流的风速大小及其所在方位从而来估计热带气旋的中心气压(Landsea et al, 2014),但目前还没有详细介绍该技术的文献发表。

1.2 水文气象试验平台

HMT 由美国 NOAA 地球系统研究实验室物理科学部(ESRL/PSD)领导,核心成员包括地球系统研究实验室全球系统部(ESRL/GSD),NCEP 水文气象预报中心[HPC,2013 年 3 月 5 日起更名为天气预报中心(WPC)],水文发展办公室,国家环境卫星、数据和信息服务局(NESDIS),美国天气局西部河流预报中心和天气预报台,加州水利局等。

HMT 主要关注的焦点是极端降水和导致洪水的水文气象因素,主要包括以下 5 个内容:定量降水估测(Quantitative Precipitation Estimation,QPE)、定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecasts,QPF)、与雪相关的信息、水文应用和地表过程、决策支持工具等。HMT 已经同 DTC 合作共同关注中尺度数值模式的降水预报。对美国西部的降水预报来说,HMT 尤其关注水汽输送和“大气河流”(Atmospheric Rivers,AR)(Ralph et al, 2011a; 2011b; 2012)在定量降水业务预报中的应用,其主要技术思路是通过历史资料分析 AR 与强降水的关系、在实际业务中通过卫星反演的水汽产品、风廓线雷达资料、GPS met 数据、数值预报的水汽输送等来关注 AR 的强度及其异常分布来作为定量降水预报中的重要因素。2013 年,NCEP 天气预报中心主办的实时预报试验着眼于短期的暴洪概率预报(见图 3)(http://www.wpc.ncep.noaa.gov/hmt/FFaIR_2013_final_report.pdf)。

1.3 卫星资料同化联合中心

JCSDA 建立于 2001 年,主要合作伙伴是 NASA、NOAA 和 DoD,主要任务是改进和加快卫星资料在天气、海洋、气候和环境等领域中数值分析

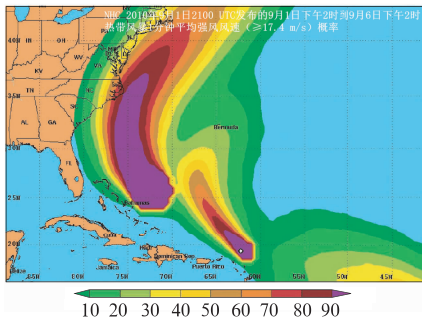


图 2 NHC 2010 年 9 月 1 日 2100 UTC 发布的 9 月 1 日 1400 UTC 到 9 月 6 日 1400 UTC 1 分钟热带风暴强风速(至少 39 mph 或者 $63\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 大约 $17.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)概率 [其间共有三个飓风:飓风 Earl(中心起源于巴哈马东),热带风暴 Fiona(中心起源于波多黎各东北),以及热带风暴 Gaston(中心起源于在非洲和加勒比地区之间,在该图的边缘;取自 Rappaport 等(2012)]

Fig. 2 Wind speed probabilities for 1 min tropical storm force winds (at least 39 mph/63 km · h⁻¹) issued by NHC at 2100 UTC 1 September 2010 for the combined forecasts of Hurricane Earl (centered initially just east of the Bahamas), Tropical Storm Fiona (centered initially northeast of Puerto Rico), and Tropical Storm Gaston (centered initially off the edge of the figure between Africa and the Caribbean) (from Rappaport et al, 2012)

和预报的研究和业务应用。JCSDA 发展的优先领域包括辐射传输、云和降水、先进仪器、海洋资料同化、大气化学和气溶胶等,中心任务是来源于卫星的

各种数据的资料同化研究。

1.4 灾害天气试验平台

HWT 本身并没有经费支持,由美国 NCEP 风暴预报中心(SPC)、美国国家强风暴实验室(NSSL)和美国国家天气局俄克拉荷马城/诺曼天气预报台[National Weather Service (NWS) Oklahoma City/Norman Weather Forecast Office (OUN)]共同运行(Clark et al, 2012b);近年来,俄克拉荷马大学(OU)的风暴分析预报中心(CAPS)成为 HWT 的重要合作伙伴和核心贡献者(Ralph et al, 2013)。

HWT 的工作通常包括 3 个方面的内容:天气预报试验计划(EFP)、天气预警试验计划(EWP)和部分 GOES-R 卫星资料试验场工作。天气预报试验计划的具体任务是专注于预报时间尺度从提前几个小时到一周、空间尺度从几个县到美国本土的灾害性中尺度天气(Clark et al, 2012b)。天气预警试验计划专注于新的科学领域的应用和遥感工具的开发和测试,协助进行短时(0~2 h)临近预报和预警决策(Ralph et al, 2013)。2013 年,HWT 同 SPoRT 共同合作把模拟的 GOES-R 卫星 GLM (Geostationary Lightning Mapper, 地球静止卫星闪电定位仪)总闪电数据输入到 AWIPS-II 系统的总闪电追踪工具 TLTT,得到预报员的积极反馈(2013 SPoRT Annual Report,2013)。

春季试验是天气预报试验计划工作的一部分。HWT 第一次春季试验于2000年春季实施,每年的

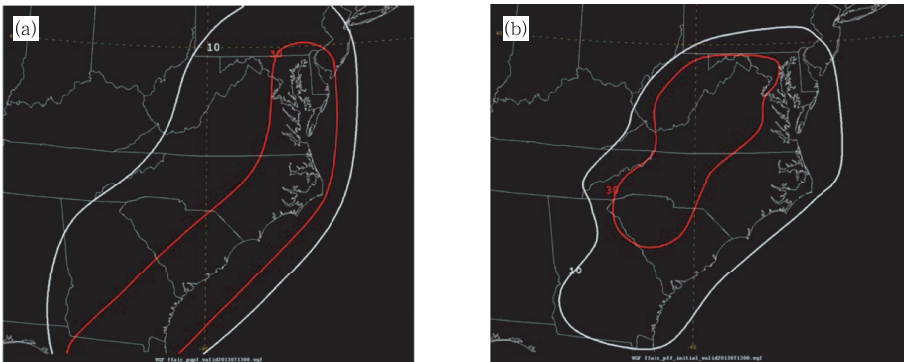


图 3 2013 年 7 月 12 日美国 NCEP 天气预报中心暴洪概率预报试验产品 (a) 12 h $QPF>1\text{ in}$ ($1\text{ in}=25.4\text{ mm}$)概率预报, (b) 6 h 暴洪概率预报 (取自 http://www.wpc.ncep.noaa.gov/hmt/FFaIR_2013_final_report.pdf)

Fig. 3 Displaying (a) the 12 h probability of $QPF>1\text{ in}$ ($1\text{ in}=25.4\text{ mm}$) forecast, (b) the 6 h probability forecast of flash flooding (from http://www.wpc.ncep.noaa.gov/hmt/FFaIR_2013_final_report.pdf)

春季试验是 HWT 的基础性工作,其试验安排和相关工作都可通过因特网查阅。2014 年春季试验的网址是 http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring_2014/, 试验时段是 5 月 5 日至 6 月 6 日。春季试验的目的在于通过密集的实时预报和评估以加速有应用前景的新理念和新工具从研究转化到业务(Clark et al, 2012b)。春季试验让预报员学会从更科学的角度处理业务方面的挑战,而研究人员则更有能力推进与预报业务有关的研究项目工作(Kain et al, 2003)。

