

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, 41(6): 661-673.

高分辨率数值模式在强对流天气 预警中的业务应用进展^{*}

漆梁波

上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 结合高分辨率数值模式的业务发展及笔者在使用高分辨率数值模式中的一些经验, 分析和总结高分辨率数值模式在强对流天气预报和预警中的国内外应用现状和发展趋势, 并通过 2014 年一次强风暴过程的产品应用分析, 指出高分辨率模式产品在业务应用中的两大优势: 增加预报员的预期能力; 有助于精细化预警和延长预警时效。论文还探讨了高分辨率数值模式在业务应用中需要注意的问题。最后, 就我国天气预警业务如何快速从“基于观测分析”向“基于模式预报分析”过渡提出了一些建议, 包括尽快建立灾害性天气测试平台、重视高分率数值模式的产品后处理研发和加强针对预报员的数值预报理论及相关技术培训。

关键词: 高分辨率数值模式, 业务应用, 观测分析, 模式预报分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 06. 001

Operational Progress of High-Resolution Numerical Model on Severe Convective Weather Warning

QI Liangbo

Shanghai Meteorological Centre, Shanghai 200030

Abstract: Combined with forecasting experiences in Shanghai Meteorological Bureau (SMB), the latest operational progress and future trend of High-resolution Numerical Model (HNM) are summarized. A real time severe storm is analyzed by applying products from SMB's HNM. Two majors strengths of HNM are pointed out; to promote the predicting ability of forecasters on severe weather and to extened more refined warnings. Some limits of HNM in operational applications are also discussed and, finally, suggestions for accelerating operational application of HNM in China Meteorological Adiministration are proposed, which include setting up Hazardous Weather Testbed (HWT), attaching importance to model post-processing and enhancing forecaster's training on numerical weather prediction.

Key words: high-resolution numerical model, operational application, observation analysis, model forecast analysis

引 言

自 1990 年 Lilly(Sun et al, 2014) 提出可以利用数值预报模式来预报雷暴的概念, 20 多年来, 区域

数值预报模式的准确性和分辨率不断提高, 在强对流天气预警中正在发挥越来越重要的作用(以下本文提到高分辨率模式, 均指区域高分辨率数值模式)。高分辨率模式在强对流天气预警中的应用主要分为三个方面: 第一, 提供近风暴环境要素, 以便

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-023)资助

2014 年 10 月 15 日收稿; 2014 年 12 月 31 日收修定稿

漆梁波, 主要从事天气预报及相关技术开发工作. Email: qlb1999@hotmail.com

预报员诊断风暴生成的潜势或得到相应强对流天气的发生概率(雷蕾等,2012;俞小鼎等,2012);第二,提取高分辨率模式的预报信息,并与雷达回波外推产品结合,来预报强对流天气的触发和发展(Wilson et al,1998;2006;Sun et al,2014;龙清怡等,2014)。这类工作主要着眼于降水的临近预报,甚少涉及大风、冰雹等天气的临近预报(Sun et al,2014)。第三,尝试提高模式的分辨率和物理过程描述精度,提取合适的模式后处理产品,直接指导强对流天气的预警,包括短时强降水、雷暴大风、冰雹等。Weisman等(1997)首次指出:尽管无法描述对流尺度(1 km以下)的细节,采用4 km分辨率和无对流参数化方案的模式能很好地描述与中纬度飑线系统相联系的中尺度对流结构。主要原因是4 km分辨率已经能较好地刻画出对飑线系统发展很重要的冷池强度和大小(Kain et al,2008)。受Weisman等(1997)的启发,美国国家大气科学研究中心(NCAR)在2003年组织了BAMEX科学试验(Bow Echoes and Mesoscale Convective Vortices Experiment),采用4 km分辨率的WRF模式(无对流参数化方案设计)来进行相关研究,模式预报在试验过程中非常成功(Davis et al,2004)。其他相关研究成果表明(Done et al,2004;Weisman et al,2008):无对流参数化方案的高分辨率模式(4 km)在中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)的回波形态、对流组织性、发生频率等方面明显优于采用对流参数化方案的低分辨率模式(10~20 km),而高分辨率模式输出的模拟雷达反射率因子,使得高分辨率模式产品应用走上一个新的台阶。2007年秋天起,美国国家大气和海洋局(NOAA)开始业务运行对流容许模式(Convection-Allowing Model, CAM),分辨率分别为4 km(WRF-NMM)和5.1 km(WRF-ARW)。在基于高分辨数值模式的大量研究及试验平台测试后,Stensrud等(2009)在美国气象学会通报(BAMS)上撰文,认为未来10年,“基于观测分析的预警”将逐渐向“基于模式预报分析的预警”过渡。2010年起,NOAA正式启动“Warn-on-Forecast”研究项目,目标是2020年完成基于模式预报分析的预警体系的业务定型并投入测试。

2009年起,上海市气象局也开始运行水平分辨率为9和3 km的高分辨率数值模式(陈葆德等,2011;傅娜等,2013)。在经过5年的业务使用之后,笔者也感觉到高分辨率数值模式将对我国强对流天

气预报及预警带来业务技术路线上的巨大改变。本文将结合高分辨率数值模式的业务发展及笔者在使用和学习高分辨率数值模式中的一些经验,分析和总结高分辨率数值模式在强对流天气预报和预警中的应用现状和发展趋势。

1 业务高分辨率数值模式概况

进入21世纪,当气象界提到“高分辨率数值模式”时,通常是指模式水平分辨率达到10 km以下。目前为止,国内外业务运行的高分辨率数值模式的水平分辨率则已经达到1~5 km,具体见表1(<http://rapidrefresh.noaa.gov/>, <http://www.jma.go.jp/jma/en/Publications/publications.html>, Detlev Majewski, 陈葆德等,2011;傅娜等,2013)。

表1中未列出我国其他业务机构运行的高分辨率模式,例如北京市气象局的BJ_RUC系统,其分辨率与上海市气象局的WARR系统相同(陈敏等,2010;程丛兰等,2013;魏东,2010;2011)。

从表1中可以总结出目前高分辨率数值模式的4个特点:(1)各发达国家的高分辨率数值模式,基本已经跨入了“对流容许”模式(Convection-Allowing Model, CAM),这意味着这些高分辨率模式可以部分解析或分辨大气中的中小尺度对流活动(1~4 km),当然,这不表示模式可以正确预报该尺度的对流活动。Sun等(2014)的研究表明:可预报性与对流尺度之间关系密切,尺度大于250 km的对流系统,现有CAM对其的可预报性可达到2 h甚至更长,而对于尺度小于30 km的对流系统,提前1~2 h仍非常困难;(2)限于计算资源条件,目前多数业务高分辨率数值模式的同化系统均采用三维变分方案(3DVAR)或类似方法,但法国气象局和英国气象局在未来1~2年内将尝试更精确但更耗计算资源的4维变分方法(4DVAR);(3)除欧洲国家以外,多数高分辨率数值模式的更新频次都达到1 h;(4)除确定性高分辨率模式外,多数机构还业务运行高分辨率的集合预报模式。欧美国家高分辨率集合预报模式的水平分辨率甚至达到或即将达到对流容许的尺度(2~4 km)。

