

漆梁波,徐珺,2018. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. 气象,44(1):1-14.

豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思^{*}

漆梁波¹ 徐珺²

¹ 上海中心气象台,上海 200030

² 国家气象中心,北京 100081

提 要: 对2016年7月9日豫北特大暴雨的短期预报决策过程进行了总结和反思,主要结论如下:(1)此次降水过程存在明显的对流云团之间的合并及组织化过程,这些过程涉及中小尺度系统相互作用。作为重要业务参考的全球模式(包括确定性和集合预报)均未能提前(24或12 h)对此次暴雨过程做出有效预报或提示。(2)高分辨区域模式和快速同化更新系统大多表现出更好的预报能力,可提前12或6 h提示预报员豫北地区有暴雨或大暴雨。(3)特大暴雨过程预报失败的主要原因是预报员过份依赖全球模式的结果,缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足。高分辨区域模式在投入业务运行之前,需加强对预报员的系统性培训,才能更有效地发挥这些模式产品的业务效能。(4)在现有QPF业务流程中逐渐增加概率产品的使用,既符合新技术的发展趋势,也可望对暴雨或极端降水的预报提供更有效支撑。

关键词: 特大暴雨, 短期预报, 预报反思, 高分辨区域数值模式

中图分类号: P456,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.001

Rethink on Short-Range Forecast of the 9 July Severe Rainstorm in Northern Henan

QI Liangbo¹ XU Jun²

¹ Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

² National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: After a careful rethink on short-range forecast of the northern Henan severe rainstorm on 9 July 2016, we found that there existed obvious alternate growing and merging of convective clouds during this rainstorm event involving interaction of meso-small scale systems. As important guidance, all global models, including deterministic and ensemble ones, failed to provide effective forecasts or hints in advance for this event. High resolution regional models and rapid refresh systems performed better and could help forecasters to predict heavy or very heavy rainfall events in northern Henan 12 h or 6 h earlier. Reasons for the forecast failure of this severe rainstorm process are that forecasters relied too much on global models and were lack of experience on high resolution model application or confidence in products from high resolution models. Only more comprehensive trainings on high resolution model for forecasters before putting them into use could forecasters maximize their operational potential. Applying more probabilistic products gradually in QPF decision process would meet the trend of technological advance and could provide more effective supports for heavy or extreme rainfall forecasting.

Key words: severe rainstorm, short-range forecast, forecast rethink, high resolution regional model

^{*} 中国气象局暴雨专家创新团队专项(CMACXTD002-3)、中国气象局气象预报业务关键技术的发展专项[YBGJXM(2017)1A]和上海市气象局研究型专项(YJ201601)共同资助

2017年5月24日收稿; 2017年8月21日收修定稿

第一作者:漆梁波,主要从事天气预报及相关技术开发工作. Email:qlb1999@hotmail.com

引言

华北暴雨具有鲜明的季节和地域特征,其降水强度大,局地性强,而且往往与地形关系密切。新中国成立以来影响巨大的几次暴雨过程,均发生在华北地区,比如“63·8”海河流域暴雨、“75·8”河南暴雨和“96·8”河北暴雨(冯伍虎等,2001)等。对华北暴雨发生的大尺度环流背景,前人已经有很好的总结(周鸣盛,1993;江吉喜和项续康,1997;孙建华等,2005;边清河等,2005;刘还珠等,2007),业务一线人员对这些研究成果也有较好的掌握。因此,近年来发生在华北的大范围暴雨,从短期预报来看,预报的准确率都是不错的。比如,“7·21”北京特大暴雨(陶祖钰和郑永光,2013)和2016年7月19—20日的华北大暴雨,国家级和省级预报中心均在短期时效内提前发布较为准确的暴雨落区预报和相关暴雨预警。在“7·21”北京特大暴雨期间,中央气象台的暴雨TS评分(24~48 h)达到0.245(远高于全年的平均评分0.141);而2016年7月19—20日华北大暴雨期间,中央气象台的暴雨TS评分(24~48 h)更是达到0.515(全年平均为0.173)。当然,这些预报成功的获得,也很大程度归功于全球数值模式对大范围暴雨环流形势和天气背景的预报性能的不断提高。

尽管对大范围的华北暴雨过程,近10年来我国的业务预报能力有了明显提升,但对于发生在局地的突发性暴雨过程,由于涉及复杂的中小尺度天气系统、地形效应、城市热岛等因素,对其的预报能力就存在明显不足。在短期预报时效内,预报不成功的个例就较多,比如2004年7月10日和2011年6月23日发生在北京城区的暴雨和大暴雨过程(孙继松等,2006;章丽娜等,2014)、2008年7月13日郑州大暴雨(侯凯等,2011)等。这些暴雨过程的预报不成功,很大程度上是由于我国现有业务预报体系中,在客观指导产品的支撑方面,主要还是依赖全球数值模式(包括:欧洲中期数值预报中心全球模式,以下简称EC模式;美国国家环境预报中心全球模式,以下简称GFS模式;日本全球模式,以下简称JP模式;中国气象局T639全球模式,以下简称T639模式;中国气象局GRAPES全球模式,以下简

