

张小玲,林建,张涛,等. 2015. 2013 年暖季试验概述. 气象, 41(5):521-532.

2013 年暖季试验概述^{*}

张小玲 林 建 张 涛 孟庆涛 张润福 方 翀 李萍阳
郑永光 谌 芸 张芳华 杨 波 魏 丽 毕宝贵

国家气象中心,北京 100081

提 要: 2013 年,国家气象中心联合中国气象科学研究院、南京大学、中国科学院大气物理研究所开展暖季试验,探索业务单位与科研单位合作的新途径,以实现业务相关研究的促进并加速有应用前景的技术向业务转化。本文介绍支持暖季试验的仿真业务环境、强天气联合会商及凝练的科学技术问题以及新技术应用测试转化结果。通过暖季试验,搭建起能对业务数据和被测试转化成果产品实时保障的仿真业务数据环境、完全仿业务定量降水预报和强对流天气预报的仿真业务分析预报交互平台以及能实时评估业务数值模式和测试模式产品的客观检验系统。定期联合会商为预报员和科学家提供了面对面的交流平台,使得科学家更加了解业务需求并通过分析研究解决部分会商中提出的科学技术问题。新技术应用测试转化试验表明:高分辨率中尺度数值模式对提升强对流和暴雨天气的预报水平有积极意义,雷达风场反演技术、卫星天气应用平台对中尺度天气的快速分析有意义。而预报员与科技成果研发人员能否密切合作是影响科技成果业务转化的重要因素。

关键词: 暖季试验, 仿真业务环境, 联合会商, 新技术测试

中图分类号: P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.001

Overview of the Warm-Season Experiment in 2013

ZHANG Xiaoling LIN Jian ZHANG Tao MENG Qingtao ZHANG Runfu
FANG Chong LI Pingyang ZHENG Yongguang CHEN Yun
ZHANG Fanghua YANG Bo WEI Li BI Baogui

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The separation between operational forecasting and research has been a serious limitation for advanced techniques to be transferred into operation. The 2013 warm-season experiment, which was carried out by National Meteorological Centre (NMC) through collaborating with Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS), Nanjing University, Institute of Atmospheric Physics (IAP) of Chinese Academy of Sciences (CAS), mainly focuses on seeking a new cooperation mode between operation units and research institutions to inspire new initiatives for operationally relevant research and accelerate the transfer of promising new tools from research to operations. In this paper, the recurrence conjunctive discussion about severe weather events, the advanced techniques testing and the simulated operational environment for weather forecasting, which supports the experiment, are introduced. Based on this experiment, an operational simulation system including the real-time operational data flow and tested data flow supporting subsystem, the quantitative precipitation forecast and severe convective weather forecast platforms, the real-time model verification subsystem is built. The conjunctive discussion creates a face-to-face interview platform for forecasters and researchers, pushing forecasters to learn to address operational challenges from a more scientific perspective and researchers to understand more the operational needs and become

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430100)和中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013ZX-ZH1)共同资助
2014 年 9 月 5 日收稿; 2014 年 12 月 25 日收修定稿
第一作者:张小玲,主要从事暴雨和强对流预报方法和机理研究. Email:zhangxl@cma.gov.cn

better equipped to get over the application research problems proposed in the discussion. The advanced techniques testing shows that the high resolution mesoscale models are useful for severe convective weather and heavy rainfall operational forecasting, the radar wind retrieval technology and the satellite weather application platform are useful for quick analysis on mesoscale convective weather, and the cooperation between forecasters and researchers is the key factor for techniques to be transferred into operation.

Key words: warm-season experiment, operational simulation environment, conjunctive discussion, advanced techniques testing

引言

业务与科研的脱节,已经成为制约科技转化为生产力的重要原因。近年来,国内外的气象业务和科研单位都在致力消除业务与科研的隔阂,以中试基地(TESTBED)为组织,在业务或仿业务环境下开展各种新技术应用测试试验已经成为科技成果向业务转化、建立业务与科研桥梁的重要手段。

美国的国家海洋大气局(NOAA)成立了各种TESTBED,大部分在各专业中心开展。Ralph 等(2013)对近 10 年 NOAA 与其合作机构建立的 11 个 TESTBEDs 发生背景、起源、组织方式、取得的成就以及未来的发展进行了回顾,并指出:TESTBEDs 已经成为天气事业的一部分;他们已经发展、测试和转化的新技术、新方法正在影响着预报和预报的使用者。

Clark 等(2012)对 NOAA 的 HWT(Hazardous Weather Testbed)2010 年的春季试验进行了回顾。HWT 在每年强对流天气高发时段组织开展加密实时的联合预报试验和评估。每年的春季试验由 Storm Prediction Center (SPC) 和 National Severe Storms Laboratory (NSSL) 组织多个机构,测试那些意在提高灾害性中尺度天气预报的新理念和新技术。主要目的是通过强化的实时试验预报和评估,加快有前景的科研成果转化到业务中,并鼓励开展与业务相关的研究(Weiss et al, 2007)。HWT 的春季试验从 2000 年开始。通过春季试验,预报员学会从科学角度看待业务中的挑战,而科学家变得更加有准备去申请与业务相关的项目(Kain et al, 2003)。2003 年以来,测试高分辨率的允许对流的数值天气预报模式系统(convective-allowing models, CAMs)已经成为春季试验的常规内容。对于很多 SPC 的预报员,通过春季试验已经将 CAMs 很多指导产品集成于他们的日常业务指导产品中(Kain

et al, 2006)。2010 年的春季试验包括让预报员发现 CAMs 系统的业务应用可能、测试试验概率预报产品以及为模式研发人员提供对 CAMs 系统强弱的反馈意见。超过 70 个业务预报员、科学家、研究单位技术人员、研究生和管理人员参与了春季试验,并开展强对流、定量降水和航空天气概率预报,评估 CAMs 系统在对流风暴的初生、发展、模态、强度方面,雷暴概率预报方面,6 h QPF 预报方面能否提供有用的指导产品。

Edward 等(2012)对美国联合飓风中试基地(Joint Hurricane Testbed, JHT)近 10 年的发展、解决的核心关键应用技术问题进行了回顾。JHT 旨在将与热带气旋相关的研究转化为业务应用。2001—2010 年的 10 年间, JHT 支持了 62 个项目,其中大部分被应用于业务中。得益于业务模式和应用工具的提高,美国国家飓风中心(NHC)的业务预报从 3 天扩展到 5 天,路径误差显著减小。NHC 业务预报的进步不仅得益于数值模式的发展,技术上的改进使预报员能更方便获取信息,有更多时间思考预报,减少了预报产品制作时间。