2 高分辨率模式的产品概况

高分辨率模式的水平分辨率和垂直分辨率通常

表 1 业务高分辨率数值模式一览表

Table 1 Brief configuration of operational high resolution models

模式名称	分辨率 /km	同化系统	侧边界	运行频次	预报时效 /h	投入业务时间	高分辨率集合预报系统
HRRR (美国)	3	GSI/3DVAR	RAPv2	逐 1 h	15	2014. 8~9	无
AROME (法国)	1. 3	3DVAR	ARPEGE	00,03,06,12,18 UTC	30	2015	有
COSMO (德国)	2. 2	3DVAR	GME	逐 3 h	27	2015	有
UK-V (英国)	1. 5	3DVAR	UM Global	逐 3 h	36	2011	有
LFM (日本)	2	3DVAR	JMA-MSM	逐 1 h	9	2012	无
WARMs (上海)	9	ADAS	GFS	00,06,12,18 UTC	72	2009	无
WARR (上海)	3	ADAS	GFS	逐 1 h	12	2009	无

都较高,而且其物理过程描述也更复杂,因而可以提供给预报员更多的模式后处理产品。这其中既包含与天气背景条件相关的物理量,又包含很多与强对流天气系统结构、强度及演变相关的专门后处理产品。以 NOAA 的 HRRR (The High-Resolution Rapid Refresh) 系统为例:其常规的模式后处理产品有 26 种,包括海平面气压、风场、降雨、降雪、气温、露点、相对湿度、3 h 变压、CAPE/CIN、风切变、边界层厚度、站点探空等;除此以外,还有专门的后处理产品(以便分析强对流结构、强度及演变),包括模式组合反射率因子、模式 1 km 高度反射率因子、

模式卫星云图、中低层上升螺旋度、地面阵风风速、回波顶高、垂直累积液态含水量、云中水成物剖面、对流触发指数、对流活动指数等。近年来,通过灾害性天气测试平台(Hazardous Weather Testbed, HWT),新的后处理产品也在不断开发中,例如 Clark 等(2012)提到的小时内极值场(Hourly Maximum Field, HMF)对分析雷暴系统的演变非常有效(图 1a),同时 CAM 集合预报模式的相关产品也已经在业务测试中(图 1b)。

由于高分辨率模式可以输出的后处理产品很多,且更新频次高,因此,如何有效而快捷地使用模

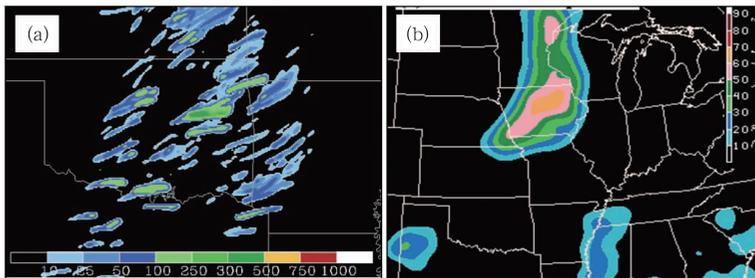


图 1 高分辨率数值模式后处理产品的示例(引自 Clark et al, 2012)

- (a) 显示所有集合预报成员中,上升螺旋度(单位: $m^2 \cdot s^{-2}$)小时内极值场(HMF)的最大值,模式结果来自 2010 年 5 月 10 日 00 UTC 起报的风暴尺度集合预报系统(Storm-Scale Ensemble Forecast, SSEF)的 25 h 预报;
- (b) 模式雷达回波顶高大于 7.5 km 的概率预报,模式结果来自 2010 年 6 月 1 日 00 UTC 起报的风暴尺度集合预报系统(Storm-Scale Ensemble Forecast, SSEF)的 27 h 预报

Fig. 1 Examples of post-processing products by high resolution model (from Clark et al, 2012)

- (a) Maximum HMF (Hourly Maximum Field) updraft helicity from any SSEF (Storm-Scale Ensemble Forecast) member, from 25 h forecasts initialized 0000 UTC 10 May 2010,
- (b) SSEF-derived probabilities for echo-top (or storm top) heights greater than 7.5 km, from 27 h forecasts initialized at 0000 UTC 1 June 2010

式产品显得非常重要。充分挖掘和组合模式的各种输出要素,得到更有针对性的指导产品,近年来欧美科学家进行了大量的研究和业务测试。图 1a 中的小时内极值场(HMF)就是很好的例子。这一产品将高分辨率模式每个积分步长得到的与风暴演变相关的要素(模式反射率因子、模式回波顶高,上升螺旋度等)均保存,并提取每个格点在 1 h 内所有积分步长的最大要素值,这一最大要素值的分布能充分反映 1 h 内,对流的演变和发展态势(路径、强度、形

态等)。Carley 等(2011)则结合模式反射率因子及上升螺旋度,组合出中气旋特征产品(Mesocyclonic Feature),应用该产品,预报员可以快捷地识别出高分辨率模式预报的不同强弱的中小尺度对流系统及其演变特征。此外,对流容许集合预报系统的各种后处理产品也在陆续研发和测试,例如超级单体概率预报^①(图 2),未来 5~10 年内,这方面的工作将是非常重要的研究领域(Stensrud et al, 2009)。

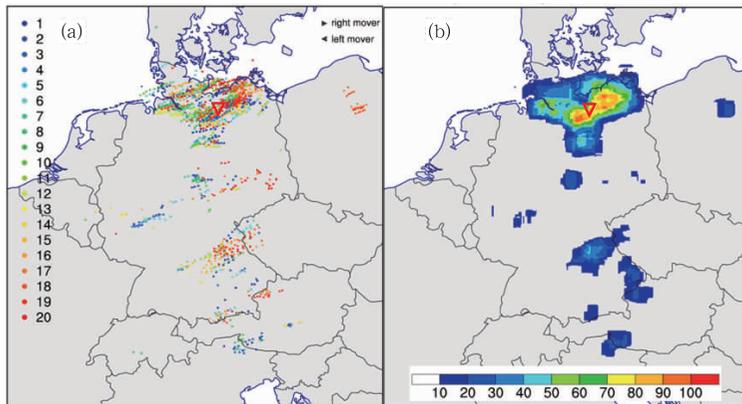


图 2 基于德国气象局 CAM 集合预报系统的超级单体概率预报

(a) 根据模式输出的上升速度及垂直涡度计算的各集合成员预报的超级单体分布(不同朝向的实心三角形区分左移和右移,共计 20 个成员,用不同颜色表示),模式结果来自 2009 年 5 月 21 日 00 UTC 起报的 15~17 h 预报场(图中红色空心三角形表示当日发生的 F2 级龙卷位置); (b) 根据(a)图结果计算得到的超级单体概率预报

Fig. 2 Supercell probability forecast from COSMO-DE-EPS

(a) distribution of supercells derived by updraft and vorticity from every ensemble members (Solid triangles with different orientations indicate left-moving supercell or right-moving supercell, different colors denote results from different ensemble members), from 15–17 h forecasts initialized at 0000 UTC 21 May 2009 (Red hollow triangle shows the position where a F2-scale tornado happened that day);
(b) supercell probability forecast based on the results of Fig. 2a

3 “3.19 强风雹”过程高分辨率模式产品应用

3.1 模式产品和过程简介

自 2009 年起,上海市气象局开始业务运行高分辨率数值模式(陈葆德等, 2011; 傅娜等, 2013), 研发

者也陆续引进和开发很多后处理产品,其中针对强对流天气预报及预警的产品见表 2(未全部列出),合理地使用这些产品,可以更快和更精确地发布强对流天气预报或预警。

以 2014 年发生在浙江省的一次强风雹过程为例,以下尝试展示如何使用高分辨率模式产品来提高强对流天气预报及预警的效率和精确性。本文仅分析上海气象局的高分辨率数值模式产品(表 2),但

^① Detlev Majewski, 2014. 私人通信.