称GRAPES模式)。上述全球数值模式大多属于静力模式,且采用对流参数化处理,对中小尺度对流过程的描述明显不足,因而很难对局地突发性暴雨的准确预报形成有效业务支撑。2016年7月8日夜间至9日上午,河南北部的新乡、鹤壁和安阳出现暴雨和大暴雨,其中新乡市还出现特大暴雨,8日08时至9日08时(北京时,下同),辉县气象站和新乡市气象站累积降水量分别达到374和353 mm,以下均称此次暴雨过程为“豫北特大暴雨”。此次豫北特大暴雨导致新乡市严重城市内涝,全市受灾人口为32.88万人,农作物受灾面积为2.2万 hm^2 ,成灾面积为0.84万 hm^2 ,直接经济损失23071万元*。对于此次过程,河南省气象台及相关地市气象台在8日夜间至9日上午陆续发布了相应短时临近时效的暴雨预警(大多仅提前0~2 h,最早的地市级预警为鹤壁市气象台于2016年7月8日21时07分发布的“暴雨黄色预警信号”),这些短时临近预警对地方政府组织防灾减灾有积极的指导作用;但在短期预报时效内,国家级和省级气象台均未能对其有效预报或准确预报。

随着我国城市化进程的不断深入,提前对局地暴雨或大暴雨进行准确预报对城市安全运行至关重要。从现代天气预报业务的发展趋势看,高分辨数值模式产品在业务中的应用已成为趋势(漆梁波,2015)。近5年来,国家级和省级的区域高分辨数值模式产品也逐渐在业务中得到应用,并在灾害性天气的预报和预警中发挥积极作用(何光碧等,2014;毛冬艳等,2014;张小玲等,2015;曾明剑等,2015)。本文通过对本次豫北特大暴雨过程的短期预报决策过程进行回顾和反思,期望能由点及面,总结出我国现有定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)业务决策过程中的不足和未来努力方向,为提高QPF准确率提供一些有益的参考。

1 特大暴雨实况和主观预报分析

1.1 短期预报时效说明

如前所述,本次过程,省级和地市级气象台均进行了相应的短时临近预警,尽管这些短时临近预警的时效不能完全满足防灾减灾的需要,但从灾害性

* 2016年7月9日新乡市防汛指挥部新闻发布会新闻通稿。

天气的警示和提醒而言,有积极意义。本文并不试图揭示此次特大暴雨的形成机制,如何改进暴雨的短时临近预警也不是本文的重点;本文分析和反思的重点是:在短期预报时效内,哪些业务决策环节值得改进。

关于短期预报的时效,我国气象业务一般认为是0~72 h(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2008),世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)的标准为12~72 h,此外,WMO还有甚短期预报(very short-range forecasting)的定义,时效为0~12 h^{*}。在业务实践中,通常提前0~2 h或0~3 h为短时临近预警范畴,而提前3或6 h以上,预报产品基本可以通过各种决策或公共渠道(传真、电视及广播等)进行传播和服务,可认为是短期预报的范畴。我国的短期天气预报国家标准(GB/T 21984—2008)也提到短期预报中的预报间隔可设为3、6、12和24 h,即05时预报中,对08时之后的天气进行预报,也是短期预报的内容。因此,本文所讨论的短期预报时效设定为提前6或12 h,预报的覆盖范围大致为未来6~30 h或12~36 h。鉴于豫北特大暴雨主要出现在7月8日20时至9日08时,因此在下文对客观数值模式的分析中,主要考虑7月7日20时和8日08时起报的结果(时效分别为12~36 h和12~24 h),而涉及对主观预报评估时,仅对中央气象台7月8日06和18时发布的未来24和6 h间隔降水落区预报(预报时段分别为8日08

时至9日08时、8日20时至9日02时和9日02—08时)做落区检验。

1.2 特大暴雨实况及主观预报

图1显示的是豫北附近7月8日08时至9日08时累积降水量分布图(仅显示发报县级或市级气象观测站的数据中累积降水量 ≥ 50 mm站点)。从图中可以看出,大暴雨和特大暴雨主要出现在新乡附近,最大值为新乡辉县的374 mm,新乡本站353 mm次之(图1a);降水发生时段基本在8日20时之后(图1b),鹤壁的降水强度弱,也较稳定,一般在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,而新乡的降水开始更晚,大致在9日02时之后,降水强度非常强,极值强度达到 $101 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (9日05—06时)。普查历史资料,新乡站的353 mm和辉县站的374 mm均打破建站以来的极值纪录,由此可见本次暴雨过程具有很强的极端性。此外,距离新乡站不到100 km的鹤壁站降水量仅为61 mm,此次暴雨过程也具有明显的局地性。