美国气象界的各类中试基地及其开展的仿业务试验,加快了科技成果向业务的转化,对预报员了解并掌握前沿的科学技术起到非凡的作用。目前 TESTBEDs 已经成为美国气象事业不可分割的一部分(Ralph et al, 2013)。为了加快气象科研成果的转化,搭建科研与业务的桥梁,2013 年国家气象中心联合中国气象科学研究院、南京大学、中国科学院大气物理研究所开始尝试面向中小尺度灾害性天气的成果应用转化测试试验。我国的中小尺度灾害性天气主要表现为大风、冰雹、强雷电和强降雨。这些天气主要发生在暖季(4—9 月),其中 6—7 月更是全国强对流和暴雨的高发时段。为此,2013 年 6—7 月开展了面向强对流和暴雨的暖季试验,包括科学家和业务预报人员的强天气联合会商和在仿真业务环境下的新技术应用测试。

本文重点介绍支持暖季试验的仿真业务环境、暖季试验及其主要成果、暖季试验对业务科研的影响评价。

1 支持暖季试验的仿真业务环境

暖季试验设计的初衷是希望通过业务预报员与科学家的联合会商研讨与新技术应用测试,从业务中寻找科学问题并联合分析研究解决部分问题,促进科研成果的改进和业务转化的良性循环,逐步实现对预报员科学素养的培养以及科研成果的业务应用推广。

为了保证暖季试验的顺利进行,2013 年在国家气象中心初步建成了一个集天气预报技术研发与成果转化一体化的综合平台,包括仿真业务数据和科研数据、检验系统和仿真业务平台。图 1 为支持暖季试验的科研和成果转化平台的设计思路 and 核心系统。平台包括支持科学研究和支持科研成果业务转化两部分。支持科学研究部分将通过暖季试验中的联合会商发现业务中面临的科学问题和应用技术问题;科学家与预报员联合的研究队伍开展研究并在仿真业务环境下应用测试转化后进入业务系统,支持业务预报。支持科研成果转化部分则将通过暖季试验的新技术应用测试,将遴选的有业务应用前景的科研成果在仿真业务环境下应用和主客观评估,并通过适应业务需求的改进和完善进入业务系统,支持业务预报。

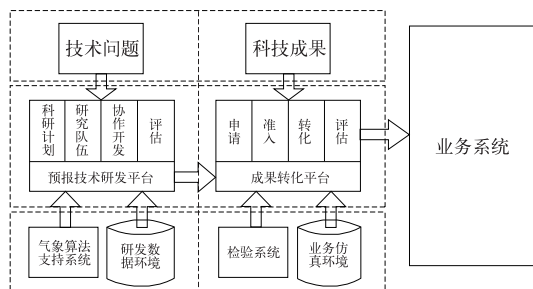


图 1 科研和成果转化平台概略图

Fig. 1 Schematic diagram of research and transition platform

2013 年暖季试验面向中小尺度对流天气开展。为此,与强对流和定量降水预报业务完全相同的仿真业务平台部署在中央气象台会商室东侧。这个仿真的业务环境,能实时获取中央气象台强对流和定量降水业务预报相同的数据支持,也能实时获取测

试产品数据,形成一个独立的环境支持研究人员与业务预报人员讨论他们感兴趣的问题。此外,仿真业务环境还包括一个能实时定量检验业务数值模式和被测试模式的客观检验系统,提供国内外主流业务模式、暖季试验中被测试模式的降水预报产品和预报员的定量降水预报产品的对比评估。

2 暖季试验

2013 年 6—7 月,国家气象中心联合中国气象科学研究所、南京大学、中国科学院大气物理研究所开展面向中小尺度对流天气的暖季试验,包括每周的强天气(强对流和暴雨天气)过程定期会商讨论以及来自南京大学、中国气象科学研究所、国家卫星气象中心的研究成果在仿真业务环境下的应用测试。

2.1 强天气联合会商

2013 年 6—7 月每周五上午,预报员和科学家在中央气象台会商室会商研讨过去一周的强对流和暴雨天气。来自中国气象科学研究所、大气物理研究所、南京大学、北京大学、干部培训学院、马里兰大学、俄克拉荷马大学等 12 所高校和科研院所的科学家 38 人次,国家气象中心、北京市气象局和天津市气象局的预报员约 300 人次参与了会商讨论。

在联合会商中,对过去一周强对流和中尺度暴雨天气的特点及预报情况、新技术应用情况进行分析研讨。预报员针对每个讨论的强天气过程提出预报难点、物理机理和模式应用困扰。科学家与预报员共同讨论这期间发生的二十余次强对流和暴雨天气过程。讨论的内容包括我国第二级阶梯的高海拔地区强对流天气的探空特征、华北地区干环境下对流的发生发展机制、盛夏副热带高压(以下简称副高)控制下强对流产生原因、暖区暴雨尤其华南地区短时强降水的落区预报着眼点、四川盆地降水强度和落区预报等。通过交流,科学家深入了解了业务预报的需求;预报员及时查找预报得失及其原因,了解新资料、新技术的应用效果,提高他们对强天气发生发展过程的认识以及新技术的应用能力。针对会商中的预报困惑和共性问题,积云参数化过程在数值预报中的局限性、NOAA 灾害性天气试验平台春季试验及其对流尺度集合预报、最新版本的业务中尺度模式 GRAPES-Meso 的特点等专门科学讲座顺势举行,加深了预报员了解不同尺度数值模式的

特点和应用局限。

强天气联合会商中共提出预报和机理问题 30 个,包括:蒙古高原上雷暴大风的形成机制及其层结廓线特征、副高边缘和副高控制范围内大范围短时强降水的形成机制、弱的热带系统降雨预报思路等问题。其中与短时强降水预报有关的问题 14 个,与雷暴大风和冰雹预报有关的问题 9 个,与暴雨有关的问题 6 个(图 2)。

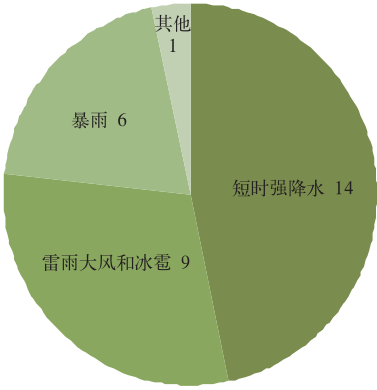


图 2 强天气联合会商的预报问题分类
(标值表示问题个数)

Fig. 2 Forecasting problem categories from
severe weather joint discussion
(The marked values represent numbers of problems)

2.1.1 联合会商中提出的科学技术问题

在深入讨论的基础上,结合国家级以中短期预报为主的强天气业务预报和科学认识的需求,这 30 个问题被归纳为四类科学技术问题。

科学问题 1:产生不同类型强对流天气的环境场条件。

2013 年 6 月 11 日北京城区冰雹过程漏报,6 月 2、3、6 和 23 日华北雷暴大风过程漏报和 6 月 8 日(图 3a)贵州西南涡暴雨中、6 月 9 日华南暖区暴雨中雷暴大风空报的例子都表明如何判定干环境下对流天气中的冰雹、大风落区以及深厚湿对流中的雷暴大风仍然是业务预报的难点之一。这一类天气通常都有较明显的天气尺度系统影响,预报中触发机制易于发现,难点在于如何通过环境场条件细分强对流的类型(雷暴大风、冰雹或短时强降水)。