表 2 上海气象局高分辨率数值模式的相关后处理产品

Table 2 Some main post-processing products from high resolution models of SMB

产品名称	何种模式	其他
地面风场	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	分不同关注区域
1 h 累计降水	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	分不同关注区域
雷达组合反射率因子	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	——
温度-对数压力图	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	华东区域主要站点
垂直速度剖面及边界层高度叠加图	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	——
闪电潜势指数	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	——
云中水成物垂直剖面图	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	仅限于徐家汇站附近的 东西向和南北向 2 个剖面
霰粒垂直剖面图	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	同上
雨水垂直剖面图	WARMS(9 km)/WARR(3 km)	同上
假相当位温垂直剖面图	WARMS(9 km)	仅限于徐家汇站附近东西向、 南北向、东北—西南向和 西北—东南向 4 个剖面
最大对流有效位能分布图	WARMS(9 km)	——
0℃层高度与对流有效位能(-30~0℃)叠加图	WARMS(9 km)	——
抬升凝结高度分布图	WARMS(9 km)	——
0~1 km 垂直风切变与最大对流有效位能叠加图	WARMS(9 km)	——
0~6 km 垂直风切变与最大对流有效位能叠加图	WARMS(9 km)	——

注:括号内表示模式水平分辨率。

Note: Descriptions in brackets are model horizontal resolutions.

不表示业务预报中,只需要分析这些产品。无论如何,强天气的预报及预警需要依赖天气背景分析、近风暴环境分析、实况分析等等环节,而不仅仅是高分辨率数值模式产品。

2014 年 3 月 19 日下午到傍晚,一条强飊线自西向东横扫浙江省大部,浙江台州地区出现强降雹,并伴有 9~10 级大风。从图 3a~3c,可以清楚地看

到一条快速东移的弓形回波东移,移动速度达到 60~70 km·h⁻¹。该飊线源自当日中午形成于浙皖交界处的一个带状中尺度对流系统中(图略),下午 14 时(北京时,下同),逐渐发展为弓形回波并迅速东移加强,最强时段为下午 17 时左右(图 3b),19 时明显减弱(图 3c),以后消失在浙江近海。

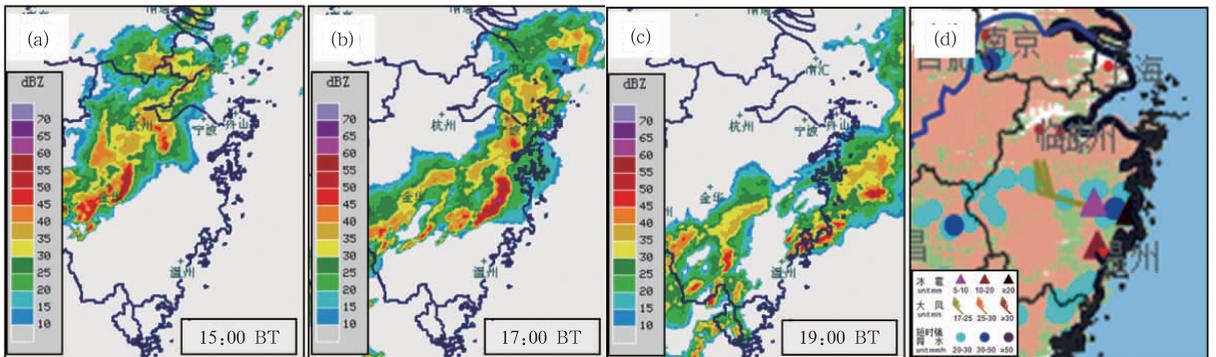


图 3 2014 年 3 月 19 日 15:00(a),17:00(b)和 19:00(c)强飊线的组合反射率因子及灾害性天气实况(d)

(图片来自 www.weather.com.cn)

Fig. 3 Composite reflectivity from the squall line at (a) 15:00, (b) 17:00 and (c) 19:00 BT 19 March 2014 and hazardous weather observations (d)

3.2 对流潜势相关产品分析

强风暴的发展和组织形态主要取决于对流有效

位能(CAPE)和垂直风切变(Shear)。这两个因子的相互配合,可以导致不同形态的对流发展。通常,CAPE 较大且 Shear (0~6 km,下同)也较大时,容

易导致超级单体或弓形回波,这种经验在强对流预报中被预报员广泛接受,尽管 CAPE 和 Shear 的其他配置也可以导致超级单体或弓形回波 (Eugene et al, 2001)。业务预报中,将高分辨率模式输出的 CAPE 和 Shear 进行叠加显示,有利于预报员大致确定强对流的范围和组织形态。图 4 显示的 WARMS 输出的 0~6 km 垂直风切变与最大对流有效位能 (MCAPE) 叠加产品 (图 4a) 和 0°C 层高度与 CAPE (-30~0°C) 叠加产品 (图 4b)。从图中可以看出,19 日 17 时,浙江中南部、江西南部以及福

建大部的 MCAPE 均大于 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图中黄色等值线包围区), Shear 值较大的区域有两处,一处位于山东—河北—山西一带,另一处位于江南地区的北部。MCAPE 大值区与后一处 Shear 大值区重叠的位置主要在浙江中部一带 (MCAPE 大于 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 且 Shear 达到 $28 \sim 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 显示该区域发生强对流的概率较高。而从图 4b 显示的 0°C 层高度分布场看,该区域的 0°C 层高度在 $3500 \sim 4000 \text{ m}$, 是产生降雹的合适高度。这两个产品的分析可以给预报员带来强对流 (包含降雹) 的预期。

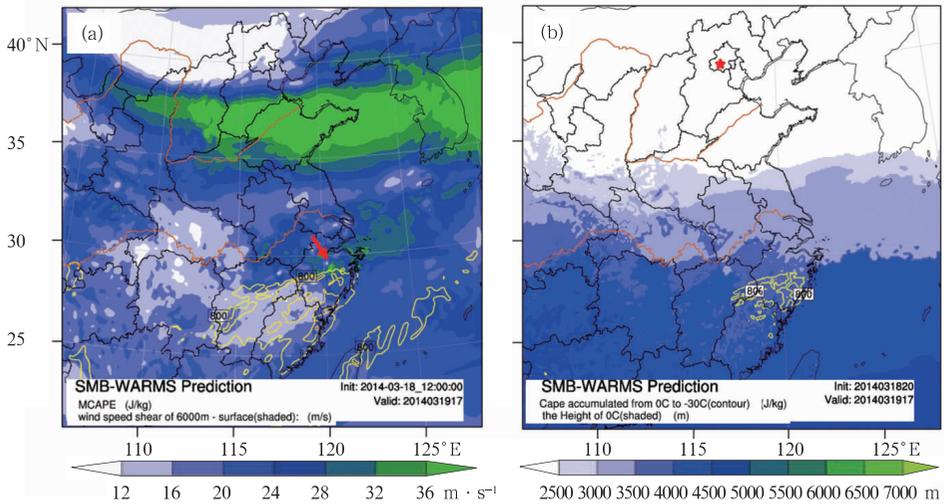


图 4 2014 年 3 月 19 日 17 时的 WARMS 预报场 (3 月 18 日 20 时起报)