从 2003 年起,春季试验开始试验高分辨率的“Convection Allowing”(对流可分辨)数值天气预报模式(CAMs);CAMs 网格间距通常 ≤ 4 km,因为 4 km 大致是数值模式预报结果可以足够代表中尺度对流系统(MCS)的演变和占主导地位环流的最起码的网格间距(Weisman et al, 1997)。2010 年春季试验同以往不同,除了包含传统的强风暴预报试验,通过与 HPC(现在为 WPC)和航空气象中心(AWC)合作把试验重点扩大到了暴雨和航空气象预报试验;CAPS 提供了从来没有过的 26 个成员、4 km 网格间距的多模式风暴尺度集合预报(SSEF)系统生成的实时的美国本土预报产品,以及 1 km 格距的单一模式预报产品;NCAR-NOAA DTC 为预报产品提供了客观模式评估。2010 年春季试验除了 CAPS 提供 CAMs 预报结果外,还有 NCEP/EMC、NOAA ESRL/GSD、NSSL 和 NCAR 等单位(Clark et al, 2012b)。有关这些集合预报模式产品的应用将在 2.2 节“春季试验模式指导产品”中详细介绍。

1.5 短时预报研究和转化平台

SPoRT 由 NASA 于 2002 年建立,主要任务是将 NASA、NOAA 和 DoD 等不同单位独有的卫星数据和研究能力转化到气象业务中,以改善区域和地方尺度的短期天气预报。SPoRT 把实时中分辨率成像光谱仪(MODIS)、大气红外探测器(AIRS)和微波扫描辐射计数据应用到美国东南部的天气预报台(WFO)以解决共同的天气预报问题。

SPoRT 关注的重点是灾害性天气发生的时间和地点。其中包括:由地形和其他局地地形作用导致的天气变化;因烟、雾和低云等导致的地面能见度降低;由于海陆风环流导致的天气变化;监测无地面观测区域的天气状况等。实时高分辨率 MO-

DIS 图像产品已经用来改进临近预警,尤其是识别地表冰或者雪的图像产品应用到美国西部蒙大拿州来改进水文预报取得显著成效(Loss et al, 2009);AIRS 数据同化到 WRF 模式(天气与研究预报模式)中能够显著改进模式的初始场。

2013 年,SPoRT 的试验产品有总闪电产品、被动微波产品、AIRS 臭氧及其距平产品、极轨卫星和静止卫星融合产品、GOES-R 对流初生识别产品等(2013 SPoRT Annual Report, 2013),其中 GOES-R 对流初生识别产品同强对流天气预报关系最直接、最密切。

1.6 开发试验平台中心

DTC 建立于 2003 年,由 NCAR 和 ESRL/GSD 负责运行,任务是通过具有应用前景的数值预报技术进行测试和评估促进数值天气预报的研究到业务(R2O, Reserch to Operation)转化(Bernardet et al, 2008)。

DTC 的测试和评估技术主要涉及 5 个方面:中尺度数值模式测试、评估和转化,飓风数值预报,资料同化,对流尺度集合预报,数值预报统计检验等。DTC 的一项重要成果是开发了数值模式测试、检验、评价工具箱(Model Evaluation Tools, MET),该工具箱可以提供确定性预报检验、概率预报检验和基于对象的检验等技术方法。DTC 还同 HWT、HMT、HFIT(飓风预报改进计划)合作共同推进研究成果向业务转化。

1.7 气候试验平台

CTB 由 NCEP 和气候计划办公室(CPO)共同建立于 2004 年,由 NCEP 气候预报中心负责。CTB 的主要任务是加快将模式系统改进、多模式预报技术、预报工具、数据集和观测系统等方面取得的进展应用到 NOAA 气候预报业务中。CTB 提供气候研究人员能够访问的业务模式、预测工具和数据集的专用通道,以加速 NOAA 气候预报产品的改进,并开发在气候规划和决策中使用的气候业务预报新产品。CTB 在多模式集合气候预报、NCEP 气候预报系统改进和开发气候预报产品等方面取得了显著进展。

1.8 GOES-R 卫星资料试验场

GOES-R 卫星资料试验场建立于 2008 年,目的

是加快做好应用下一代美国静止气象卫星 GOES-R 数据的准备工作。GOES-R 卫星将在 2016 年发射。为了做好 GOES-R 卫星数据应用的准备,需要用户能够通过 AWIPS(Advanced Weather Interactive Processing System,高级交互式气象处理系统)或者 AWIPS-II 实验应用新开发产品的原型产品(Goodman et al, 2012)。GOES-R 卫星发射和运行前,这

些原型产品是从现有的其他卫星或者 WRF 数值模式的模拟产生。目前可以展示的原型产品包括改进的火山灰探测产品、闪电探测产品、1-min 快速扫描图像产品、沙尘和气溶胶探测产品、合成云和湿度图像产品等(Grasso et al, 2008; Otkin et al, 2008),部分产品见图 4。

GOES-R 的 GLM 空间分辨率 8 km,时间分辨

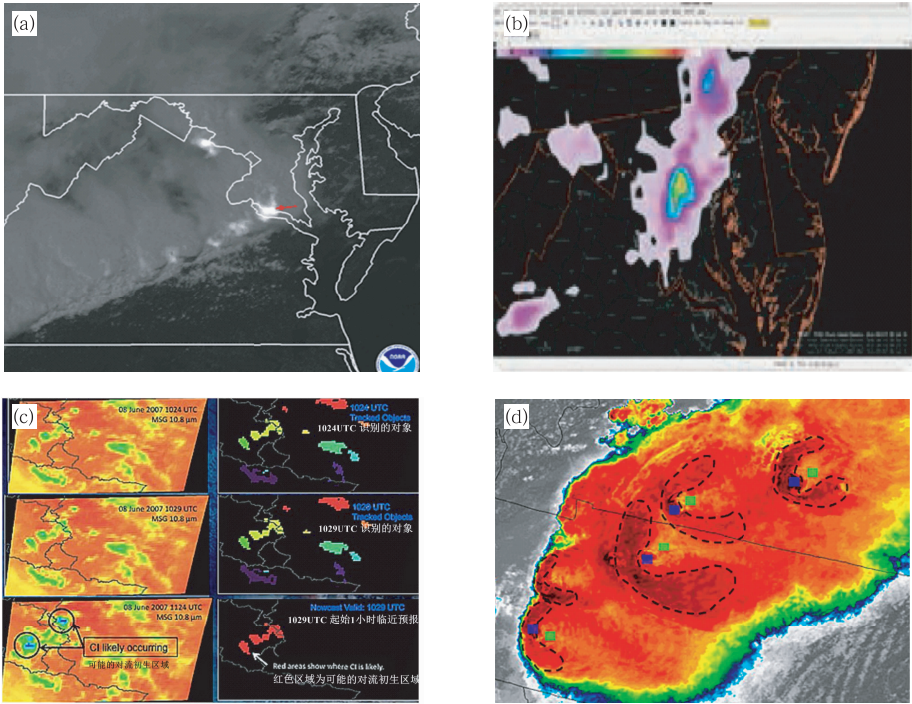


图 4 GOES-R Proving Ground 基于模拟数据开发的部分原型产品

(a)使用 GOES-14 快速扫描图像和华盛顿特区的闪电定位系统模拟的 GOES-R 图像产品和闪电产品(白亮区域);龙卷风(红色线)的轨迹和位置重点突出雷电活动和强风暴之间的关系(取自 <http://www.goes-r.gov/users/proving-ground.html>)。 (b)模拟的地球静止卫星闪电定位仪获得的闪电密度(取自 Ralph et al, 2013)。 (c)对流初生(CI)算法输出的例子,基于 2007 年 6 月 8 日 5 分钟间隔的 Meteosat-8 SEVIRI 数据。上方两幅图像是在时间 1(1024 UTC),中间两幅图像是时间 2(1029 UTC);顶部的两排图像中,左侧是 10.7 μm 通道图像,右侧图像是所识别的对象;最下方一排右侧图像是算法 1029 UTC 输出的 CI 识别对象,左侧图像是 1124 UTC 的观测红外图像(取自 <http://www.goes-r.gov/products/opt2-convective-initiation.html>)。 (d)利用 MODIS 10.7 μm 成像模拟 ABI 数据生成的增强“V”型/上冲云顶产品,上冲云顶位置由蓝色符号(仅显示上冲云顶存在热力对时)表示,识别的增强“V”型的由绿色符号表示 (取自 <http://www.goes-r.gov/products/opt2-enhanced-V.html>)