从红外云图和雷达回波的演变看(图2),8日23日至9日02时,新乡附近有对流云团生成,并迅速向北向东扩展。此后该云团静止少动,大体呈圆形,西南侧边缘相对清晰(图2c)。这种云形结构是导致河南出现对流性暴雨的中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)的常见类型(苏爱芳等,2013)。对照雷达回波看,自8日23时起(图2e),安阳附近(河南最北端)有较强的对流云发

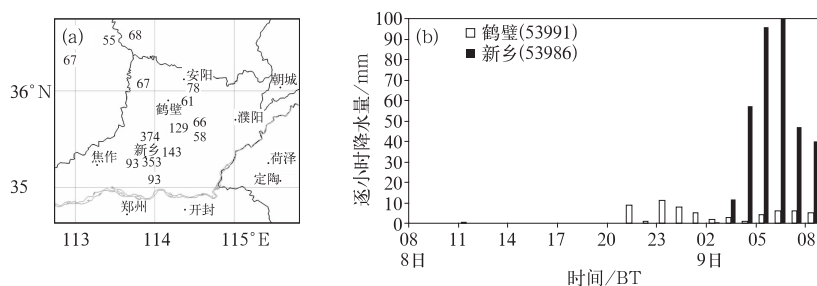


图1 2016年7月8日08时至9日08时(a)豫北附近累积降水量分布(单位:mm,仅显示 ≥ 50 mm),
(b)鹤壁气象站和新乡气象站逐小时降水量演变

Fig. 1 (a) Accumulated rainfall around northern Henan from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016 (unit: mm, only for ≥ 50 mm),
(b) hourly rainfall at Hebi Station and Xinxian Station in the same period

* <http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPS/GDPS-Supplement5-AppI-4.html>

展,其西南方向(新乡附近)有分散性对流云存在。到9日02时(图2f),上述对流云团合并,回波范围增大,此后该回波的南端不断加强(新乡附近,图2g和2h)且维持,最终导致新乡附近特大暴雨的出现。从雷达回波的演变看,此次降水期间存在明显的对流云团之间的合并及组织化过程,这些过程涉及到中小尺度系统相互作用(对流触发、冷池驱动及凝结潜热主导环境场变化等),全球模式对其的预报能力相对要差一些。

图3显示的是中央气象台对于此次特大暴雨过程的预报和相应的降水量实况。可以看出,在8日06时中央气象台发布的未来24h降水落区预报中(图3a),对山西中部的暴雨区把握较准确,但对豫北的大暴雨和特大暴雨区存在漏报,只预报了大雨。图3b和3c分别是8日18时对外发布的逐6h降水落区预报,总体而言,当值预报员并未预期豫北地区8日20时至9日08时有暴雨过程,暴雨落区仍主要考虑在山西中部附近。综上所述,不管是提前12h还是6h,中央气象台均漏报了豫北特大暴雨过程。

2 业务预报分析和决策过程回顾

7月8日06时对外发布降水落区预报之前,当值预报员通常参考的资料包括:7日20时及之前时次的高空图、8日05时及之前时次的地面图、卫星云图、雷达拼图、逐小时地面自动站数据以及7日20时及之前时次起报的各全球数值模式产品(确定性和集合预报)、区域模式产品。到8日18时对外发布降水落区预报时,除了增加相应时次的观测资料外(一般截至17时),还可以参考8日08时起报的各全球模式产品和区域模式产品。

首先分析7月8日06时的预报过程。从形势分析和要素预报可知,7日20时,500 hPa 豫北地区处在副热带高压边缘的弱低压区内,上游陕西北部有对流云团东移(图4a)。随着台风尼伯特登陆福建中部,副热带高压减弱,豫北地区处在范围较大的500 hPa 低压槽内(图4b)。但模式预报暴雨落区位于陕北到山西中西部(低层有850 hPa 切变线配合,图4b),9日08时之前,豫北地区并未有暴雨落区的预报。

到8日18时,从实况看(图5a),我国中部地区有分散性的午后热对流发生,豫北上游的对流云团呈减弱趋势,豫北地区处在地面弱高压楔顶部,云系较多,有阵雨出现。8日08时的最新EC模式预报结果显示(图5b),豫北地区500 hPa 仍处于低压槽内,850 hPa 切变线位于山西中西部。模式预报的暴雨落区略有缩小,但在山西东南部也预报了小块的暴雨区。对豫北地区而言,仍不在模式预报的暴雨落区范围内。