(a) 0~6 km 垂直风切变 (wind shear) 与最大对流有效位能 (MCAPE) 叠加产品 [其中黄色等值线为 MCAPE ($800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), 填色区为 wind shear 场, 红色箭头指示 MCAPE 大值区与 Shear 大值区叠加位置], (b) 0°C 层高度与对流有效位能 (-30~0°C) 叠加产品 (其中填色区表示 0°C 层高度)

Fig. 4 Forecast fields from WARMS at 17:00 BT 19 March 2014 (initialized at 20:00 BT 18 March)

(a) wind shear (0–6 km) superimposed with maximum CAPE (MCAPE) [Yellow contour line indicates MCAPE ($800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), shaded area indicates wind shear field, red arrow denotes the position where large MCAPE coexists with large wind shear],
(b) height of 0°C level superimposed with CAPE of -30–0°C
(Shaded area indicates field of height of 0°C level)

3.3 雷达反射率因子和地面风场分析

自 2004—2005 年起 (Weisman et al, 2008), 模式的模拟雷达反射率因子开始进入研究者和预报员的视野, 并很快成为利用高分辨模式进行强对流分析的最重要产品。研究表明 (Zheng et al, 2013; Meng et al, 2013), 不同形态的强对流系统, 对应不同对流激烈程度和不同的灾害性天气。而对高分辨模式输出的雷达反射率因子进行评估发现 (Koch

et al, 2005; Weisman et al, 2008), 该产品能比较清晰地刻画对流系统的形态、结构和强度, 尽管对流系统发生的时间和地点未必是正确的。对于有经验的预报员来说, 能提前 6~12 h 知道对流的系统类别和可能性, 已经有很大帮助了。

图 5 显示 2014 年 3 月 19 日 14—20 时的 WARMS 雷达组合反射率因子预报场。从图中可以看出, 14—20 时, 有明显的线状对流系统从安徽南部移入浙江, 并且不断加强, 最后移到浙江沿海。

从回波形态上看,19日17时,浙江中部的强回波类似于弓形回波(图5b),而到19日20时,回波带上甚至能分辨出三个强回波体,其形态类似超级单体或弓形回波(图5c的三个小箭头),而回波带的顶端,可以分辨出逗点回波形态(图5c的粗箭头),整个对流系统的演变与经典的弓形回波复合体概念模

型极为相似(俞小鼎等,2006)。此外,从17—20时,对流系统移动了约200 km,移速达到 $60\sim 70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这个产品至少可以提示预报员,下午到傍晚,浙江大部可能遭受有组织的对流系统袭击,并可能伴有破坏性雷雨大风。

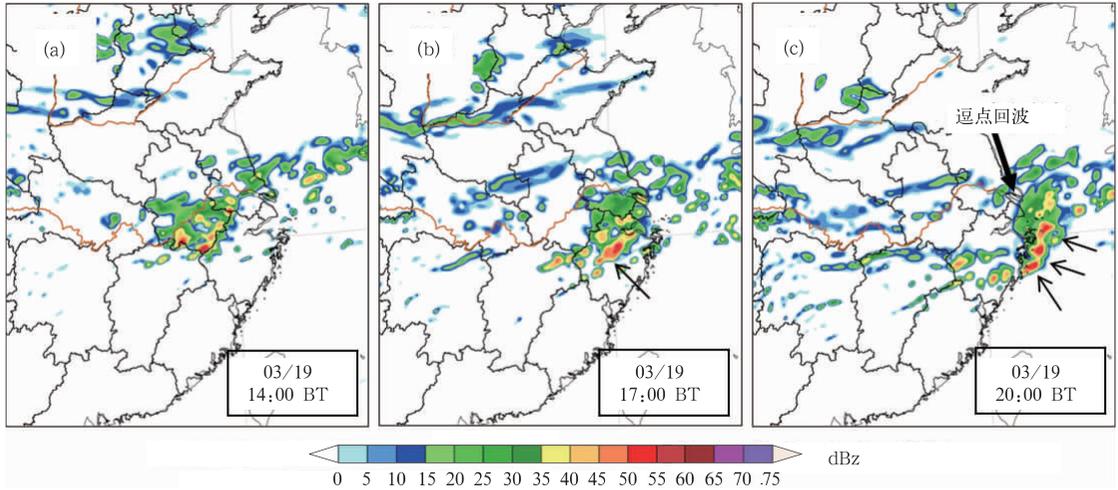


图5 2014年3月19日14时(a)、17时(b)和20时(c)的 WARMS 雷达组合反射率因子预报场(3月18日20时起报)
(图中小箭头指示弓形回波或超级单体,粗箭头指示逗点回波)

Fig. 5 Composite Reflectivity field at (a) 14:00, (b) 17:00 and (c) 20:00 BT
19 March 2014 from WARMS (initialized at 20:00 BT 18 March)

(Thin arrows denote the positions of a bow echo or supercell, thick arrow denotes comma-shaped echo)

上海市气象局快速同化更新系统 WARR(陈葆德等,2011;傅娜等,2013)对此过程也有很好的预报。3月18日08时起报的结果(图6)同样指示有快速移动的带状回波袭击浙江中部,地面的大风极值可达8~9级(由于产品显示的分辨率不足,模式实际预报的风速很可能大于9级)。和 WARMS 的结果比较可知,两个模式对系统的影响区域大致类似,但影响时间上有2~3 h的差异,WARR的预报结果似乎更接近实况(图6a~6c和图3a~3c)。Kain等(2008)的研究表明,随着模式分辨率的提高,模式预报的对流触发时间和发展态势会更接近实况(模式预报的对流通常略晚于实况)。但本次 WARR 预报的对流发展却比实况还要早一些(图3a和图6a),这可能与 WARR 的热启动处理技术有较大关系(陈葆德等,2013)。WARR 逐小时更新,冷启动为每天02时,其他时次为热启动。热启动在同化最新观测资料的同时,会产生一些无法过滤的高频噪声(或扰动),此外,热启动初始场(通常来自

上次循环预报的1 h预报)的有些误差也很难被同化系统修正,上述噪声和误差进入本次循环预报后,会导致后续预报的偏离甚至失败(对预报员而言,通常意味着过多过强的对流预报或者不断削弱的对流预报)。

3.4 云中水成物剖面分析

WARMS 和 WARR 的微物理方案采用的是 WSM6 方案(Jankov et al,2011;周昊等,2013),其中包含云水、云冰、雨水、雪花、霰粒等5种云中水成物和水汽。云中水成物的剖面分析可以为预报员提供云的发展高度及云中水成物的垂直分布,有助于预报员判断对流系统的发展强度及可能造成的灾害性天气类型。