Fig. 4 Prototype products from GOES-R Proving Ground

(a) By combining special GOES-14 Super Rapid Scan imagery with the Washington, DC Lightning Mapping Array (DCLMA) as proxy for the GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) and Geostationary Lightning Mapper (GLM) respectively. The tracks and locations of a tornado (red lines) are overlaid to highlight the important relationship between lightning activity and severe storms (from <http://www.goes-r.gov/users/proving-ground.html>); (b) Pseudo Geostationary Lightning Mapper lightning density (from Ralph et al, 2013); (c) CI algorithm output examples from 5 min Meteosat-8 SEVIRI data from 8 June 2007. The top two images are at time 1 (1024 UTC), the middle two images are time 2 (1029 UTC). For the top two rows, the left side is the 10.7 μm micron channel image and the images on the right are the defined objects. The bottom row on the right is algorithm output valid at 1029 UTC and the bottom image on the left is the actual IR image in the future at 1124 UTC (from <http://www.goes-r.gov/products/opt2-convective-initiation.html>); (d) Example of the enhanced “V”/overshooting top product as generated by the ABI enhanced “V”/overshooting top algorithm using MODIS 10.7 μm imagery. Overshooting top locations are indicated by blue symbols (only OTs with thermal couplets are shown). Enhanced-V detections are indicated by green symbols (from <http://www.goes-r.gov/products/opt2-enhanced-V.html>)

率约 20 s, 可为监测和预报强对流天气的发生发展提供重要帮助; Goodman (2013)、Goodman 等 (2013) 给出了针对模拟 GLM 闪电数据进行研究和应用技术开发进展综述。Schultz 等 (2009; 2011) 发展了一个“闪电跃增”算法来监测和识别强对流天气, 该算法可用于未来 GLM 观测的总闪电数据的应用中。

GOES-R 卫星资料试验场的一个关键组成部分是研究和业务之间的双向互动, 研究人员推出新产品和新技术, 业务人员提供反馈和改进意见, 使新产品和新技术能够最优地纳入 NOAA 的综合观测和分析操作。GOES-R 卫星资料试验场也同 NCEP SPC/HWT、AWC、SPoRT 等合作共同来推进研究成果向业务转化。

1.9 航空天气试验平台

AWT 由 AWC 负责运行。它的首要目标是测试、评估、精选航空气象研究成果, 并最终把这些研究成果可靠地、安全地转化到实时业务预报系统中。2011 年起, AWT 每年的 6 月底到 7 月底组织大约 1 个月的夏季试验, 测试了大量的新、旧数据集, 且评估了新版的美国气象业务系统 AWIPS-II。AWT 夏季试验重点测试和比较了高分辨率集合数值预报和确定性数值预报模式预报对流系统的发生时间、地点、形态、组织模态和孔隙性等方面的能力。

2011 年夏季试验重点测试了 4 个数值模式: 3-km 水平分辨率 HRRR (高分辨率快速更新模式)、CoSPA (航空综合风暴预报系统) 系统 (Wolfson et al, 2008)、美国空军气象局的 4-km 分辨率 12 成员的集合预报模式系统与 NCEP 的短期集合预报系统 (SREF) 集合预报模式系统。根据测试结果确定将 HRRR 数值模式与 SREF 集合预报模式数据整合到 AWC 的业务中。

AWT 2011 年夏季试验的成果是生成了两种关于对流活动对航空影响的每日预报产品: “航空气象影响”和“超出概率”预报产品。“航空气象影响”产品用来描述重要对流天气的特征, “超出概率”产品预报的是组合反射率因子超过 40 dBz、回波顶高超过 37000 ft (1 ft = 0.3048 m, 约 11278 m) MSL 的 30% 和 60% 概率区域 (图 5) (Ralph et al, 2013)。AWC “超出概率”预报产品现在的正式业务产品名称为协同对流天气预报产品 (CCFP), 针对 8 h 以内的对流天气; CCFP 已经对“超出概率”预报产品作

了改进。AWC 还发布一个 CCFP 的扩展产品, 称为延伸对流天气预报产品 (ECFP), 针对 72 h 以内的预报, 但其预报标准同 CCFP 并不完全一致。CCFP 的预报对象是组合反射率因子超过 40 dBz、和回波顶高超过 25000 ft (7620 m) MSL 的 25% 概率区域, 分为三个概率等级 25% ~ 39%、40% ~ 74%、75% ~ 100%。ECFP 的预报对象同 CCFP, 但预报的概率等级为 40% ~ 59%、60% ~ 79%、80% ~ 100% (取自 <http://aviationweather.gov/products/>)。

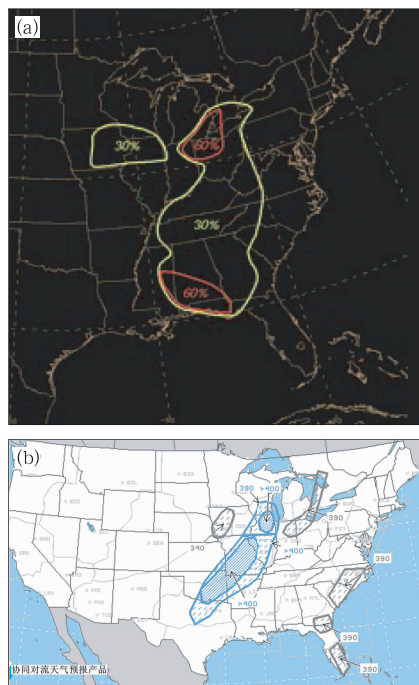


图 5 (a) “超出概率”预报产品 [取自 Ralph 等 (2013)]; (b) CCFP 预报产品

(划线填充区域为概率 25% ~ 39%、实线填充区域为概率 40% ~ 74%、实心颜色填充区域为概率 75% ~ 100%; 图中标注的数字表示高度, 25000 ~ 29000 ft MSL 标注为 290, 30000 ~ 34000 ft MSL 标注为 340, 35000 ~ 39000 ft MSL 标注为 390, 超过 40000 ft MSL 标注为 >400)

(取自 <http://aviationweather.gov/products>)

Fig. 5 (a) Example of the “probability exceedance” graphic. Contours indicate either 30% or 60% probability of convection reaching a combined reflectivity value of 40 dBz and a radar echo height of 37000 ft or greater (from Ralph et al, 2013); (b) CCFP product (dashed-line filled areas denote the probability of 25% ~ 39%, solid-line filled area denotes the probability of 40% ~ 74%, solid-color filled area denotes the probability of 75% ~ 100%; numbers marked in figure indicate height, 25000 ~ 29000 ft MSL marked 290, 30000 ~ 34000 ft MSL marked 340, 35000 ~ 39000 ft marked 390, over 40000 ft MSL marked > 400) (from <http://aviationweather.gov/products>)

1.10 观测系统模拟试验平台

OSSE 是最近建立的试验平台,2010 年起由 NOAA/AOML 负责运行。OSSE 的目标是建设一个关于观测系统的数值试验平台,主要包括以下几个方面的试验:提出未来发展的天基、亚轨道、地基观测系统对天气分析和预报的潜在影响和应用效果;评估和权衡观测系统设计的各种利弊;与 JCS-DA 协调共同评估和建议新观测数据的同化方法;详细说明观测系统的优点和局限性等。