作为重要的预报参考,7日20时和8日08时起报的GFS模式(图6)同样也未给出豫北地区有暴雨的结论。8日08时的预报(图6b)较7日20时(图6a)略有加强,但豫北地区仍只是预报了大雨而已。其他全球模式(T639模式、GRAPES模式和JP模式)也有类似的结果,即豫北地区在8日08时至9日08时有中雨或大雨(图略)。从全球集合预报的结果看,也未能提供有效的决策支撑。图7显示的是EC模式集合预报系统给出的8日夜间到9日早晨(12h)累积降水量 ≥ 50 mm的概率预报,从图中可看出,豫北地区的概率最大仅为10%左右。GFS模式集合预报的概率最大也是10%左右(图略),对预报员的提示和帮助作用也不大。

总之,作为重要业务参考的全球模式(包括确定性和集合预报)均未能提前(24或12h)对此次暴雨过程做出有效的预报或提示。而当日恰逢2016年第1号台风尼伯特登陆福建,各级预报员的注意力主要集中在闽粤沿海地区的暴雨分析中,对华北高空低压槽中的降水预报,大致采信全球模式的预报(对区域模式的预报分析不足,见第3节)。因此,全球模式的预报失败,也直接导致本次特大暴雨的漏报。

3 主观预报失败的原因分析和反思

3.1 主观预报失败的原因

自2010年以来,EC模式的高分辨率降水和要素产品开始在我国的气象预报业务中广泛使用(之前主要是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的形势预报场)。由于EC模式的预报性能始终处于国际领先地位,因而成为业务预报中的重要参考。近年来,随着我国GRAPES模式

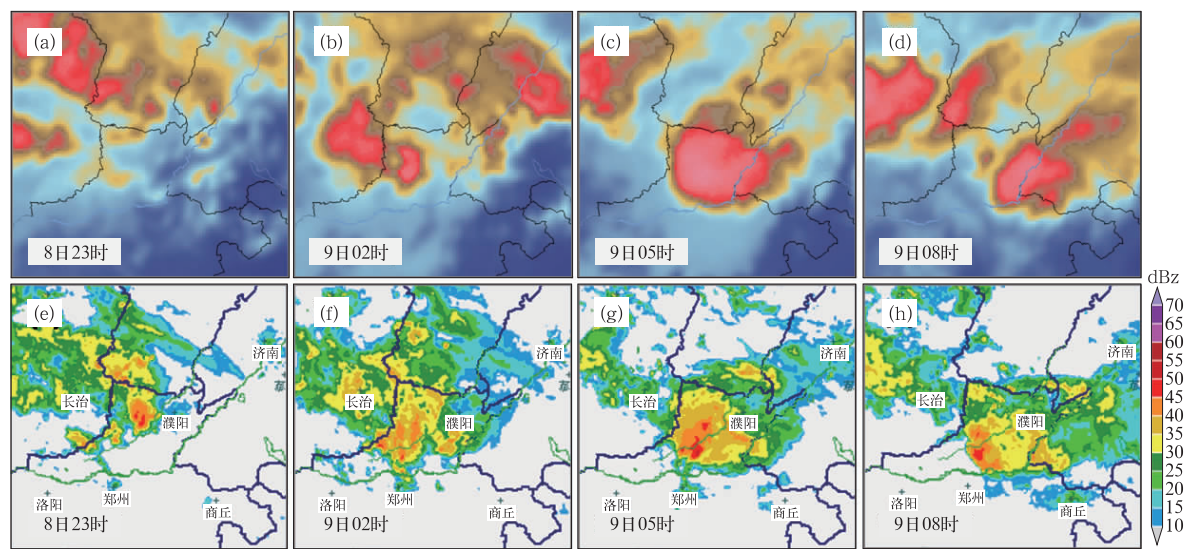


图 2 2016 年 7 月 8 日 23 时至 9 日 08 时豫北附近红外云图(a~d)和雷达组合反射率因子(e~h)
Fig. 2 Infrared cloud image (a—d), radar composited reflectivity (e—h) around northern Henan
from 23:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016