图7显示的是 WARR 预报的雷达组合反射率因子及相关的云中水成物剖面(3月19日17时)。从图7b可以看出,强回波最强盛处的云体高度达到12~13 km,略低于实际回波的伸展高度(实际回波

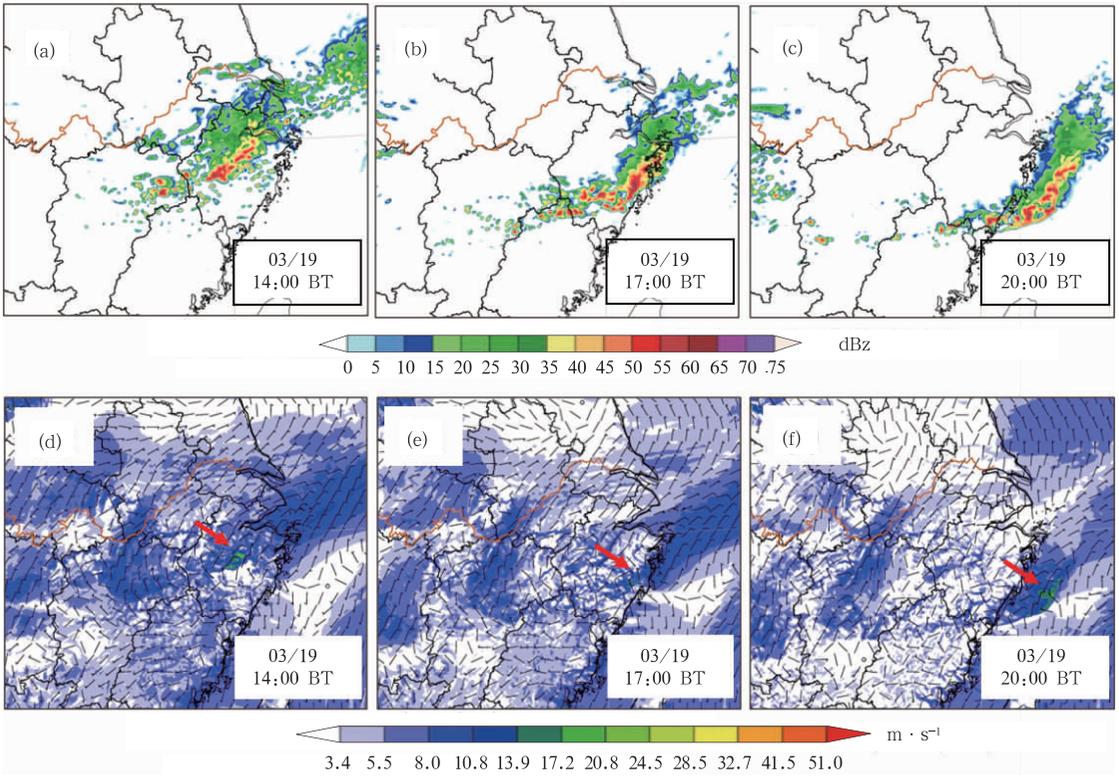


图 6 2014 年 3 月 19 日 14 时(a, d)、17 时(b, e)和 20 时(c, f)的 WARR 雷达组合反射率因子预报场(a, b, c)及地面 10 m 风预报场(d, e, f)

(图中红色箭头指示地面破坏性大风袭击区域;模式起报时间为 2014 年 3 月 19 日 08 时)

Fig. 6 Composite reflectivity field (a, b, c) and surface 10 m wind field (d, e, f; Red arrow denotes the area where destructive wind could pass) at (a, d) 14:00, (b, e) 17:00 and (c, f) 20:00 BT 19 March 2014 from WARR, initialized at 08:00 BT 19 March 2014

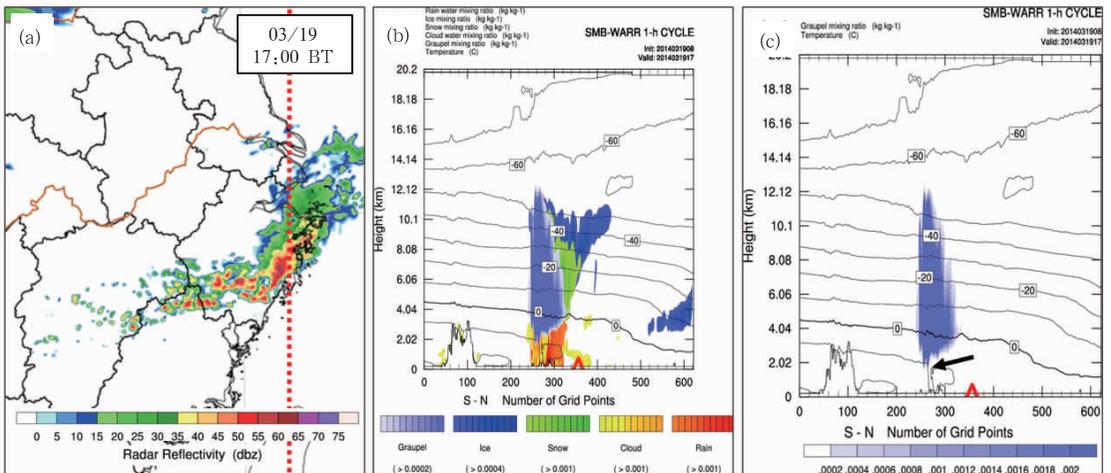


图 7 2014 年 3 月 19 日 17 时的 WARR 雷达组合反射率因子预报场(a)、上海徐家汇站附近南北向的

云中水成物剖面(b)及云中霰粒剖面(c),模式起报时间为 2014 年 3 月 19 日 08 时

[a 图中的红色虚线表示截取剖面的位置,b 和 c 图中的填色区表示水成物的含量(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$),等值线表示气温(单位: $^{\circ}\text{C}$),c 图中的小箭头指示云中霰粒向下伸展的最低位置(等 10°C 线附近)]

Fig. 7 Composite reflectivity field (a), south-north cross-section of cloud hydrometeors (b) and south-north cross section of graupel (c) near Xujiahui Observatory, Shanghai at 17:00 BT 19 March 2014 from WARR, initialized at 08:00 BT 19 March 2014

[Red dash line in Fig. 7a indicates the position where the cross section is made, shaded areas in Fig. 7b and Fig. 7c denote content of hydrometeors (unit: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), contour lines denote isotherms, arrow in Fig. 7c indicates the lowest position to which graupel extends (near 10°C isotherm)]

高度约 14 km,图略)。这种差异可以有多种原因导致:两者的取样位置不一致、两者的计算方法及定义不一致等。从笔者的使用经验看,两者之间的相关性是很高的,可以依据云中水成物的伸展高度大致估计对流的旺盛程度。图 7c 显示的是云中霰粒分布,很明显,云中霰粒已经向下伸展到等 10℃ 线附近,离地高度不到 2 km。尽管 WARR 的微物理方案中未考虑冰雹的参与,但模式预报云中霰粒能下探到离地不到 2 km,且地面温度不高,显示云中的大直径冰相粒子有可能降落到地面而不融化。对于预报员而言,可以预期地面有降雹的概率,如果结合 3.2 和 3.3 节的分析,这种预期概率会很高。2013 年 3 月 22 日凌晨,浙江省宁波市北仑区发生了降雹,WARR 也预报了同样的云中霰粒分布特征(下探到等 10℃ 线附近,离地不到 2 km,图略)。由于 WARR 输出的云中水成物剖面产品仅限于上海徐家汇站附近的東西向和南北向,而上海附近的降雹过程并不多,笔者并无更多的样本来证实这一特征的有效性。但高分辨率模式的这一产品,显然可以帮助预报员了解更多的对流演变细节,提高其对强对流天气发生和演变的预期能力。