2 灾害天气试验平台春季试验及主要成果

2.1 春季试验主观预报产品

Clark 等(2012b)对 2010 年 HWT 春季试验进

行了综述。除了 SPC/NSSL 领导的灾害天气预
报试验外,2010 年春季试验扩大到了分别由 AWC 和 HPC 领导的航空天气预
报试验和定量降水预报试
验。这些预报试验的主要目标是:(1)使预报员探索“对流可分辨”模式系统的潜在业务用途;(2)测试概
率预报产品;(3)把目前模式系统的优势和劣势提供
反馈给模式开发人员。2010 年春季试验预报产品
见图 6。春季试验的关键在于实时预报,而不是事
后的总结讨论,因此这才被称为预报试验。

灾害天气预报试验产品类似于 SPC 预报业务
每天发布的第一天对流展望预报产品,但具有更高
的时间分辨率和概率等级(图 6a)。试验发布两个
4 h 时段的预报产品,分别为 2000—0000 UTC、
0000—0400 UTC(相当于美国中部 90°W 地方时下
午到傍晚和傍晚到前半夜的 1400—1800 UTC 和
1800—2200 UTC)。预报内容为预报区域内任一点
周边 25 mile(1 mile = 1609.344 m,40 km)范围内

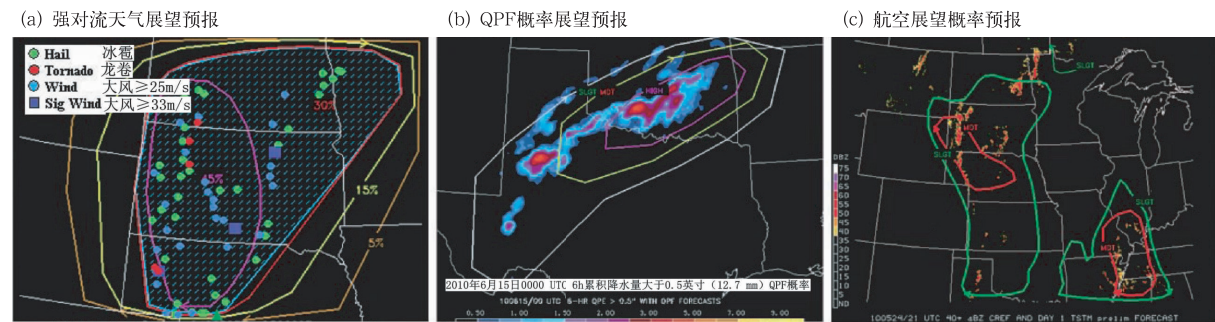


图 6 HWT 2010 年春季试验发布的灾害天气试验预报产品

(a)预发布的(即早上发布的)灾害天气展望预报,有效期为 2010 年 5 月 24 日 2000 UTC 至 5 月 25 日 0000 UTC(地方时约 14—18 时)共 4 h。等值线为区域内任一点周边 25 mile(40 km)范围内的灾害天气[龙卷风,冰雹直径 ≥ 1 in(2.54 cm),或者阵风 ≥ 50 节($25.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)]的概率:5%(棕色), 15%(黄色),30%(红色)和 45%(紫色)。影线区域内任一点周边 25 mile(40 km)的重大灾害天气[不小于 EF 2 级龙卷风,冰雹直径 ≥ 2 in(5.08 cm),或者阵风 ≥ 65 节($33.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)]概率不小于 10%。同期观测的灾害天气分布见图 6 中不同颜色符号(见左上角图例)。(b)截至 2010 年 6 月 15 日 0000 UTC 6 h 累积降水量大于 0.5 in(12.7 mm)QPF 概率展望预报。概率等值线:25%(轻微,白色), 50%(中度,黄色),75%(高,紫色)。填色区域为同期观测的大于 0.5 in(12.7 mm)6 h 累积降水量是(填色从 0.5 in 量级开始)。(c)2010 年 5 月 24 日 2100 UTC 有效的瞬时反射率因子 ≥ 40 dBZ 初步航空展望概率预报。概率等值线:25%(轻微,绿色)和 50%(红色,中度)。填色区域是同时观测到的反射率因子 ≥ 40 dBZ 区域[取自 Clark 等(2012b)]

Fig. 6 Forecast products issued in the 2010 Spring Experiment

(a) A preliminary (i. e., issued in the morning) severe weather outlook valid for the 4-h period 2000 UTC 24 May—0000 UTC 25 May 2010. Contours for 5% (brown), 15% (yellow), 30% (red), and 45% (purple) probabilities of severe weather (i. e., tornadoes, hail size ≥ 1 in, or wind gusts ≥ 50 kt) within 25 mi of a point are shown. Hatching marks areas with 10% or greater probability of significant severe weather (i. e., EF 2 or greater tornadoes, hail size ≥ 2 in, or wind gusts ≥ 65 kt) within 25 mi of a point. Locations of observed severe weather during the outlook period are marked (see legend in top left); (b) A QPF outlook for 6 h accumulated precipitation greater than 0.5 in. for the period ending 0000 UTC 15 June 2010. Contours for 25% (slight; white), 50% (moderate; yellow), and 75% (high; purple) probabilities are shown. Areas where observed precipitation was greater than 0.5 in. during the outlook period are shaded (first shading level is for 0.5 in.); (c) Preliminary aviation outlook for instantaneous reflectivity not less than 40 dBZ valid 2100 UTC 24 May 2010. Contours for 25% (slight; green) and 50% (moderate; red) are shown. Areas where observed reflectivity was not less than 40 dBZ at the valid time are shaded (from Clark et al, 2012b)

的灾害天气[龙卷风,冰雹直径 ≥ 1 in,或者阵风 ≥ 50 节($25.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)]的概率,概率等级划分为5%、15%、30%、45%和50%;同时还包含区域内任一点周边25 mile的重大灾害天气[不小于EF 2级的龙卷风,冰雹直径 ≥ 2 in,或者阵风 ≥ 65 节($33.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)]不小于10%概率区域预报。试验预报区域是一个大约 8° 纬度 $\times 14^\circ$ 经度的可变动区域(Clark et al, 2012b)。

选择“任一点周边25 mile范围”这一点对强对流天气预报非常重要,因为:(1)大气中中小尺度天气具有随机性,对流天气的第一天展望预报不可能做到“点对点”严格的准确预报,任选一张我国24 h雨量实况或雷达反射率因子图都可以看到雨带中点状分布的强降水中心随机性都很显著;(2)40 km半径是SPC经过预报实践和尺度理论思考后得到的,值得我国相关预报业务借鉴。

定量降水预报试验产品为1800—0000 UTC和0000—0600 UTC两个时段6 h累积雨量超过0.50 in(12.7 mm)和1.00 in(25.4 mm)的概率,预报区域同样是一个大约 8° 纬度 $\times 14^\circ$ 经度的可变动区域(图6b)。试验定量降水概率预报图形中标注轻微、中度和重度来分别表示25%、50%和75%概率,这与HPC业务发布的确定性定量降水预报产品有非常大的不同。试验图形中也会标注该预报区域内最大6 h降雨量超过1.00 in(约25 mm)的最大预报概率等值线,但如果该概率低于25%则不会标注(Clark et al, 2012b)。

航空天气预报试验产品覆盖区域为固定的美国中东部的空中交通繁忙地区,针对的是2100、2300和0100 UTC三个固定时刻的雷暴(定义为反射率因子 ≥ 40 dBz的)概率(图6c),概率等值线等级为25%、50%和75%,分别代表轻微、中度和重度雷暴覆盖范围。分散的或者线状对流风暴在预报图形中用虚线表示(Clark et al, 2012b)。

2013年的灾害天气试验预报产品可在以下网址查阅:http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring_2013/se2013_srvforecasts.php,这些试验产品的平均TS评分达0.21~0.23。

这些试验预报产品推动了美国SPC、WPC(2013年3月5日前称为HPC)、AWC相关产品的业务化或者改进提高。SPC于2012年9月26日正式发布增强的雷暴展望预报(Enhanced Thunderstorm Outlook)产品,针对的是预报区域内出现雷