以 6 月 8 日为例,受西南涡和高空槽影响(图 4),西南东部和华南北部、华北局部地区出现了对流性的短时强降水天气。预报员空报了西南涡影响区域的贵州和高空槽影响下的河北北部强对流(雷暴大风或冰雹)(图 3a)。在大尺度强迫明显的

条件下,贵州西部温度垂直递减率大(图 5a)、河北西北部上干下湿的层结不稳定和垂直风切变大(图 5b)是预报员判断局地有雷暴大风或冰雹可能的重要原因。该次空报凸显出在业务中对强对流发生的热力和动力条件量化判断尚不足。

从这些预报实例中可以归纳出的预报业务难题有:(1)干环境下的对流大风、高地形地区的雷暴大风和湿对流区雷暴大风预报的异同点;(2)冰雹落区及大小直径的预报。

为解决这些预报难题,预报业务所期待的技术包括:(1)在北方第二阶梯地形下,在干环境下能有效区分弱对流甚至无对流与发生对流性大风的环境场条件预报指标;(2)湿环境下短时强降水天气中有无雷暴大风的环境场条件预报指标;(3)根据环境场条件估算雷暴中上升速度以应用于冰雹直径预报的技术方法;(4)高海拔地区表征热力、水汽条件的对流参数体系,如通过地形订正后的对流有效位能(CAPE)、最有利抬升指数(Best Lifting Index, BLI)和整层可降水量(Precipitable Water, PWAT)及其阈值。

科学问题 2:各类强对流天气的非天气尺度抬升条件和触发机制。

在这类问题中重点考虑地形抬升触发机制和中小尺度抬升触发机制。6 月 4 日北京地区短时强降水过程漏报、6 月上旬华南副高边缘短时强降水过程屡次空漏报以及 6 月多次四川盆地西缘强降水量级预报偏差大均反映出对中小尺度抬升触发条件和特殊地形强迫的认识不足。这一类天气预报中相对容易分析的部分在于环境场热力条件,通常都具备较明显的不稳定和水汽条件,而难点在于天气尺度强迫弱,目前探测手段在短期时效内无法识别中小尺度触发或地形抬升强度。7 月 30 日预报员漏报了午后浙江沿海出现的短时强降水和局地雷暴大风天气(图 3b)。这次强对流天气发生在副高控制范围内(图 4b),湿热条件非常有利于强对流的发生(图 5c)。其预报难点正是在 6 h 外难以监测到由于海陆热力差异导致的偏东气流与偏西气流产生的边界层辐合线,数值模式也无法对这类局地的抬升触发条件有效模拟。

从此类天气的预报实例中归纳出的科学技术问题有:(1)弱天气尺度强迫、高暖湿层结的副高边缘或内部、华南沿海、四川盆地及西缘的短时强降水过程的非天气尺度系统触发机制;(2)不明显北方短

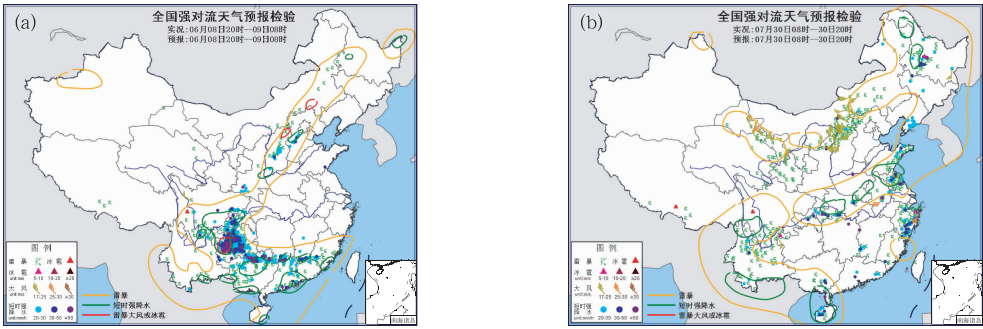


图 3 2013 年(a)6 月 8 日 20:00 至 9 日 08:00,(b)7 月 30 日 08:00—20:00
全国强对流天气预报(彩色实线)及实况

Fig. 3 Severe convective weather forecast (color solid lines) and observation in China in the periods
(a) from 20:00 BT 8 to 08:00 BT 9 June and (b) from 08:00 BT to 20:00 BT 30 July 2013

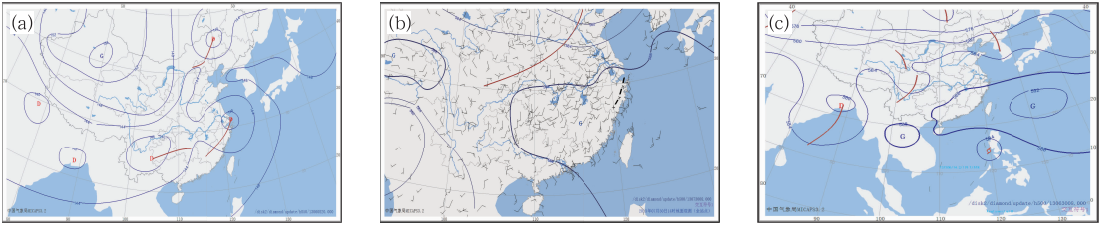


图 4 2013 年(a)6 月 8 日 20:00 850 hPa、(b)7 月 30 日 08:00 和(c)6 月 30 日 08:00 500 hPa 天气图
(风标表示 7 月 30 日 14:00 地面风)

Fig. 4 Synoptic plots at (a) 850 hPa at 20:00 BT 8 June, (b) 500 hPa at 08:00 BT 30 July
and (c) 500 hPa at 08:00 BT 30 June 2013
(Flags represent surface wind at 14:00 BT 30 July)

波槽触发的对流天气预报;(3)副高控制下热对流发展为深对流,产生大风和大暴雨的触发机制。

为解决这些预报难题,预报业务所期待的技术包括:(1)弱天气尺度强迫下,盛夏副高控制的南方地区、西南地形复杂地区(包括四川盆地及其西缘和贵州等地)触发暴雨/短时强降水的抬升条件识别技术;(2)叠加在长波上的不明显短波槽的识别技术及其触发对流能力的判别技术。

科学问题 3:中尺度对流系统产生不同对流天气(雷电、大风、冰雹、暴雨)的云物理机制及其环境条件。

这类问题部分可以从 6 月上旬末期北京地区短时强降水过程先后漏空报、7 月 24 日东北冷涡降水过程和 6 月中旬热带气旋系统降水等例子中得到反映。在强对流预报业务实践中主要的难题不仅限于对流条件的分析,还与云物理机制有重要的关系。