3.5 高分辨率模式对强对流预报及预警的业务价值

结合 3.2~3.4 节的分析,可以看出高分辨率模式对强对流预报及预警有重要的业务价值,至少体现在以下两个方面:

(1) 增加预报员的预期能力。当值预报员保持对强对流发生的预期非常重要。著名强对流预报专家 Doswell(1991)曾说过:“如果预报员在超级单体发展之前很早就有预期,那么超级单体被及时监测和识别的机会就会大大增加(… the chance of detecting and recognizing supercells is enhanced substantially if one has anticipated their potential occurrence long before they develop …)”。有了预期,预报员会有针对性地分析实况及相关模式要素;有了预期,能大大增强预报员发布预警的信心;有了预期,预报员才可能在对流触发的最早时刻,发出相应的预警,延长预警的时效。

(2) 高分辨率模式产品可以对强对流过程有更细致的刻画,有助于预报员作出更精细的预报或预警。例如:通过 3.2 节的分析,预报员会预期 19 日下午有强对流发生,并可能伴有冰雹;通过 3.3 节的

分析,预报员可以预期浙江中部将有强风暴(飚线系统)发生,并伴有破坏性大风;而 3.4 节的分析表明,该飚线系统发生冰雹的概率很高。有了这些分析,预报员才能更为精确地预报雷雨大风和冰雹的发生时间、强度及落区。

4 高分辨率模式产品业务应用中的可能问题

诚如 Stensrud 等(2009)所言:“随着计算能力和数值预报技术的发展,‘基于模式预报分析的预警’时代即将到来”。但数值预报技术只是人类现有掌握的科技成果的某种最佳实现,且不论人类认识自然的局限性,就是这个“最佳实现”本身,也有诸多不完美。这些不完美使得数值预报技术的业务应用会存在局限或不足,高分辨率数值模式也不例外。这些局限或不足至少体现在以下 4 个方面:

(1) 高分辨率模式的性能,很大程度上取决于为其提供初始条件和边界条件的全球模式性能,其产品的业务应用,要综合分析其他各种模式结果,包括集合预报系统的结果。Kain 等(2008)的研究表明,MCS 的发生和发展很大程度上取决于天气尺度或次天气尺度的强迫,如果低分辨率模式(通常是提供边界和初始条件的全球模式)能很好地预报这种强迫,则高分辨率模式可以帮助预报员提前 1~2 d 得到 MCS 发生或发展的具体细节;但如果低分辨率模式无法正确描述这种强迫,有很大概率,高分辨率模式也无法给预报员更多帮助(也有很小的概率,高分辨率模式的同化系统能弥补低分辨率模式的上述不足,仍可给出更精确的预报)。对于弱天气尺度强迫背景下发生的局地强对流(此时,强迫通常来自尺度更小的局地加热不均匀或地形因子),高分辨率模式的性能通常是优于低分辨率模式。这一方面是由于分辨率的提高,足以让模式识别局地触发因子,另一方面也因为高分辨率模式对相关物理过程的描述更精确。但不同局地对流,其决定性的物理过程并不相同,而且很多局地对流由天气尺度强迫和小尺度强迫相互作用而触发的(Hanley et al, 2011),因此除了有效同化更多的观测资料之外,开发高分辨率的集合预报系统也成为今后发展的重点。早期的研究表明(Stensrud et al, 2000);对于 MCS 的预报,当天气系统强迫明显时,基于初始扰动的集合预报技巧高一些;当天气系统强迫弱时,基于物理过程

扰动的集合预报技巧高一些。最近的研究表明 (Coniglio et al, 2010; 2013; Jirak et al, 2014): 对于尺度更小的局地对流系统, 似乎也符合上述规律。2012 年开始业务运行的德国气象局高分辨率集合预报系统(分辨率 2.8 km, 20 个成员)就是采用多个低分辨率模式和多种物理过程的组合来形成集合成员的。其初始场和边界驱动来自 ECMWF-IFS (欧洲中心全球模式)、NCEP-GFS (NOAA 全球模式)、JMA-GSM (日本全球模式) 以及 GME-global (德国气象局全球模式), 分别在初始场和边界驱动上加上不同的物理过程扰动方案 (Gebhardt et al, 2011)。

(2) 正确认识模式的分辨率。对于业务模式而言, 并非分辨率越高, 性能越优; 数值模式系统是包含动力框架、物理过程、同化系统以及计算方法等多种设计方案的组合, 模式分辨率的提高必须与其他设计方案的不断改进共同进行, 否则, 单一地提高模式分辨率, 并不会取得更好的结果。Kain 等 (2008) 的研究表明: 对于面积大于 200 km^2 的对流回波而言, 2 km 分辨率的 WRF 模式 (WRF2, 下同) 和 4 km 分辨率的 WRF 模式 (WRF4, 下同) 表现类似; 对面积小于 200 km^2 的对流回波, WRF2 则更接近实况; 此外, WRF2 也能提供更多的对流结构细节, 但在业务预报中的实际价值到底如何, 并不容易评价。在美国中西部, 对 MCS 而言, 考虑到计算成本, 模式分辨率从 4 km 升级到 2 km 可能并不值得。Clark 等 (2012) 指出: 即使将模式分辨率提高到 1 km, 对 MCS 而言, 似乎也不能给预报员提供更积极的帮助。现有业务运行的高分辨率模式, 分辨率大致在 1~5 km 之间, 其实并不足以分辨大气中的各种对流过程。Petch 等 (2002) 指出, 分辨率达到 1 km 以下才可能更好地描述局地加热和边界层涡流活动, 而这两者是对流触发和对流强度的关键因素。其他研究表明 (Petch, 2006), 分辨率达到 100 m 才可能解析云内湍流、夹卷作用, 进入更好地描述深对流发展。总之, 模式分辨率的合理设计, 不仅取决于数值模式系统各环节的配合, 还取决于预报对象的尺度。研究表明 (Zheng et al, 2013; Meng et al, 2013), 我国 MCS 的尺度较美国中西部略小, 而且生成环境更为潮湿, 这些因素将影响我国业务高分辨率数值模式分辨率的设计; 此外, 近年来, 我国局地暴雨导致的城市内涝和山洪增多, 对于这类尺度较小的对流系统 (与城市热岛、水陆环流及局地