暴的面积覆盖率或者任一地点出现雷暴的时间概率,产品有三个概率等级:10%、40%和70%(图7a)(<http://www.spc.noaa.gov/products/exper/enhntstm/>)。WPC目前发布72 h内逐6 h超过多个量级的6 h累积降水概率预报产品,具有多个概率等级(图7b);该产品基于多个确定性预报模式产品和NCEP短期集合预报(SREF)系统产品,确定性模式包括NCEP全球预报系统(GFS)、NCEP北美中尺度模式(NAM)、欧洲中心中期天气预报模式(ECMWF)等(http://www.wpc.ncep.noaa.gov/pqpf/conus_hpc_pqpf.php)。AWC则发布了CCFP和ECFP预报产品(图5)(<http://aviation-weather.gov/products>)。

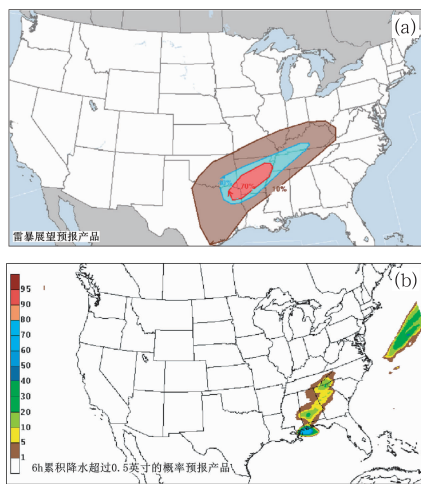


图7 (a)美国SPC发布的增强的雷暴展望预报产品(取自<http://www.spc.noaa.gov/products/exper/enhntstm/>); (b)美国WPC发布的6 h累积降水超过0.5 in的概率预报产品(取自http://www.wpc.ncep.noaa.gov/pqpf/conus_hpc_pqpf.php)

Fig. 7 (a) Enhanced thunderstorm outlook issued by SPC (from <http://www.spc.noaa.gov/products/exper/enhntstm/>); (b) probabilistic forecast products of 6 h cumulative rainfall over 0.5 in issued by WPC (from http://www.wpc.ncep.noaa.gov/pqpf/conus_hpc_pqpf.php)

2.2 春季试验模式指导产品

如前所述,2010年春季试验高分辨率模式CAMs的试验预报结果由CAPS、EMC、ESRL/GSD、NSSL和NCAR提供,预报区域是整个美国本土,具有基石作用的是CAPS提供的26个成员、4 km网格间距的多模式SSEF系统生成的预报产品和1 km网格间距的单模式预报产品(Clark et al, 2012b)。CAPS从2007年开始发展中尺度数值

模式集合预报系统 SSEF,从 2007 年的基于 WRF-ARW 单模式 10 个预报成员(Kong et al, 2011),发展到 2013 年具有多模式、多初始扰动、多物理过程、同化了雷达资料的 29 个预报成员的一个比较成熟的中尺度集合预报系统(Kong, 2013)。Xue 等(2011)和 Clark 等(2012b)分别对 2010 年春季试验中 CAPS 提供的和整体 CAMs 的预报结果进行了系统性总结。CAPS 的 SSEF 系统配置情况和预报产品可从以下网址获得:http://forecast.caps.ou.edu/SpringProgramYYYY_Plan_Brief.pdf(其中的 YYYY 代表年份,比如 2012 年)。

2013 年春季试验中应用的 CAMs 系统有: NS-SL-WRF、CAPS SSEF、SPC 机遇性风暴尺度集成预报(SSEO)(目前只有 9 个成员,利用现有的确定性数值模式预报结果进行集成)、AFWA(美国空军气象局)4 km 集合预报、英国气象局(UKMET)“对流可分辨”模式等(Jirak et al, 2013)。2013 年春季试验还使用了 18 km 分辨率的 NSSL 中尺度集合预报(NME)。2011 年春季试验基于 NSSL WRF 模式预报和 CAPS SSEF 集合预报系统的预报考察了对流初生概率预报的可行性,分析了模式中不同边界层参数化过程对对流初生预报的影响(Kain et al, 2013)。2013 年春季试验考察了在“对流可分辨”WRF-ARW 模式预报中的物理过程敏感性。最近,Clark 等(2014)总结了 10 年来 HWT 在评估 CAMs 模式方面取得的经验,包括模式预报结果的诊断、可视化和检验,集合预报结果诊断,模式初始场生成和资料同化技术,降水微物理过程和边

界层过程的敏感性,模式分辨率的敏感性等。

以下基于 Clark 等(2012b)等文献简介 2010 年春季试验中一些应用比较广泛和具有创新性的 CAMs 预报或者集合预报产品。

模拟的反射率因子场:包括集合平均产品、概率匹配产品、超过一定阈值的“面条”图、格点邻近反射率因子概率(计算每一网格点周围 40 km 范围内的反射率因子概率,40 km 范围取值与 SPC 业务展望概率预报产品的预报区域内任一点的影响范围相一致)等(Kong et al, 2011; Xue et al, 2011; Clark et al, 2012b)。

模拟的红外卫星图像(图 8):用 NSSL WRF 模式输出结果通过辐射传输模式生成卫星红外或者水汽通道图像。通过模拟的红外卫星图像动画,有助于预报员判断和识别大气中的动力过程和天气系统。从 2012 年起,CAPS SSEF 系统也生成并在网站提供模拟的卫星红外或者水汽通道图像产品(<http://www.caps.ou.edu/wx/hwt/>)。卫星和雷达图像的动画对于业务天气预报非常重要,如模式预报的最大反射率因子动画,有利于同实测卫星图像和雷达反射率因子动画的对比和在业务预报中快速捕捉天气系统的移动和发展以及重点预报关注区域。这方面工作我国也已开展了相关研究(张兴海等, 2014)。

逐时最大场(hourly maximum fields, HMFs):为了获取尺度小、变化快的天气系统在模式中的反映,Kain 等(2010)从模式预报的每个时间步的物理量场输出每个 1 h 时段内的每一个格点的物理量最

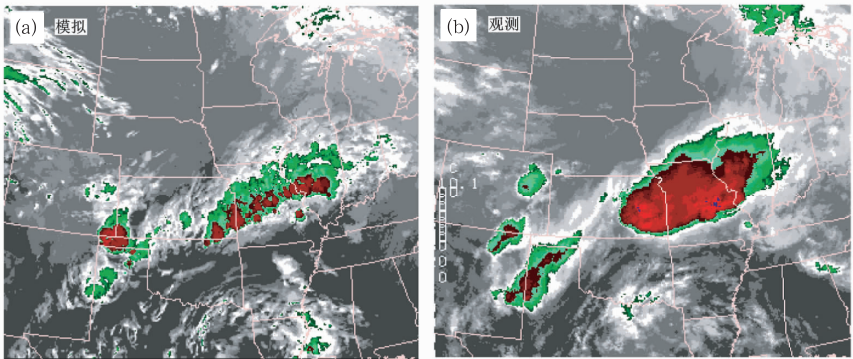


图 8 (a)模拟的红外卫星图像,(b)相应的 GOES 红外卫星图像
(取自 Clark 等, 2012b)

Fig. 8 (a) Model simulated infrared satellite imagery and (b) corresponding GOES infrared satellite imagery
(from Clark et al, 2012b)