从此类天气的预报实例中归纳出的科学技术难题有:(1)、(2)非对流或弱对流产生小时雨强 20 mm 以上的短时强降水的云物理机制;(3)无雷暴伴随的对流性强降水发生发展的云物理特征;(4)主导强雷

电、冰雹、雷暴大风的物理机制及云物理过程。

为解决这些预报难题,预报业务所期待的技术包括:(1)不同天气形势下雷电预报的环境场条件指标;(2)稳定性降水过程小时雨量超过 20 mm 的预报指标;(3)无雷电伴随的短时强降水的环境场条件预报指标;(4)判别冰雹、大风的与云物理过程相关的产品(卫星、雷达、数值模式中粒子相态特征)。

科学问题 4:对流性暴雨(大风冰雹为主的强对流中伴随暴雨)和局地突发性暴雨落区预报以及极端强降水(如 24 h 100 mm 以上的降水)定量预报相关的数值模式释用技术。

6 月初华北几次强对流天气过程中的短时强降水天气、7 月中下旬华东沿海副高控制下的局地短时强降雨、6—7 月西南地区几次持续性暴雨天气过程即分属于上述三种类型。数值模式对前两类暴雨的预报能力非常有限。7 月 30 日华北和东北的对流性短时强降水、浙江沿海的局地突发性暴雨(图 3b)漏报就是这种情况。在 6 月 30 日 08 时起报的 24 h 定量降水预报中,同时面临局地突发性暴雨预报和西南地区持续性暴雨预报的挑战。从图 6a

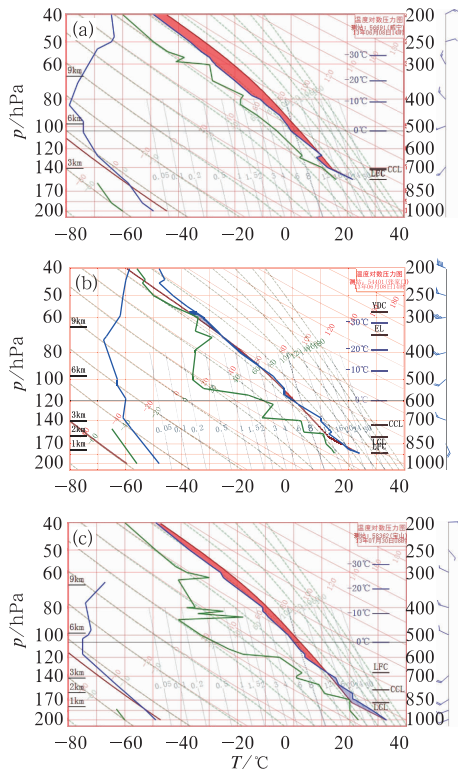


图 5 2013 年 6 月 8 日 14:00(a)贵州威宁、
(b)河北张家口、(c)7 月 30 日 08:00
上海宝山 T - $\ln p$ 图

Fig. 5 T - $\ln p$ plots at (a) Weinig of Guizhou,
(b) Zhangjiakou of Hebei at 14:00 BT 8 June 2013 and
(c) Baoshan of Shanghai at 08:00 BT 30 July 2013

可见,预报员对四川盆地的暴雨和大暴雨位置预报偏西,而安徽南部的局地暴雨和大暴雨则完全漏报。四川盆地为西南涡影响下的持续性暴雨天气,而安徽南部则是副高边缘午后发生的突发性暴雨天气(图 4c)。前者降水从 6 月 29 日夜间开始,一直持续至 7 月 2 日。后者则发生在 6 月 30 日午后的 3 h 以内。参考数值模式的结果,预报员对四川盆地的大暴雨发生的位置估计明显比实况偏西,安徽南部突发性暴雨则完全漏报(图 6)。

数值模式对西南地区的持续性暴雨的预报技巧相对较高。但大尺度模式(如 T639、EC)对极端暴雨[如 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 以上的降水]的位置及量级预报上与实况偏差明显,而业务中尺度模式(如 GRAPES-Meso)虽然对这类暴雨的量级预报较大尺度更好,但雨带通常较实况偏窄,且位置预报存在较大不确定性。数值模式对四川盆地这类持续性暴雨的预报能力相对突发性暴雨更强。对于这类持续

性强降水,预报员在使用数值模式产品时,需要面临如下问题:西南涡影响下的暴雨天气,有明显天气系统影响的暴雨过程,如何对数值模式结果(形势场、物理量、降水等)订正? 如何对模拟的强降水的位置和强度订正? 不同分辨率模式对对流降水和非对流降水产品在不同类型天气条件下的规律及应用于定量降水预报的指标。

数值模式对安徽南部这类局地突发性暴雨的预报能力相对较弱。从图 6 可见,仅有 T639 和南京大学参加暖季试验的 4 km WRF 做出了暴雨以上量级的强降雨预报。预报员在开展突发性暴雨天气预报时需要回答如下问题:雷暴大风冰雹为主的强对流中出现暴雨的关键条件、预报指标是什么? 湿程度如何? 与云物理过程有关系吗? 从这类暴雨中发现,如下科学技术问题有待解决:(1)湿对流中大暴雨出现的关键条件;(2) $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上雨强出现的条件;(3)中尺度对流系统持续的物理机理;(4)何种时空分辨率的观测和数值模式具备对局地突发性暴雨的预报能力;(5)可预报性与系统尺度(生命史和影响范围)的关系;(6)如何通过集合预报产品的释用技术提高局地突发性暴雨和极端暴雨的预报能力。

2.1.2 联合研究

针对会商中提出的科学问题,国家气象中心分别与中国气象科学研究院、南京大学和中国科学院大气物理研究所根据参与暖季试验的科学家的优势研究方向,组成三个联合研究小组,分别从新型观测资料的分析应用、强对流机制以及暖区暴雨机制三个方面开展分析研究。Luo 等(2014)、Wang 等(2014)通过对梅雨锋面南侧暖区里引发极端强降水的线状中尺度对流系统(MCS)发生发展过程分析,在 Doswell 等(1996)提出的单体列车效应上,指出雨带列车效应是局地极端强降水发生的直接原因(图 7)。

中国科学院大气物理研究所孙建华等(2014)对 2009 年 6 月 3 日飚线过程中水汽作用进行了敏感试验。结果表明,中层(700~500 hPa)的干空气有利于线状回波和雷暴大风的形成;对流层低层(700 hPa 及以下)的湿空气有利于对流的发展;中层的干空气对雷暴高压的增强、地面风速的增强有重要作用;减少 700 hPa 以下水汽不利于雷暴高压和