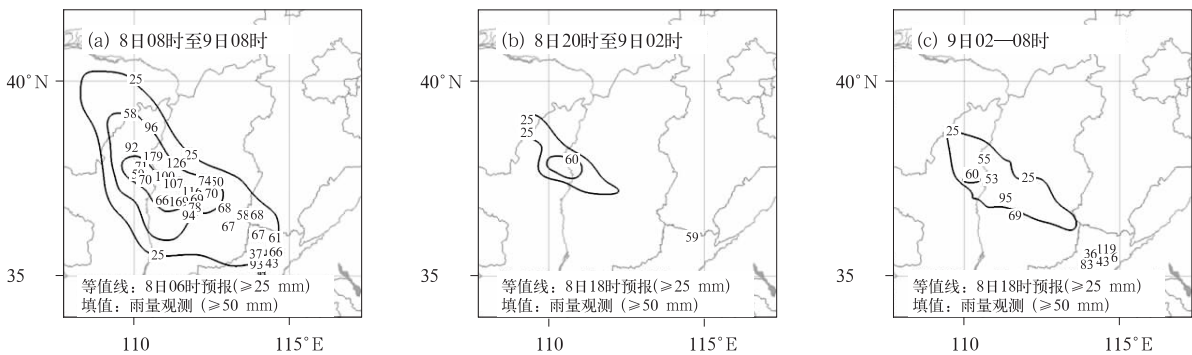


图 3 2016 年 7 月 8 日早晨和傍晚华北中部中央气象台降水量落区预报(等值线, ≥ 25 mm)
与相应时段的降水量观测值(填值, ≥ 50 mm)
(a)8 日 06 时起报的 24 h 降水量落区(8 日 08 时至 9 日 08 时),
(b)8 日 18 时起报的 6 h 降水量落区(8 日 20 时至 9 日 02 时),
(c)8 日 18 时起报的 6 h 降水量落区(9 日 02 时至 9 日 08 时)
Fig. 3 Precipitation forecasts issued by CMO in the morning and evening of 8 July 2016,
and corresponding surface observation
(a) the 24 h precipitation forecast issued at 06:00 BT 8 (for 08:00 BT 8—08:00 BT 9),
(b) the 6 h precipitation forecast issued at 18:00 BT 8 (for 20:00 BT 8—02:00 BT 9),
(c) the 6 h precipitation forecast issued at 18:00 BT 8 (for 02:00 BT 9—08:00 BT 9)

投入业务和国际合作的拓展,多种全球模式及集合预报产品在我国的业务预报中得到应用。正是在模式产品支撑水平不断提高的基础上,加上预报员的应用经验,我国的暴雨预报技巧也持续而稳定地提高。然而,我国业务预报中参考的全球模式,大多还是静力模式,仅对对流过程进行参数化处理。这些

模式对大范围降水过程的预报技巧的确是提高的,但对中小尺度天气过程的描述或预报能力不足。中小尺度天气过程往往是非静力的,且包含复杂的对流过程,这些过程不是简单的参数化方案可以描述,从第 1 节的分析可知,本次特大暴雨就涉及中小尺度系统及其相互作用,对这种类型的暴雨过程,全球

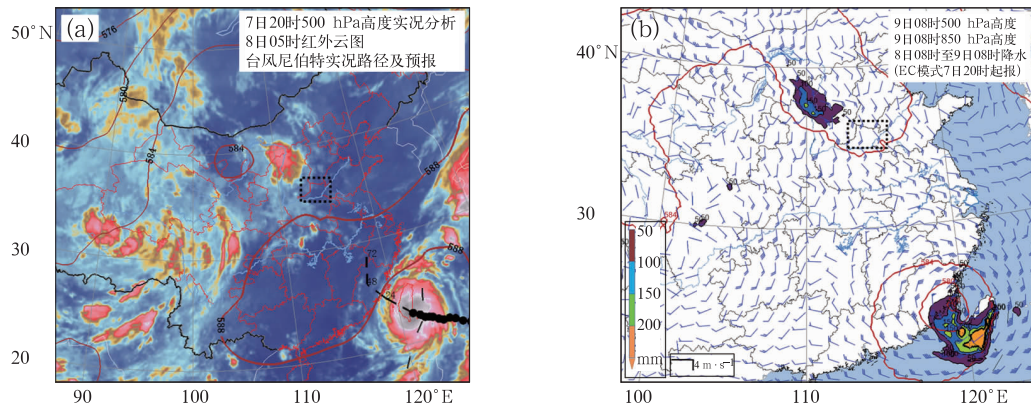


图 4 2016 年 7 月 (a) 7 日 20 时 500 hPa 高度实况分析场、8 日 05 时红外云图、台风尼伯特最新实况及 0~72 h 路径预报(虚线框指示豫北地区,长虚线指示台风路径预报),
(b) 9 日 08 时 500 hPa 高度场、850 hPa 风场及 8 日 08 时至 9 日 08 时降水量
(EC 模式 7 日 20 时起报)

Fig. 4 (a) Height analysis field of 500 hPa at 20:00 BT 7 and infrared cloud image at 05:00 BT 8 July 2016, latest track of Typhoon Nepartak and its 72 h forecast (Dashed frame indicates northern Henan, broken line indicates forecast track of typhoon),
(b) height forecast field of 500 hPa and wind forecast field of 850 hPa at 08:00 BT 9, accumulated precipitation from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016 (initiated at 20:00 BT 7 by ECMWF model)