大值,由此生成的二维格点场称为逐时最大场。这点类似于我国地面自动站分析中 10 min 最大风速分析等。春季试验的 SSEF 系统有 6 个最大场与模式中对流风暴强度关系密切,这些场是模式中风暴强度的直接表征:(i)最大上升气流;(ii)3~6 km 高度之间的最大下沉气流速度,这与强对流中气流翻转密切相关;(iii)表征对流强度的地面上空 1 km 高度的模拟最大反射率因子;(iv)最大上升气流螺旋度,为 2 和 5 km 高度之间垂直涡度乘以上升气流速度的积分,这用来识别模拟对流风暴中的中气旋;(v)最大地面 10 m 风速,这用来预报地面强阵风;(vi)最大垂直积分霰(或相当液态水深度,单位:mm),这可用于预报大冰雹(Clark et al, 2012b)。2014 年, NSSL 和 SPC 在春季试验中试验用于冰雹预报的基于高分辨率数值模式预报的最大冰雹尺寸预报产品(Clark et al, 2014)。需要指出的是,高分辨率数值模式逐时最大场是非常巧妙的设计,可迅速从模式预报的大数据中解读出强对流。但须强调区分以下概念:6 个最大场是模式大气中存在和达到强对流的表征,不是强对流的预报因子。

定量降水产品: SSEF 和 SREF 系统生成产品包括传统的集合平均、概率匹配集合平均、来自任何成员的最大 6 h 累积降水,以及 6 h 累积降水超过 0.5、1.0 和 2.0 in(分别为 12.7、25.4、50.8 mm)的传统(或基于格点)概率预报、格点邻近(网格点周围 40 km 范围)概率预报等,为春季试验提供定量降水产品(Clark et al, 2012b)。Johnson 等(2012)研究了对于集合预报降水的格点邻近(计算每一个格点周边 48 km(12 个模式格点)半径范围内的概率)和对流风暴对象概率预报的检验和校正方法。

航空产品:为给春季试验航空预报试验产品提供支持,基于 SSEF 系统生成了线状对流概率和雷暴高度预报产品。线状对流概率表示线状对流风暴的发生概率。线状对流识别算法是,首先识别数值预报模拟反射率因子超过 35 dBz 的区域,然后估算连续区域的平均长度与宽度比率,最后搜索比率大于 5:1 的区域。雷暴高度由模式预报的 18 dBz 反射率因子最大高度得到,然后计算雷暴高度超过 25000、35000 和 50000 ft(分别为 7620、10668 和 15240 m)的格点邻近概率(指的是计算每一个格点周边 40 km 半径范围内的概率)(Clark et al, 2012b)。

DTC 客观评估产品:用 MET 工具箱对春季试

验确定性模式产品和集合预报产品进行评估;重点使用 MET 工具箱中的 MODE(Method for Object-based Diagnostic Evaluation, 基于对象的诊断评价方法)工具进行模式检验评估;DTC 也给出了如 ETS(Equitable Threat Score 或者 Gilbert skill score)评分和偏差等传统评分(Clark et al, 2012b)。

2.3 春季试验高分辨率模式相关研究进展

从各个试验平台和 HWT 春季试验来看,不同类型天气的概率预报是 NOAA NWS 天气业务发展的重要方向,尤其是 SPC、WPC、AWC 的预报业务。高分辨率的“对流可分辨”数值模式、同化技术和数值预报应用技术是概率预报业务的技术基础。本节将列举与 HWT 春季试验相关的高分辨率数值模式的几个进展,而不是对美国高分辨率数值模式发展的全面总结。最近,漆梁波(2015)总结了高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展。

2.3.1 数值模式和同化技术进展

高分辨率数值模式水平分辨率继续提高。Xue 等(2014)使用 9 km、1 km、100 m、50 m 格距的四重嵌套 ARPS 模式、三维变分同化了雷达反射率因子和径向速度资料的初始场成功预报了 2003 年 5 月 8 日俄克拉荷马城超级单体龙卷的强度、结构和路径。英国气象局也正在发展水平分辨率达到 100 m 的高分辨率业务数值预报模式。

Gao 等(2013)发展了一个实时的天气自适应的三维变分分析系统,该系统同化分析结果实时应用到 2010 年 HWT 春季试验 EWP 中和多个强对流个例分析中。其主要功能包括:(1)结合多雷达观测与 NCEP 预报产品作为背景状态;(2)可基于当前天气状况以每 5 min 1 km 的水平分辨率实时自动识别和分析局地强对流天气事件;(3)具有识别雷暴系统内部强环流型特征的能力。

集合卡曼滤波(EnKF)和变分混合同化分析技术(Hamill et al, 2000)是当前观测数据、尤其是雷达数据同化分析的重要发展方向,目前已取得了很大进展,比如 Wang 等(2013)、Schwartz 等(2014)等。最近, CAPS 建立了多尺度并行集合卡曼滤波和变分混合同化系统,包括三维和四维集合卡曼滤波和变分混合同化技术(Xue, 2014),其中四维集合卡曼滤波和变分混合同化技术是在 ARPS 模式的同化系统下发展的,适用于雷达观测的反射率因子、

径向风资料同化(Liu et al, 2014)。

使用模拟静止卫星红外观测的方法评估了数值模式中的参数化过程对预报结果的影响。Cintineo 等(2014) 基于 2012 年 HWT 春季试验 SSEF 系统预报数据,通过合成的 GOES 红外亮温与观测相比较来评估 4 km 网格间距 WRF 集合预报中云微物理和行星边界层参数化方案是否具有能够准确地模拟云特征的能力;结果发现 Milbrandt-Yau 和 Morrison 微物理方案往往生成过多的高层云,而 Thompson 和 WDM6(Weather Research and Forecasting Model (WRF) double-moment 6-class)微物理方案生成的高云量不足。该研究表明数值模式中的这些参数化方案如何表示次网格尺度过程仍然有较大的不确定性。

Sun 等(2014)综述了使用数值模式进行对流性降水临近(0~6 h)预报的技术进展和面临的挑战,重点综述了基于雷达反射率因子资料的非绝热初始化同化技术、三维和四维变分同化雷达资料技术、EnKF 同化雷达资料技术等进展;并提出面临的挑战包括:对流性降水天气系统的可预报性、中尺度观测网的改进、资料同化技术和快速更新数值模式的改进等。

2.3.2 高分辨率数值模式产品检验技术进展

Xue 等(2011)给出了对于 2010 年春季试验 SSEF 集合预报产品的部分检验结果,如等级直方图(rank histogram)(Hamill, 2001)、ROC(Relative Operation Characteristic or Receiver Operating Characteristic,相对操作特征或者接收者操作特征)曲线检验等;Clark 等(2011)使用 ROC 曲线检验分析了 2009 年春季试验 SSEF 集合预报的定量降水概率预报产品对于不同集合预报成员数和空间尺度的预报技巧。

Johnson 等(2011a;2011b)利用模糊逻辑算法改进和发展了一个基于对象的层次聚类方法来对高分辨率数值模式降水预报结果进行评分,该评分被称之为“基于对象的 TS 评分”(Object-based Threat Score,OTS);他们利用 OTS 对 2009 年春季试验 SSEF 集合预报不同成员的降水预报评分结果进行了分析,发现雷达和自动站资料同化对降水预报的影响可达 12h。Johnson 等(2013a;2013b)分别对 2009 年春季试验 SSEF 集合预报结果和 2009—2011 年春季试验 WRF 1 km 格距和 4 km 格距降水预报结果使用基于对象的评分方法进行了检验评

估;检验结果表明 OTS 日变化特征与 ETS 的日变化较为一致,1 h 后的预报的对象数目少于观测;1 和 4 km 格距模式检验结果表明模式格距对于模式预报中最小的能够判识对象具有最大的影响;对于“对象”的平均方向和位置检验表明,不同的模式都没有显示出显著的优势。

Berenguer 等(2012)用 CAPS 2008 年 NOAA HWT 春季试验期间运行的风暴尺度集合预报系统生成的确定降水预报(4 km 网格)、加拿大全球环境多尺度模式(GEM)(15 km 网格)与 McGill 大学使用半拉格朗日外推的降水临近预报系统(MAPLE)的降水预报检验了对降水平均日变化的预报能力,结果发现 SSEF 系统的概率匹配产品更好地模拟了降水的日变化特征;同化了雷达资料的 SSEF 系统成员具有更好的降水预报能力,基本消除了降水预报前几小时的启动(Spinup)问题。