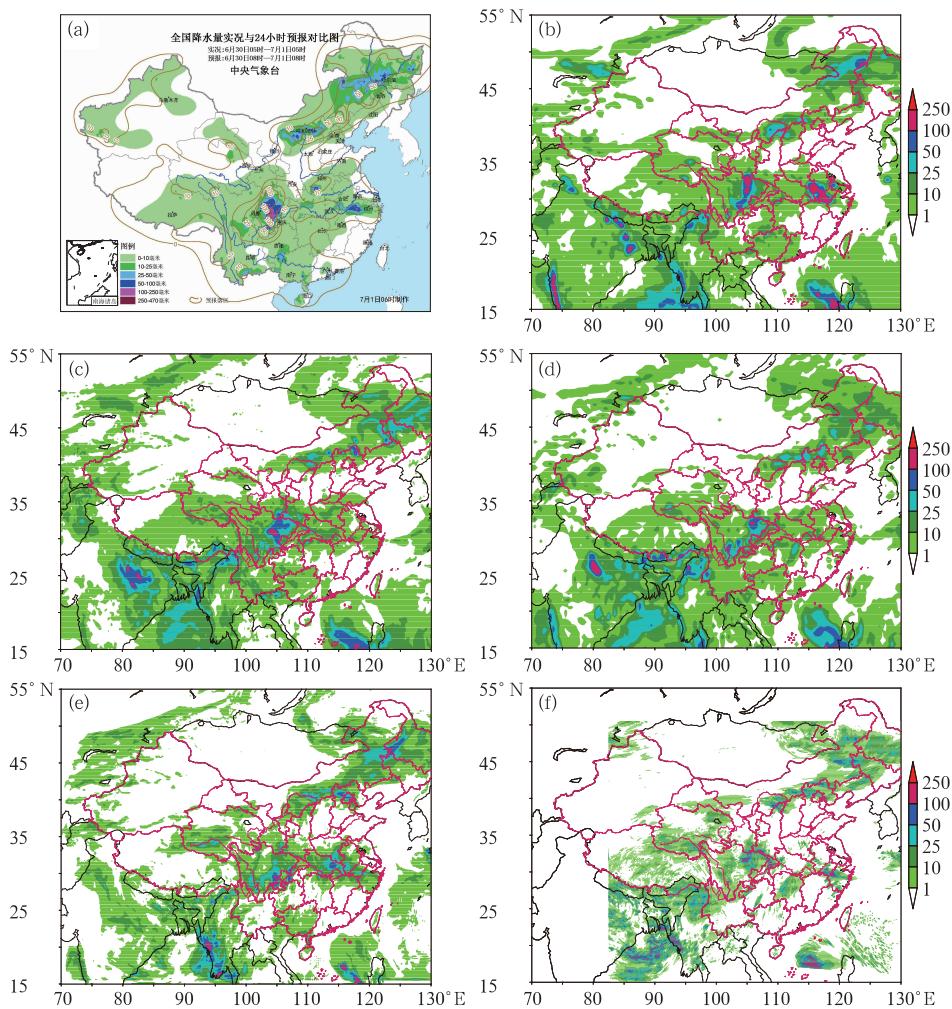


图 6 2013 年 6 月 30 日至 7 月 1 日 08:00 24 h 降水量预报
(a) 预报员预报(等值线), (b) T639, (c) EC, (d) NCEP, (e) GRAPES-Meso 和
(f) 4 km WRF 6 月 29 日 20:00 起报的 36 h 时效的预报
(a 中阴影为截止到 05:00 的观测降水)

Fig. 6 24 h accumulated precipitation forecast ending at 08:00 BT 1 July 2013
(a) forecast by forecasters (contours), (b, c, d, e, f) 36 h forecasts by (b) T639, (c) EC,
(d) NCEP, (e) GRAPES-Meso and (f) 4 km WRF beginning at 20:00 BT 29 June, respectively
(Shadings in Fig. 6a represent observed 24 h precipitation ending at 05:00 BT)

地面大风的增强。通过研究,他们进一步指出,大气中水汽的含量和垂直分布对强对流系统的发生发展有重要影响,而水汽的测量误差又很大,因此,提高数值模式对初值水汽分析的准确率非常重要。

2.2 新技术测试

新技术测试的终极目标是实现科研成果向业务转化。这需要成果转化流程的规范化、标准化。天气预报科研成果的业务转化包括申请、业务应用测试转化、准业务化、业务准入四个环节的工作流程。其中业务应用测试转化需要科技成果的研发人员、

业务预报员以及支持业务环境的信息技术人员通力合作,而在申请和业务准入方面则需要气象职能部门参考科学委员的意见和建议规范化管理。

现阶段,面向中小尺度对流天气预报的应用研究有限,从应用到业务转化和业务准入的规范化、标准化流程尚不可能完整实施。2013 年暖季试验中,我们重点考虑通过新技术测试应用促进科研成果的改进,培育有业务应用前景的科技成果。应用测试转化以预报员和研究人员合作为主,在仿真业务环境下应用测试并评估,科技成果的研发人员根据测试意见和评估结果进行适应业务需求的改进完善。

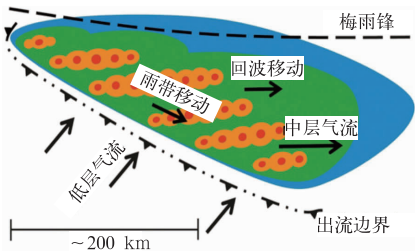


图 7 引发极端强降水的线状 MCS 后向发展以及回波和雨带列车效应概率图

[橘色、绿色、蓝色阴影分别表示雷达回波值为 50、35 和 25 dBz(引自 Luo et al, 2014)]

Fig. 7 Schematic diagram of the backbuilding, echo training, and rainband training associated with the quasi-linear-shaped, extreme-rain-producing MCS (Shadings in orange, green, and blue represent radar reflectivity values of 50, 35, and 20 dBz, respectively, cited from Luo et al, 2014)

2013 年参加测试的项目包括来自南京大学的 4 km WRF、中国气象科学研究院的雷达风场反演技术、国家卫星气象中心的卫星天气平台 SWAP (表 1)。4 km WRF 与业务中尺度模式 15 km 的 GRAPE-Meso 并行测试,其目的是提高预报员对高分辨率数值模式的应用能力、评估模式的预报能力,为业务中尺度模式的改进提供意见和建议。对雷达风场反演技术反演的 10 min 分辨率的雷达风场和卫星天气平台的应用测试,目的是提高预报员利用遥感探测资料提高中尺度快速分析能力,将成熟先进的技术引进集成于业务分析预报平台(如 MICAPS)。

2013 年夏季,测试组 25 人次对 6—7 月的 20 多次强对流和暴雨天气过程进行测试,并通过联合会商就测试项目存在的科学性、时效性、针对性和量化问题以及可能的解决方法提出改进建议 24 条。部分问题得以及时改进,形成业务与科研的良性互动。