地形关系密切), 多大的模式分辨率更为合适, 也值得研究。

(3) 高分辨率模式产品的系统误差和适用性问题。由于只是“科技成果的最佳实现”, 数值模式产品的误差难以避免, 而且通常都会存在明显的系统误差 (薛纪善, 2007)。从 3.2~3.4 节的分析可知, WARMS 在对流触发时间、对流发展过程以及地面大风强度 (预报值偏小, 图略) 等方面, 均存在偏差。这些偏差大多是系统性的, 预报员应当注意总结应用经验, 进行相应订正, 以更好地指导预报及预警。此外, 模式产品还有地域适用性问题。如前所述 (Zheng et al, 2013; Meng et al, 2013), 我国的强对流天气与美国有较大差别, 在美国应用效果较好的高分辨率模式产品, 不一定在我国也能达到同样效果。Kain 等 (2008) 通过统计高分辨率模式 (分辨率 2 km) 输出的旋转性单体 (以上升螺旋度为标准) 和雷达实测中气旋的大致频数, 确定上升螺旋度阈值的大小 (当两种频数大致相同时), 一般设定为 $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 其强调这种阈值设置可能仅对平坦的美国中西部有效, 而且预报时效为 18~30 h 之间。同样的道理, 华东区域数值模式 (WARR) 产品的性能, 在我国不同地区也会有区别, 预报员也需要通过经验积累, 才有更有效地使用这些产品。

(4) 快速同化更新系统的问题。近年来, 我国各地陆续在运行快速同化更新系统。快速同化更新系统最初是为了提高 1 h 时效以上的强对流天气而设计, 最近的研究 (Yussouf et al, 2014) 已经将快速更新系统的更新频率提高到 15 min, 并进行 1 h 内的预报。其核心内容是如何快速且有效地同化最新观测。既要“快速”, 又要“有效”, 并不容易。本文列举的 WARR 应用个例是比较成功的, 无须讳言, 由于各种环节还存在不足, 例如同化方案、物理过程或 spin-up 问题等等 (陈葆德等, 2013), WARR 的结果出现偏差甚至错误的个例也非常多。除改进系统本身的各种环节外, 采用集合预报系统 (Benjamin et al, 2014)、多确定性模式集合技术 (Jirak et al, 2012) 或时间滞后集合技术 (傅娜等, 2013) 来提高预报技巧也是很重要的手段。作为预报员而言, 应当将快速同化更新系统分析看作预报决策过程中的一个环节 (而不是全部), 注意积累经验, 通过综合研判, 来有效使用其预报产品。

鉴于高分辨率模式存在的这些局限或不足, 预报员在充分认识到高分辨率模式即将带来革命性变

化的同时,也应该认识到这一变化过程是渐进的。即便 Stensrud 等(2009)认为:“基于模式预报分析的预警时代即将到来”。作者也强调要实现这一目标,取决于观测分析技术、模式同化技术、数值质量控制、计算和通讯能力、公众教育(概率预报的普及)、预警业务流程、模式产品分析工具和预报检验等等各方面的进展。对预报员而言,在强对流预报及预警中,应当将重点职责由“观测分析”逐渐转到“模式产品分析和观测分析”中,而观测分析和模式产品检验仍是重要和必不可少的业务环节。

5 结论与讨论

本文结合高分辨率数值模式的业务发展及笔者在使用和学习高分辨率数值模式中的一些经验,分析和总结高分辨率数值模式在强对流天气预报和预警中的应用现状和发展趋势,并通过2014年3月的一次强冰雹过程进行产品应用分析,尝试展示高分辨率模式产品在我国强对流天气预报及预警中的应用潜力。得出以下结论:

(1) 近20年高分辨率数值模式的研究和业务表明,高分辨率模式(包括其相应的集合系统)将在强对流天气预报及预警中发挥越来越重要的作用,未来10~15年,发达国家的预警业务体系将由“基于观测分析”转变为“基于模式预报分析”。

(2) 高分辨率模式可以输出的后处理产品很多,且更新频次高。充分挖掘和组合模式的各种输出要素,得到更有针对性的指导产品,是有效而快捷地发挥高分辨率模式性能的重要途径。

(3) 高分辨率模式能增加预报员的预期能力,模式对强对流过程有更细致的刻画,有助于延长预报及预警时效,也有助于预报员发布更精细化的预警。

(4) 高分辨率模式本身仍存在诸多‘不完美’,进而会局限其在业务应用中的作用,这些局限主要源于初边界条件、同化技术、模式物理过程、模式适用性等方面。此外,高分辨率模式必须与集合预报技术、观测分析技术、数值质量控制技术、计算和通讯能力、公众教育(概率预报的普及)、预警业务流程、模式产品后处理、产品分析工具等各方面共同进展,才可能最大限度发挥高分辨率模式在预报及预警中的作用。

从表1不难发现,我国在高分辨率数值模式的

研究和业务应用方面,与发达国家还有很大差距。人类社会的发展,科技是第一生产力。数值预报技术则是天气预报发展的第一生产力。2009年NOAA制定龙卷预警时效的预期目标为:到2016年,预警时效由目前的12 min延长到14 min。而2010年开始的“Warn-on-Forecast”研究项目计划书中,将龙卷预警的预期时效设定为“到2014年达到30 min”(指研究试验中所能达到的时效,非业务时效),项目组能有信心设置较高的研究目标,与多年来NOAA组织的灾害性天气测试平台(HWT)有很大关系。HWT由美国强风暴实验室(NSSL)、国家强风暴预报中心(SPC)和诺曼气象台(NWS Oklahoma City/Norman Weather Forecast Office)负责管理,联合研究、技术、预报、培训等各方面专家,进行灾害性天气预报模型或工具的业务测试和业务定型(<http://hwt.nssl.noaa.gov/>)。HWT由预警试验项目(Experimental Warning Project)和预报试验项目(Experimental Forecast Project)组成,前者专注于临近预警技术,后者专注于数值模式开发和应用。从2003年起,CAM模式就开始在HWT中进行测试,正是有鉴于CAM模式性能近10年的不断改进,才使得“Warn-on-Forecast”项目组有信心设置上述关于龙卷预警时效的研究目标。不管是从加强高分辨率数值模式的研发,还是加强高分辨率数值模式的业务应用水平来说,我国也应该尽快设立类似的HWT,以尽快缩小与世界先进水平的差距。

高分辨率数值模式(包括集合预报系统)产品应用的另外一个重要方面就是模式产品后处理。传统的数值模式大多输出时间间隔较长(3 h或以上)的“静态产品”(给定时刻的要素场),而强对流天气预报及预警更关注模式产品中时间间隔更短(5~10 min)的信息、某一时段内的极值信息(比如极大风、最大回波强度、最大旋转速度、云中冰相粒子的及地程度等等)和空间信息(二维或三维)等。为提高分析效率,这些信息最好能以更直观(比如雷达反射率因子、最大阵风等)或组合方式(比如超级单体产品、概率产品等)显示给预报员。这方面的工作,欧美科学家积累了很多经验,我们在借鉴的同时,还要结合各地实际,开发出有针对性的后处理产品。

20世纪末,数值预报模式的形势预报能力让预报员告别了传统的天气图方法(章国材,2004),进入21世纪初,基于数值模式的温度客观释用技巧也逐渐与预报员相当(漆梁波等,2007),预报员的职责逐