2.3.3 基于高分辨率数值模式预报和诊断产品进展

虽然“对流可分辨”模式具有模拟中尺度对流系统(MCS)的能力,但对 MCS 产生的强对流天气(如大冰雹、下击暴流导致的地面大风和龙卷风等)还缺少表达能力。Sobash 等(2011)使用“对流可分辨”高分辨率确定性模式预报的上升气流螺旋度(UH)极值场和高斯平滑算子得到了强对流天气的概率预报结果,用 ROC 和可靠性检验方法检验了概率预报结果,并在 2008 和 2009 年春季试验中进行了业务应用试验。Marsh 等(2012)提出了一种基于“对流可分辨”高分辨率确定性模式预报结果的罕见事件的校准概率预报的方法,基本原理是拟合数值模式历史误差空间特性的参数化核密度函数模型。

Clark 等(2012a)使用 NSSL 4 km 格距 WRF 3 年的 36 h 预报结果和 2010 年春季试验 CAPS SSEF 集合预报系统的小时最大上升气流螺旋度(UH)预报结果,应用三维(二维空间和时间)对象识别算法来诊断了 UH 对象和实测龙卷路径直接的关系,结果发现 UH 路径长度是预报春季龙卷爆发严重程度的非常具有预报技巧的因子。Clark 等(2013)使用 2011 年春季试验 CAPS SSEF 集合预报系统的 UH 预报结果更新了 Clark 等(2012a)的研究结果,进一步证明了 UH 路径对于龙卷预报的有效性。SPC 应用 SREF 和 SSEO 两个不同空间分辨率的集合预报系统生成的预报结果,结合不同类型强对流天气的环境条件和对流风暴属性来预报龙

卷、冰雹和雷暴大风的校准概率(Jirak, 2014); NS-SL 和 SPC 正在发展用于冰雹预报的基于高分辨率数值模式预报的最大冰雹尺寸预报产品(Clark et al, 2014)。

McCaul 等(2009)和 Fierro 等(2013)分别在 WRF 模式中发展了直接进行闪电模拟的计算方案,并在 HWT 的春季试验中进行了预报试验。Lynn 等(2012)使用 4 km 格距的 WRF 模式预报结果发展了一个用于预报云-地间和云间闪电的诊断量,该诊断量被称为位势电能(E_p)。 E_p 所表征的是,假定云中存在过冷液态水的情况下,霰和冰粒等碰撞所导致的非感应电荷分离过程所产生的电势能量。

3 讨论和结论

科研成果向业务转化、业务和科研紧密结合是一个巨大的系统性的工程,美国 NOAA 通过试验平台的形式积极支持和促进具有应用前途的科研成果向预报业务转化和业务试验向科研工作的反馈,既促进了气象业务发展,也提升了科研水平,取得了大量卓有成效的成果,目前试验平台已经成为美国气象事业发展不可分割的一部分(Ralph et al, 2013)。2013 年,以中小尺度强对流天气和暴雨业务预报应用研究为切入点,国家气象中心联合南京大学、中国科学院大气物理研究所和中国气象科学研究院通过暖季试验促进了部分科研成果的改进,探索了科研成果向业务应用转化的工作机制(张小玲等, 2015)。2014 年国家气象中心继续实施了该项探索性工作。

正如 Ralph 等(2013)指出的,试验平台仅仅是科研成果向业务转化、业务促进科研的一个桥梁,它并不是一个具体的实体组织,因此它处于核心业务工作和核心科研工作的外围,但它的作用非常重要和关键。实施科研成果向业务转化需要人员、资金和模拟业务环境的支持,但如何评估和评价一项科研成果(包括客观评估、主观评估、产品的易用性、科研成果与业务环境的衔接能力或者兼容性、可持续性)是其中最重要的方面。

通过 HWT、HMT、JHT 和 AWT 的业务试验和成果转化可以看到,发展强对流天气、定量降水预报、暴雨、热带气旋大风等的概率业务预报是美国 SPC、WPC、NHC 和 AWC 等美国 NCEP 下属业务中心的重要业务发展方向,其中“对流可分辨”的高

分辨率集合数值预报是发展精细化概率预报业务的重要核心技术支撑。高分辨率集合数值模式和同化技术的发展、检验和诊断预报技术的发展,是推动高分辨率集合数值预报业务应用的技术支撑。

美国试验平台试验应用和正在发展的数值(集合)预报模式指导诊断产品和预报检验技术值得我国相关天气预报业务借鉴,比如格点邻近概率产品、模拟红外卫星图像产品、逐时最大场产品等。GOES-R 卫星资料试验场的工作方式和成果也可为我国 FY-4(风云 4 号)卫星产品应用试验工作提供参考。

致谢: 本文在俄克拉荷马大学 CAPS 交流访问期间完成,感谢俄克拉荷马大学 CAPS、中国气象局和国家气象中心提供在俄克拉荷马大学 CAPS 交流访问的机会。

参考文献

- 漆梁波. 2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展. 气象, 待发表.
- 张小玲, 林建, 张涛, 等. 2015. 2013 年暖季试验概述. 气象, 41(5): 521-532.
- 张兴海, 端义宏. 2014. FY 2F 红外亮温资料模拟与偏差分析. 气象, 40(9): 1066-1075.
- Berenguer M, Surcel M, Zawadzki I, et al. 2012. The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part II: intercomparison among numerical models and with nowcasting. *Mon Wea Rev*, 140: 2689-2705.
- Bernardet L, Nance L, Demirtas M, et al. 2008. The Developmental Testbed Center and its winter forecasting experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 89: 611-627.
- Cintineo R, Otkin J A, Xue M, et al. 2014. Evaluating the performance of planetary boundary layer and cloud microphysical parameterization schemes in convection-permitting ensemble forecasts using synthetic GOES-13 satellite observations. *Mon Wea Rev*, 142: 163-182.
- Clark A J, Coniglio M C. 2014. Lessons learned from 10 years of evaluating convection-allowing models in the HWT. The 2014 Warn-on-Forecast and High-Impact Weather Workshop, Norman OK. <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/documents/workshop2014/>.
- Clark A J, Gao J, Marsh P T, et al. 2013. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity. *Wea Forecasting*, 28: 387-407.
- Clark A J, Kain J S, Marsh P T, et al. 2012a. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm applied to convection-allowing forecasts. *Wea Forecasting*, 27: 1090-1113.
- Clark A J, Kain J S, Stensrud D J, et al. 2011. Probabilistic precip-