表 1 2013 年新技术测试内容和目的

Table 1 Items and objectives of the 2013 high advanced technology test			
模式/技术	提供单位	产品分辨率	测试目的
高分辨率数值模式 WRF	南京大学	4 km · h ⁻¹	通过与业务中尺度模式 GRAPES-Meso 并行测试,(1)为最终改进业务中尺度模式提供意见和建议;(2)提高业务预报员对高分辨率数值模式的解释应用能力
雷达风场反演技术	中国气象科学研究院	1 km · (10 min) ⁻¹	(1)反演风场对中尺度分析业务的提升能力;(2)通过测试转化改进后,集成业务分析预报平台 MICAPS
卫星天气应用平台 SWAP	国家卫星气象中心	30/15 min	提高业务预报员基于卫星资料的中尺度快速分析能力

表 2 中尺度数值模式并行测试的主观测试个例

Table 2 Subjective testing cases for mesoscale numerical model parallel test		
个例时间	强天气发生区域	个例简介
6 月 4—5 日	华北	冷涡后部西北气流下的雷雨大风冰雹天气
6 月 8—9 日	四川南部、重庆、贵州	低层涡旋影响下的短时强降水和雷暴天气
6 月 11—12 日	广东、福建沿海	高空槽影响下(强强迫形势)的短时强降水
6 月 18—19 日	四川盆地西北部	高空槽和低层切变影响下的暴雨
6 月 19—22 日	四川西部	高空槽和低层涡旋影响下的暴雨
6 月 26—27 日	长江中下游、江南	锋面系统影响下的暴雨
6 月 29 至 7 月 1 日	四川盆地	高空槽和低层涡旋影响下的暴雨
7 月 1—2 日	华北	东北冷涡影响下的短时强降水
7 月 8—9 日	四川盆地西部	高空槽和低层切变影响下的暴雨
7 月 8—10 日	华北	低层切变和地面辐合线影响下的暴雨
7 月 12—14 日	华北南部、黄淮北部	高空槽、低层切变影响下的暴雨
7 月 17—18 日	四川盆地	高空槽、低层涡旋影响下的暴雨
7 月 18—20 日	华北南部、黄淮、江淮	低涡切变影响下的暴雨
7 月 21—22 日	西北部、华北	低涡切变影响下的暴雨

2.2.1 中尺度模式并行测试

中尺度模式并行测试包括对 4 km WRF 和 15 km GRAPES-Meso 在强天气过程的主观测试评估

和客观统计检验。

预报员主观检验了 14 次强天气过程(表 2),包括暖区雷暴天气、高空槽和低层涡旋影响下的强降

水天气、强强迫形势下的短时强降水天气、长江中下游地区准静止锋降水过程以及东北冷涡影响下的短时强降水和雷暴天气过程。测试评估内容包括模式在这些强天气过程中的降水、动力和热力场的预报性能(表 3)。

表 3 中尺度数值模式并行测试的主观测试评估内容

Table 3 Subjective testing and evaluating items in mesoscale numerical model parallel test	
测试项目	具体内容
降水	24、12 和 6 h 累积降水量预报位置和量级
动力场	500 hPa 风场、高度场和槽线;700、850 和 925 hPa 风场、切变线;10 m 风场;海平面气压
热力场	低层比湿(700、850、925 hPa)、CAPE、K 指数、2 m 温度

14 次强天气过程的主观评价表明,GRAPES-Meso 地面温度预报存在系统性偏高,在强对流过程中降水落区预报较好,但在湿度预报上存在较大偏差;对降水、动力、热力场的预报不稳定,且无系统偏差,如何在业务预报中对模式结果进行参考、订正将需继续测试应用。4 km WRF 对雨带位置预报较好,但强降水位置有偏差,且较实况偏强,尤其是 6 h 时效内的预报;其动力场也表现出同样特征:位置预报较好,但动力、热力指数(如 CAPE、K 指数)较实

况偏强。

图 8 给出了 6—8 月并行测试的中尺度模式与业务主流参考的大尺度模式预报的 24 h 累计降水 TS 统计检验结果。中尺度模式在小雨和暴雨以上的强降水预报能力优于全球模式,尤其 4 km WRF 在大暴雨以上的预报优势明显,但在中雨和大雨的预报上则不如全球模式。

2013 年 6—7 月西南地区出现多场持续性暴雨过程,华北则在 6 月和 7 月初以对流性降水为主。

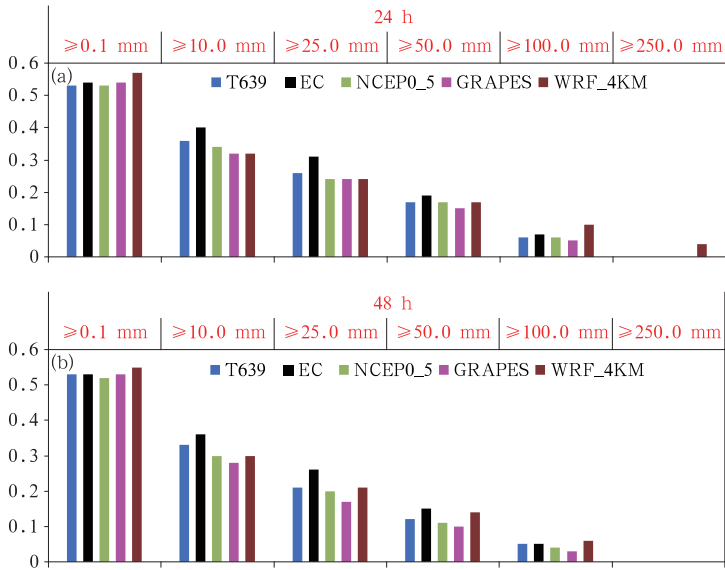


图 8 2013 年 6 月 5 日至 8 月 31 日 20:00 起报的(a)24 h 预报时效、(b)48 h 预报时效的 24 h 累计降水 TS 评分 [T639、EC、NCEP0_5、GRAPES、WRF_4KM 分别表示业务全球模式 T639 39 km 水平分辨率产品、欧洲中心全球模式 0.25°×0.25°水平分辨率产品、美国环境预报中心(NCEP)全球模式 0.5°×0.5°水平分辨率产品、业务中尺度模式 GRAPES-Meso 15 km 水平分辨率产品和南京大学 WRF 模式 4 km 水平分辨率产品]

Fig. 8 Threat score (TS) of 24 h accumulated precipitation forecast for (a) 24 h and (b) 48 h valid time beginning at 20:00 BT during the period from 5 June to 31 August 2013

(T639, EC, NCEP0_5, GRAPES, and WRF_4KM represent the products from 39 km horizontal resolution operational global model T639, ECWMF 0.25°×0.25° horizontal resolution global model, NCEP 0.5°×0.5° horizontal resolution global model, 15 km horizontal resolution operational mesoscale model GRAPES-Meso and Nanjing University 4 km horizontal resolution mesoscale model, respectively)