渐转移到极端天气和灾害性天气的临近预警中。未来5~10年,随着数值预报技术的发展,数值模式结果将在临近预警中发挥越来越重要的作用,预报员的精力将集中在分析模式结果的合理性(基于经验和对模式性能的理解),检验模式结果的可靠性(基于最新的观测),评估模式概率产品的可信度(基于对模式性能的理解)并最终发布相关预警。由此可见,未来预报员对数值预报模式的理解程度显得至关重要。我国著名台风专家陈联寿先生曾经说过:“不懂数值预报,无法成为一个优秀的预报员”。现阶段,由于各种原因,我国预报员在数值预报技术方面的训练和培训都不足,这可能在未来阻碍我国高分辨数值模式应用水平的提高。作为预报员,笔者本人对数值预报技术的理解程度也不深,撰写此文只为抛砖引玉,让更多的管理者、研究者、预报员和培训人员来关注和推动高分辨率数值模式的业务应用。

回顾历史,数值预报技术的发展,只是不断将预报员从繁杂的资料处理及分析任务中解放出来,并慢慢地提升到更高的决策角色中。预报员应该积极面对科技进步带来的角色转变,唯有如此,才能更好地发挥科技的力量。

参考文献

- 陈葆德,王晓峰,李泓,等. 2011. 上海市气象局数值天气预报业务产品手册, 63.
- 陈葆德,王晓峰,李泓,等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述. 气象科技进展, 3(2): 29-35.
- 陈敏,范水勇,郑柞芳,等. 2010. 基于BJ-RUC系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. 气象学报, 69(1): 181-194.
- 程从兰,陈明轩,王建捷,等. 2013. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. 气象学报, 71(3): 397-415.
- 傅娜,陈葆德,谭燕,等. 2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验. 气象, 39(10): 1247-1256.
- 雷雷,孙继松,王国荣,等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 70(4): 752-765.
- 龙清怡,刘海文,顾建峰,等. 2014. 雷达资料与中尺度数值预报的融合方法研究及其在临近预报中的应用. 气象, 40(10): 1248-1258.
- 漆梁波,曹晓岗,夏立,等. 2007. 上海区域要素客观预报方法效果检验. 气象, 33(9): 9-18.
- 薛纪善. 2007. 和预报员谈数值预报. 气象, 33(9): 3-11.
- 魏东,尤凤春,范水勇,等. 2010. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)模式探空质量评估分析. 气象, 36(8): 72-80.
- 魏东,尤凤春,杨波,等. 2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估. 气象, 37(12): 1489-1497.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社, 163-168.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337.
- 章国材. 2004. 预报员在未来天气预报中的作用探讨. 气象, 30(7): 8-11.
- 周昊,朱伟军,彭世球. 2013. 不同微物理方案和边界层方案对超强台风“鲑鱼”路径和强度模拟的影响分析. 热带气象学报, 29(5): 803-812.
- Benjamin S et al. 2014. From RAPv3/HRRR-2014 to the NARRE/HRRRE era. oral talk. 2014 Warn-on-Forecast and High Impact Weather Workshop. National Weather Center, Norman OK.
- Carley J R, Benjamin R J S, Michael E. B, et al. 2011. A Proposed model-based methodology for feature-specific prediction for high-impact weather. Wea Forecasting, 26: 243-249.
- 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.
- Coniglio M C, Correia Jr J, Marsh P T, et al. 2013. Verification of convection-allowing WRF Model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations. Wea Forecasting, 28: 842-862.
- Coniglio M C, Elmore K L, Kain J S, et al. 2010. Evaluation of WRF Model output for severe weather forecasting from the 2008 NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment. Wea Forecasting, 25: 408-427.
- Davis C, Coauthors. 2004. The Bow Echo and MCV Experiment (BAMEX): Observations and opportunities. Bull Amer Meteor Soc, 85: 1075-1093.
- Done J, Davis C, Weisman M. 2004. The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Atmos Sci Lett, 5(6): 110-117.
- Doswell C A III. 1991. A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms. Nat Wea Dig, 16(1): 2-16.
- Eugene W M Jr, Weisman M. 2001. The sensitivity of simulated supercell structure and intensity to variations in the shapes of environmental buoyancy and shear profiles. Mon Wea Rev, 129: 664-687.
- Gebhardt C, Theis S E, Paulat M, et al. 2011. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. Atmos Res, 100: 168-177.
- Hanley K E, Kirshbaum D J, Belcher S E, et al. 2011. Ensemble predictability of an isolated mountain thunderstorm in a high-resolution model. Quart J Roy Meteor Soc, 137: 2124-2137.
- Jankov Isidora, Grasso L D, Sengupta M, et al. 2011. An evaluation of Five ARW-WRF Microphysics Schemes using synthetic GOES imagery for an atmospheric river event affecting the

- California Coast. *J Hydrometeor*, 12:618-633.
- Jirak I L, Weiss S J, Melick C J. 2012. The SPC Storm-scale Ensemble of Opportunity: Overview and Results from the 2012 Hazardous Weather Testbed Spring Forecasting Experiment. Preprints, 26th Conf. Severe Local Storms, Nashville, TN.
- Jirak I L, Weiss S J, Melick C J. 2014. Evaluation and Comparison of Multiple Convection-Allowing Ensembles Examined in Recent HWT Spring Forecasting Experiments. oral talk, 2014 Warn-on-Forecast and High Impact Weather Workshop. National Weather Center, Norman OK.
- Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al. 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Wea Forecasting*, 23: 931-952.
- Koch S E, Ferrier B S, Stoelinga M T, et al. 2005. The use of simulated radar reflectivity fields in diagnosis of mesoscale phenomena from highresolution WRF model forecasts. Preprints, 11th Conf. on Mesoscale Processes and 32nd Conf. on Radar Meteorology, Albuquerque, NM, Amer Meteor Soc, J4J. 7.
- Meng Zhiyong, Yan Dachun, Zhang Yunji. 2013. General Features of Squall Lines in East China. *Mon Wea Rev*, 141:1629-1647.
- Petch J C. 2006. Sensitivity studies of developing convection in a cloud-resolving model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132:345-358.
- Petch J C, Brown A R, Gray M E B. 2002. The impact of horizontal resolution on the simulations of convective development over land. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128:2031-2044.
- Stensrud D J, Bao Jian-Wen, Warner T T. 2000. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 128:2077-2107.
- Stensrud D J, Wicker L J, Kelleher K E, et al. 2009. Convective-Scale Warn-on-Forecast System. *Bull Amer Meteor Soc*, 90: 1487-1499.
- Sun Juanzhen, Xue Ming, Wilson J W, et al. 2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bull Amer Meteor Soc*, 95:409-426.
- Weisman M L, Davis C, Wang W, et al. 2008. Experiences with 0 - 36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Wea Forecasting*, 23:407-437.
- Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. 1997. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon Wea Rev*, 125:527-548.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: A Status report. *Bull Amer Meteor Soc*, 79: 2079-2099.
- Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Mon Wea Rev*, 134:23-47.
- Yussouf N, Dowell D. 2014. Storm-Scale Data Assimilation and Ensemble Forecasts for the 27 April 2011 Severe Weather Outbreak in Alabama. oral talk, 2014 Warn-on-Forecast and High Impact Weather Workshop. National Weather Center, Norman OK.
- Zheng Linlin, Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, et al. 2013. Organizational Modes of Mesoscale Convective Systems over Central East China. *Wea Forecasting*, 28:1081-1098.