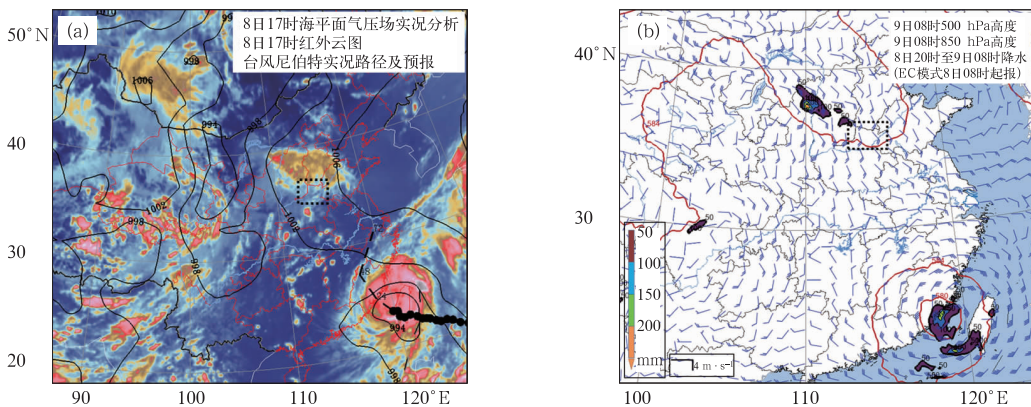


图 5 2016 年 7 月 (a) 8 日 17 时海平面气压实况分析场、红外云图、台风尼伯特最新实况及 0~72 h 路径预报(虚线框指示豫北地区,长虚线指示台风路径预报),
(b) 9 日 08 时 500 hPa 高度场、850 hPa 风场及 8 日 20 时至 9 日 08 时降水量
(EC 模式 8 日 08 时起报)

Fig. 5 (a) MSL pressure analysis field and infrared cloud image at 17:00 BT 8 July 2016, latest track of Typhoon Nepartak and its 72 h forecast (Dashed frame indicates northern Henan, broken line indicates forecast track of typhoon),
(b) height forecast field at 500 hPa and wind forecast field at 850 hPa at 08:00 BT 9, accumulated precipitation from 20:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016 (initiated at 08:00 BT 8 by ECMWF model)

模式有先天的缺陷,很难进行准确预报。像近年来发生在上海的“8·25”暴雨(曹晓岗等,2009;Yu et al, 2010)、发生在广州的“5·7”暴雨(伍志方等,2011;

吴乃庚等,2012)、发生在北京的“6·23”暴雨(章丽娜等,2014)、“7·29”暴雨(陈双等,2016),由于全球模式未能有效提供支撑,在短期时效内,主观预报均

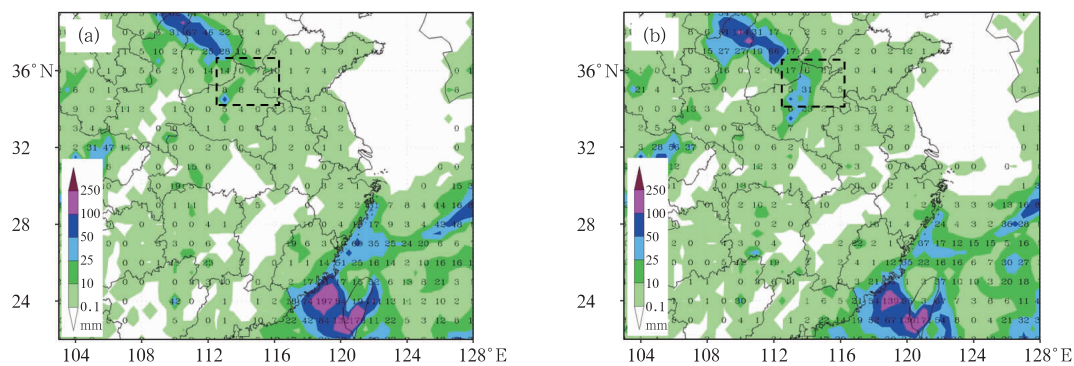


图 6 2016 年 7 月 8 日 08 时至 9 日 08 时 GFS 模式的累积降水量预报

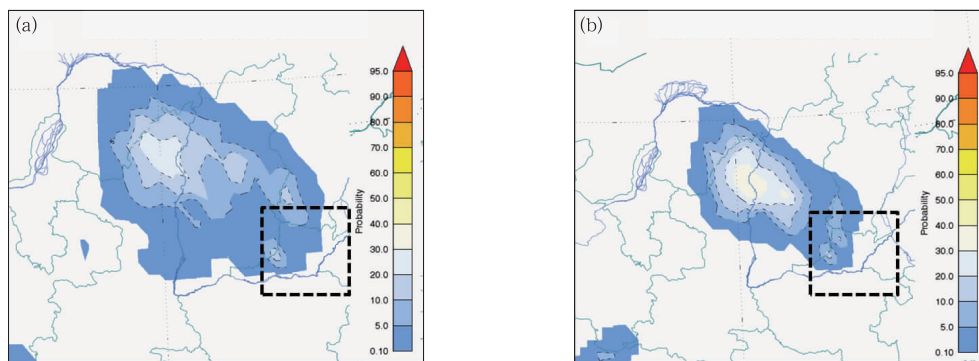
(a) 7 日 20 时起报, (b) 8 日 08 时起报

(虚线框指示豫北地区)