对这两个地区的降水统计检验显示(图 9):WRF 在西南地区的降水预报中优势明显,而 GRAPES-Meso则对华北对流性降水预报能力更强。对于对流性降水,中尺度模式较大尺度模式更具有优势,这在 6 月华北地区的暴雨以上降水的 TS 评分中表现得十分清楚(图 9a)。

2.2.2 雷达风场反演技术

雷达风场反演技术应用测试评估包括对 11 次强天气过程的主观定性评价和客观对比定量检验。涉及的强天气过程包括华北和华东沿海局地强对流、四川盆地西南涡影响下的持续性暴雨、长江流域梅雨锋暴雨、台风暴雨。主观评估结合雷达回波和探空资料重点对特定高度层的辐合、辐散特征进行

分析评估,结果表明:雷达反演风场产品具有较高的时空分辨率,能有效地识别辐合辐散特征,较好地反映出对流系统内部的风场结构特征。图 10 为 2013 年 7 月 15 日台风温比亚影响期间,华北南部出现暴雨天气时反演风场有效反映出中、低层辐合、高层辐散特征。

由于本次测试的雷达风场反演技术采用能适应业务资料特点和时效要求的单雷达三维变分反演技术(Qiu et al, 2006; Shao et al, 2004; 张勇等, 2011),风场客观定量评估主要选取能进行双雷达反演的个例进行对比分析。两者反演的水平风速、水平风向的均方根误差统计结果显示:强天气过程的水平风速均方根误差在 4 m 左右,对流越强,风速

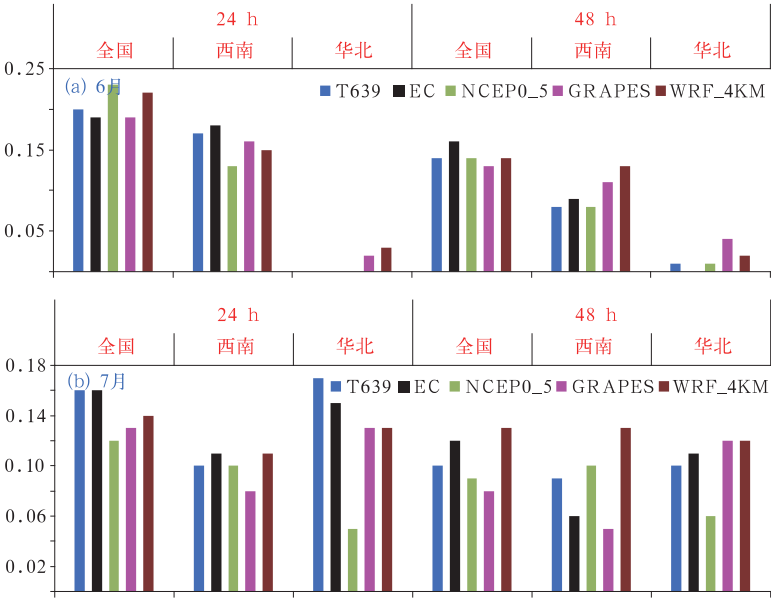


图 9 2013 年 6 月(a)、7 月(b)20:00 起报的 24 h 累计 50 mm 及以上降水分区域 TS 评分
(图中 24 和 48 h 分别表示 24 和 48 h 预报时效,其他同图 8)

Fig.9 Threat score (TS) of 24 h accumulated precipitation forecast over 50 mm in different regions
(24 h and 48 h represent 24 h and 48 h valid time, the others are same as Fig. 8)

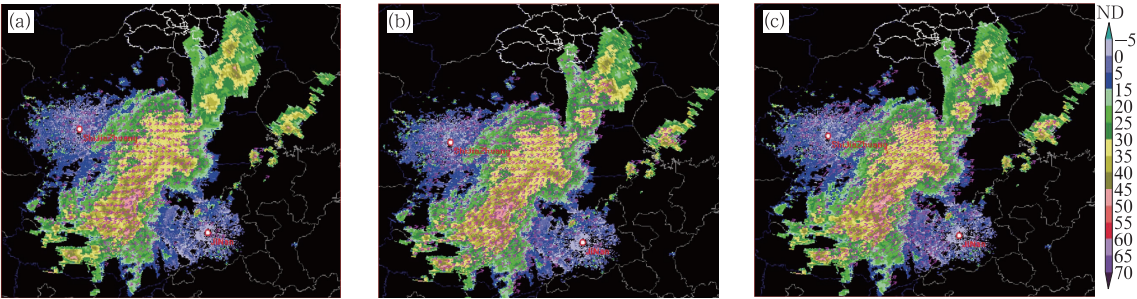


图 10 2013 年 7 月 15 日 22:00(a)3000 m、(b)5000 m 和(c)8000 m 高度雷达回波及反演风场

Fig. 10 Radar echo and inversion wind at (a) 3000 m, (b) 5000 m, (c) 8000 m heights at 22:00 BT 15 July 2013

误差越大;风向均方根误差在 20°以内(表 4)。

客观定量分析和主观评价显示,单雷达反演风场产品对于在业务中快速分析对流发展过程的动力特征很有帮助,但如何在业务中使用好这类反演产品仍然需要在仿真业务环境下应用测试。

表 4 风场的单雷达和双雷达反演结果对比(引自王红艳等,2014)

Table 4 Contrasting results of inversion wind from single radar and dual radar (cited from Wang et al, 2014)

反演试验	水平风速均方根	水平风向均方根
	误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	误差/ $^{\circ}$
强热带风暴温比亚	4~6	7~12
强飚线过程	2~4	14~19
层状云降水	0.7~2	7~11

2.2.3 卫星天气应用平台(SWAP)

卫星天气应用平台(SWAP)可为预报员提供基于卫星资料的快速分析,加强中尺度分析中遥感探测资料的应用。本次测试重点针对 SWAP 系统中与中小尺度灾害性天气相关的对流云判识、定量降水估计(QPE)、云团历史路径和范围外推等功能,测试强天气个例 11 例,均为雷暴和短时强降水天气。测试结果表明:SWAP 的对流判识功能可准确、快速地帮助预报员找到云团中发展强烈的对流系统,大大简化了预报员对对流云位置和强度等要素的判断时间;QPE 中的强降水位置、走向与实况有偏差,对层状云降水估计的准确率明显低于对流云降水的估计,高原地区高层云影响下的 QPE 与雨量站观测偏差尤其大;云团外推有一定指导意义,但外推结果没有考虑地形及云团移速或形状的变化,导致在复杂地形地区、对流快速发展或消亡期间对流系统外推误差大。

由于在强对流天气预报业务中,预报员更加关注 SWAP 中的 QPE 和云团外推技术,而该两项技术的准确率距离业务应用尚有差距,因此 SWAP 不再作为 2014 年新技术的应用测试对象。