- itation forecast skill as a function of ensemble size and spatial scale in a convection-allowing ensemble. *Mon Wea Rev.*, 139: 1410-1418.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. 2012b. An overview of the 2010 Hazardous Weather Testbed Experimental Forecast Program Spring Experiment. *Bull Amer Meteor Soc.*, 93:55-74.
- DeMaria M, Knaff J A, Knabb R, et al. 2009. A new method for estimating tropical cyclone wind speed probabilities. *Wea Forecasting*, 24:1573-1591.
- Fierro A O, Mansell E R, MacGorman D R, et al. 2013. The implementation of an explicit charging and discharge lightning scheme within the WRF-ARW model: Benchmark simulations of a continental squall line, a tropical cyclone, and a winter storm. *Mon Wea Rev.*, 141:2390-2415.
- Gao J, Smith T M, Stensrud D J, et al. 2013. A real-time weather-adaptive 3DVAR analysis system for severe weather detections and warnings. *Wea Forecasting*, 28:727-745.
- Goodman S J. 2013. GOES-R program GLM update, 2013 GLM Science Meeting, 2013, Huntsville, AL. <http://www.goes-r.gov/users/2013-GLM.html>.
- Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. 2013. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmos Res.*, 125-126, 34-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>.
- Goodman S J, Gurka J, DeMaria M, et al. 2012. The GOES-R proving ground: accelerating user readiness for the next-generation geostationary environmental satellite system. *Bull Amer Meteor Soc.*, 93:1029-1040.
- Grasso L D, Sengupta M, Dostalek J F, et al. 2008. Synthetic satellite imagery for current and future environmental satellites. *Int J Remote Sens*, 29:4373-4384.
- Hamill T M. 2001. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Mon Wea Rev.*, 129:550-560.
- Hamill T M, Snyder C. 2000. A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme. *Mon Wea Rev.*, 128:2905-2919.
- Jirak I. 2014. SPC ensemble applications: current status and future plans. 6th NCEP Ensemble User Workshop, College Park, MD.
- Jirak I, Coniglio M, Clark A, et al. 2013. Spring forecasting experiment 2013 preliminary findings and results. http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring_2013/HWT_SFE_2013_Prelim_Findings_final.pdf.
- Johnson A, Wang X. 2012. Verification and calibration of neighborhood and object-based probabilistic precipitation forecasts from a multimodel convection-allowing ensemble. *Mon Wea Rev.*, 140:3054-3077.
- Johnson A, Wang X. 2013a. Object-based evaluation of a storm-scale ensemble during the 2009 NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment. *Mon Wea Rev.*, 141:1079-1098.
- Johnson A, Wang X, Kong F, et al. 2011a. 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. *Mon Wea Rev.*, 139:3673-3693.
- Johnson A, Wang X, Kong F, et al. 2013b. Object-based evaluation of the impact of horizontal grid spacing on convection-allowing forecasts. *Mon Wea Rev.*, 141:3413-3425.
- Johnson A, Wang X, Xue M, et al. 2011b. 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. *Mon Wea Rev.*, 139:3694-3710.
- Kain J S, Coniglio M C, Correia J, et al. 2013. A feasibility study for probabilistic convection initiation forecasts based on explicit numerical guidance. *Bull Amer Meteor Soc.*, 94:1213-1225.
- Kain J S, Dembek S R, Weiss S J, et al. 2010. Extracting unique information from high-resolution forecast models: Monitoring selected fields and phenomena every time step. *Wea Forecasting*, 25:1536-1542.
- Kain J S, Janish P R, Weiss S J, et al. 2003. Collaboration between forecasters and research scientists at the NSSL and SPC: The Spring Program. *Bull Amer Meteor Soc.*, 84:1797-1806.
- Kong F. 2013. 2013 CAPS Spring Forecast Experiment Program Plan. http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring_2013/SpringProgram2013_Plan-v5.pdf.
- Kong F, Xue M, Brewster K, et al. 2011. Storm-scale ensemble forecasting for the NOAA hazardous weather testbed. 6th European Conf. on Severe Storms, ECSS 2011, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain. <http://www.essl.org/ECSS/2011/programme/presentations/171.pdf>.
- Landsea C, Murillo S. 2014. The Joint Hurricane Testbed. 94th American Meteorological Society's Annual Meeting, 2014, Atlanta, GA, USA. http://www.nhc.noaa.gov/jht/presentations/AMS2014_landsea-testbed.pdf.
- Liu C, Xue M, Kong R. 2014. Implementation and testing of the four-dimensional ensemble-variational (4DnVAR) hybrid algorithms within the ARPS data assimilation framework. The 2014 Warn-on-Forecast and High-Impact Weather Workshop, 2014, Norman, OK, USA. <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/documents/workshop2014/>.
- Loss G, Bernhardt D, Fuell K K, et al. 2009. An operational assessment of the MODIS false color composite with the Great Falls, Montana National Weather Service. Preprints, 23rd Conf on Hydrology, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, P4. 2.
- Lynn B H, Yair Y, Price C, et al. 2012. Predicting cloud-to-ground and intracloud lightning in Weather Forecast Models. *Wea Forecasting*, 27:1470-1488.
- Marsh P T, Kain J S, Lakshmanan V, et al. 2012. A method for calibrating deterministic forecasts of rare events. *Wea Forecasting*, 27:531-538.
- McCaul E W, Goodman S J, LaCasse K M, et al. 2009. Forecasting lightning threat using cloud-resolving model simulations. *Wea*

- Forecasting, 24:709-729.
- NAS. 2000. From research to operations in weather satellites and numerical weather prediction: Crossing the valley of death. The National Academies Board on Atmospheric Sciences and Climate Rep., 80. <http://www.nap.edu/catalog/9948.html>.
- Otkin J A, Greenwald T J. 2008. Comparison of WRF model-simulated and MODIS-derived cloud data. *Mon Wea Rev*, 136:1957-1970.
- Ralph F M, Dettinger M D. 2011a. Storms, floods and the science of atmospheric rivers. *Eos, Trans Amer Geophys Union*, 92: 265-266.
- Ralph F M, Dettinger M D. 2012. Historical and national perspectives on extreme West Coast precipitation associated with atmospheric rivers during December 2010. *Bull Amer Meteor Soc*, 93:783-790.
- Ralph F M, Intrieri J, Andra Jr. D, et al. 2013. The emergence of weather-related test beds linking research and forecasting operations. *Bull Amer Meteor Soc*, 94:1187-1211.
- Ralph F M, Sukovich E, Kiladis G N, et al. 2011b. A multiscale observational case study of a Pacific atmospheric river exhibiting tropical-extratropical connections and mesoscale frontal wave. *Mon Wea Rev*, 139:1169-1189.
- Rappaport E N, Jiing J G, Landsea C W, et al. 2012. The joint hurricane test bed: its first decade of tropical cyclone research-to-operations activities reviewed. *Bull Amer Meteor Soc*, 93: 371-380.
- Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. 2009. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *J Appl Meteor Climatol*, 48: 2543-2563.
- Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. 2011. Lightning and severe weather: a comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. *Wea Forecasting*, 26:744-755.
- Schwartz C S, Liu Z. 2014. Convection-permitting forecasts initialized with continuously cycling limited-area 3dvar, ensemble kalman filter, and "hybrid" variational-ensemble data assimilation systems. *Mon Wea Rev*, 142:716-738.
- Sobash R A, Kain J S, Bright D R, et al. 2011. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts. *Wea Forecasting*, 26:714-728.
- Sun J, Xue M, Wilson J W, et al. 2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges. *Bull Amer Meteor Soc*, 95:409-426.
- Wang X, Parrish D, Kleist D, et al. 2013. GSI 3DVar-based ensemble-variational hybrid data assimilation for NCEP global forecast system: single-resolution experiments. *Mon Wea Rev*, 141:4098-4117.
- Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. 1997. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon Wea Rev*, 125:527-548.
- Wolfson M M, Dupree W J, Rasmussen R, et al. 2008. Consolidated Storm Prediction for Aviation (CoSPA). Preprints, 13th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, New Orleans, LA, Amer Meteor Soc, J6. 5. https://ams.confex.com/ams/88Annual/techprogram/paper_132981.htm.
- Xue M. 2014. CAPS Warn on Forecast efforts. The 2014 Warn-on-Forecast and High-Impact Weather Workshop, 2014, Norman, OK, USA. <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/documents/workshop2014/>.
- Xue M, Hu M, Schenkman A D. 2014. Numerical Prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City Tornadoic Supercell and Embedded Tornado Using ARPS with the Assimilation of WSR-88D Data. *Wea Forecasting*, 29:39-62.
- Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. 2011. Realtime convection-permitting ensemble and convection-resolving deterministic forecasts of CAPS for the Hazardous Weather Testbed 2010 Spring Experiment. 24th Conference on Weather and Forecasting/20th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, WA, Amer Meteor Soc, 9A. 2.
- 2013 SPoRT Annual Report. 2013. <http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/sport/library/pdfs/annualBiennialReports/2013%20SPoRT%20Annual%20Report.pdf>.