Fig. 6 Accumulated precipitation by NCEP-GFS model from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016

(a) initiated at 20:00 BT 7, (b) initiated at 08:00 BT 8

(Dashed frame indicates northern Henan)

图 7 2016 年 7 月 8 日 20 时至 9 日 08 时 EC 模式集合预报系统的累积降水量 ≥ 50 mm 的概率预报(单位: %)

(a) 7 日 20 时起报, (b) 8 日 08 时起报

(虚线框指示豫北地区)

Fig. 7 Probability of accumulated precipitation ≥ 50 mm by ECMWF ensemble model from 20:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016 (unit: %)

(a) initiated at 20:00 BT 7, (b) initiated at 08:00 BT 8

(Dashed frame indicates northern Henan)

是漏报的。要有效预报中小尺度系统主导的暴雨过程,非静力、显式对流处理的高分辨数值模式是必不可少的。近年来,我国多个业务预报中心陆续开发(或移植)了高分辨数值模式,这些高分辨模式均是非静力和显式对流模式,对上述特点的暴雨过程有更好的针对性。图 8 分别显示了各业务预报中心的高分辨区域数值模式在 2016 年 7 月 7 日 20 时和 8 日 08 时起报的 8 日 20 时至 9 日 08 时降水预报(主要降水时段),其中国家气象中心高分辨数值模式简称 GRAPES-MESO(4.0 版本,分辨率分别是 10 和 3 km,本例中仅显示分辨率为 3 km 的结果,图 8a 和 8b),华北区域气象中心高分辨数值模式简称 BJ-

RMAPS(分辨率 9 km,图 8c 和 8d),华东区域气象中心高分辨数值模式简称 SMS-WARMS(分辨率 9 km,图 8e 和 8f)。由于各模式产品取自不同业务中心的网站,故而色标无法统一;此外,各业务中心模式区域的中心位置和大小不一,图中用虚线框将豫北地区标出。

从图 8 可知,7 月 7 日 20 时起报的高分辨区域数值模式中,GRAPES-MESO 在豫北地区预报了 30~70 mm 的降水(图 8a),SMS-WARMS 则预报了豫北局部 70~140 mm 的降水(图 8e);8 日 08 时的预报结果中,GRAPES-MESO 在豫北地区的雨量预报增大,达到 70~140 mm(图 8b),SMS-WARMS

仍预报豫北局部有 70~140 mm, 极值雨量可达 140~250 mm(图 8f); BJ-RMAPS 模式预报的雨量较小, 7 日 20 时起报的结果只是局部 15~30 mm(图 8c), 8 日 08 时起报的结果将豫北地区的雨量继续调小(图 8d)。综合看, 业务高分辨区域数值模式对豫北地区将出现暴雨或大暴雨还是有较好的提示(3 个模式结果中, 有 2 个模式预报有明确预报)。

预报员如果对这些模式产品有较好的应用经验或信任度, 则很大可能会在 8 日 06 或 18 时, 在豫北地区预报有暴雨(预报大暴雨的可能性较小, 毕竟只有 GRAPES-MESO 预报了豫北地区有大暴雨, 而 SMS-WARMS 预报的大暴雨落区范围很小, 显示落区有很大不确定, 这种情况下预报员通常不会勉强去划定大暴雨落区)。