3 业务科研影响评价

针对 2013 年暖季试验期间的联合会商和新技术应用测试,向参与试验的业务、科研和管理人员发放调查卷 41 份。调查内容包括暖季试验的必要性、可行性、对业务和科研的促进等方面。结果显示:参

与试验的业务、科研和管理人员均肯定暖季试验开展的必要性;联合会商对科研人员直观了解业务需求并促进相关研究有帮助;预报员将在业务中更加关注并使用被测试评估的高分辨率中尺度数值模式(图 11)。有关新技术测试评估对预报技术改进的促进作用评价则不高,约 63%的调查人员肯定其促进作用,远低于其他各项。2013 年暖季试验中,由于预报员不了解成果算法原理和约束条件,测试带有盲目性。在科学评估方面,缺乏先进的检验方法和手段,也限制了定量评估。以中尺度的并行测试为例,要想通过测试检验为高分辨率模式的改进提供建议和意见或提高对高分辨率模式的解释应用能力,预报员和新技术测试人员必须对模式的动力框架、物理过程、初始资料、同化方案以及是否嵌套等模式信息有充分的认识和了解,模式研发人员事先应对测试人员进行专门培训,并全程参与测试检验,才能对模式的检验结果给出合理的解释,才能够发现造成模式结果误差的可能原因。同时,针对高分辨率模式,需要突破传统的 TS 评分检验,丰富客观检验方法,使用更多能对降水落区、降水量和结构误差进行评估的成熟算法,如基于目标的检验方法

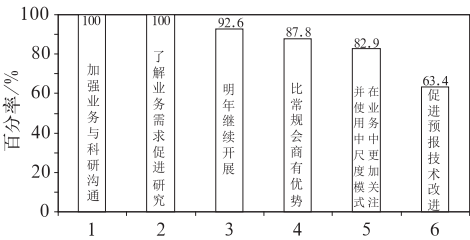


图 11 暖季试验调查结果

Fig. 11 Investigation results for warm season test

(Ebert et al,2000)、邻域检验法(Roberts,2005)等,从而进行更精细的格点化的降水预报检验。如何在仿真业务环境下科学应用测试评估新技术,为科研人员反馈有意义的改进意见,以及科研人员根据应用反馈进行适应业务需求的改进对未来的暖季试验仍将是巨大的挑战。

4 结 论

国家气象中心与中国气象科学研究院、南京大学、中国科学院大气物理研究所联合开展的 2013 年暖季试验探索了气象业务单位与研究单位的一种新型合作模式。通过这次试验,搭建起了一个仿真的

业务环境,它包括业务数据流和被测试转化成果产品的实时保障、完全仿业务定量降水预报和强对流天气预报的分析预报交互平台以及与业务预报并行的实时客观检验系统,为未来更多的科技成果的快速中试转化提供了基础环境。

业务预报与研究已经脱节很久,暖季试验针对强对流和暴雨天气的定期联合会商讨论,为业务预报员和科学家提供了一个非常稀有的交流机会,使得参与试验的科学家更加了解强天气预报相关的业务需求。通过对会商中的科学问题的凝练,科学家和业务预报员更深刻认识到强天气中值得继续开展的相关基础和应用研究。而通过科学家带领预报员的联合研究,促进了业务预报员对强天气相关理论知识的认识。

新技术应用测试转化是暖季试验的核心内容,也是加速科技成果业务转化的直接手段。2013年的试验表明,高分辨率中尺度数值模式对提升强对流和暴雨天气的预报水平有积极意义。然而如何使用高分辨率模式仍将是业务预报的挑战。与雷达、卫星资料相关的分析反演技术测试表明,雷达风场反演技术、卫星天气应用平台对中尺度天气的快速分析很有意义。预报员与科技成果研发人员是否能密切合作是影响科技成果业务转化的重要因素。如何做好科学评估和适应业务需求的改进完善需要预报员与科学家共同参与并有效合作。

针对2013年暖季试验的调查反馈表明,所有参与暖季试验的人员都充分肯定了暖季试验开展的必要性。联合会商中科学家的参与度不足(95.8%被调查者反馈)导致会商中预报和科学问题无法深入探讨、新技术测试中科学家参与度不足(87.5%被调查者反馈)导致测试反馈意见对成果改进有限,这些问题凸显出建立起业务人员与科学家的密切合作才可能真正建立起从业务中发现问题并开展研究、研究成果转化为业务应用的良性循环。

致谢:感谢中国气象科学研究院罗亚丽研究员提供图7、国家气象中心陈双提供图10、中国气象科学研究院王红艳博士提供雷达反演风客观评估结果。

参考文献

王红艳,等.2014.三维变分方法反演风场的效果检验.气象,待发表.
孙建华,郑淋淋,赵思雄.2014.水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验.大气科学,38(4):742-755.

- 张勇,刘黎平,仰美霖,等.2011.“天鹅”台风风场结构特征.气象,37(6):659-669.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. 2012. An overview of the 2010 Hazardous Weather Testbed Experimental Forecast Program Spring Experiment. Bull Amer Meteor Soc, 93:55-74.
- Doswell C A, III, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. Wea Forecasting, 11, 560-581.
- Ebert E E, McBride J L. 2000. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. J Hydrol, 239:179-202.
- Edward N Rappaport, Jing Jiann-Gwo, Landsea C W, et al. 2012. The joint hurricane test bed. Bull Amer Meteor Soc, 93:371-380.
- 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.
- Kain J S, Janish P R, Weiss P R, et al. 2006. Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL spring program 2004. Wea Forecasting, 21:167-181.
- Luo Yali, Gong Yu, Zhang Da-Lin. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China. Mon Wea Rev, 142:203-221.
- Qiu C J, Shao A M, et al. 2006. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar. Meteor Atmos Phys, 91:1-8.
- 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.
- Roberts N M. 2005. An investigation of the ability of a storm scale configuration of the Met Office NWP model to predict flood-producing rainfall. Met Office Tech Rep, 455: 80.
- Shao A, Qiu C, Liu L P. 2004. Kinematic structure of a heavy rain event from Dual-Doppler Radar observation. Adv Atmos Sci, 21(4):609-616.
- Wang Hui, Luo Yali, Ben Jong-Dao Jou. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMRX: Observational analysis. J Geophys Res Atmos, under review.
- Weiss S J, Coauthors. 2007. The NOAA Hazardous Weather Testbed: Collaborative testing of ensemble and convection-allowing WRF models and subsequent transfer to operations at the Storm Prediction Center. Preprints, 22nd Conf on Weather Analysis and Forecasting/18th Conf on Numerical Weather Prediction, Salt Lake City, UT, Amer Meteor Soc, 6B. 4. http://ams.confex.com/ams/22WAF18NWP/techprogram/paper_124772.htm.