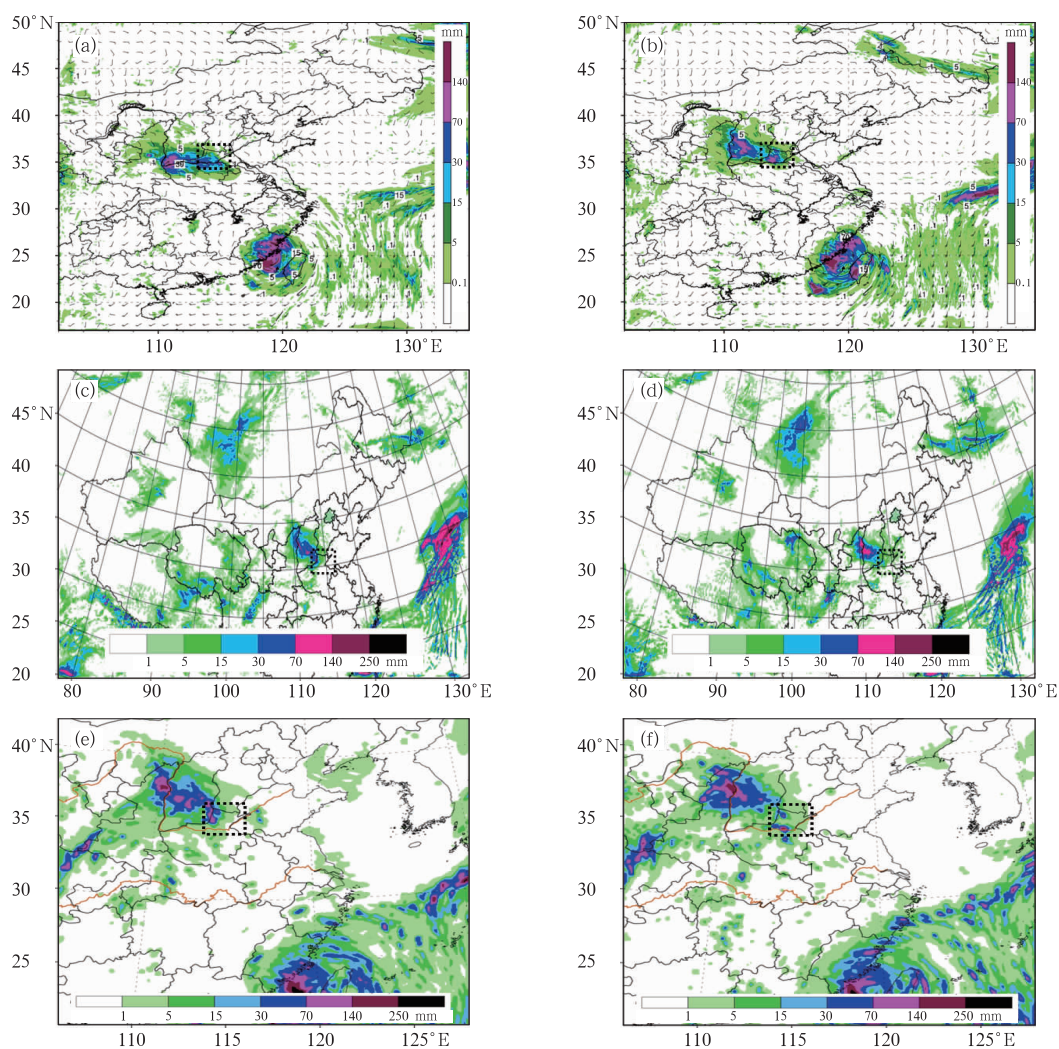


图 8 2016 年 7 月 8 日 20 时至 9 日 08 时不同高分辨区域数值模式预报的累积降水量

(a) GRAPES-MESO 模式 7 日 20 时起报, (b) GRAPES-MESO 模式 8 日 08 时起报,

(c) BJ-RMAPS 模式 7 日 20 时起报, (d) BJ-RMAPS 模式 8 日 08 时起报,

(e) SMS-WARMS 模式 7 日 20 时起报, (f) SMS-WARMS 模式 8 日 08 时起报

(虚线框指示豫北地区)

Fig. 8 Accumulated precipitation by different high resolution numerical models
from 20:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016

(a) GRAPES-MESO model (initiated at 20:00 BT 7), (b) GRAPES-MESO model (initiated at 08:00 BT 8),

(c) BJ-RMAPS model (initiated at 20:00 BT 7), (d) BJ-RMAPS model (initiated at 08:00 BT 8),

(e) SMS-WARMS model (initiated at 20:00 BT 7), (f) SMS-WARMS model (initiated at 08:00 BT 8)

(Dashed frame indicates northern Henan)

除了高分辨区域数值模式,近年来,华北、华东、华南及华中区域气象中心也开发了快速同化更新系统(rapid updated cycle 或 rapid refresh,以下简称 RUC 或 RR),这些系统通常逐 1 或 3 h 有更新的预报结果,且分辨率会更高一些,在强对流天气预报中有很好的应用潜力(陈葆德等,2013;漆梁波,2015)。图 9 和图 10 分别显示了华北区域气象中心的 RUC 系统(以下简称 BJ-RUC,分辨率 3 km)和华中区域气象中心的 RR 系统(以下简称 WH-RR,分辨率 3 km)的逐 3 h 起报的 12 h 累积降水预报(8 日 20 时至 9 日 08 时)。华东区域气象中心也有 RR 系统,但仅预报 12 h,在短期时效内作用不大,故未作分析。BJ-RUC 覆盖范围较小,且主要同化本地资料,因此启动运算早,完成运算的时间也短,通常在起报时次的 2 h 内就有预报结果。因此,到 8 日 18 时,预报员在发布预报时,应该可以参考 8 日 14 时的模式结果。从 BJ-RUC 的结果不难看出(图 9),8

日 08、11 和 14 时,系统均在豫北地区预报了 100~150 mm 的降水,极值雨量可达 250~300 mm(8 日 20 时至 9 日 08 时,下同),系统预报的大暴雨落区较稳定,但极值中心位置随着预报时次的不同而摆动。WH-RR 的预报则在逐渐调整中,8 日 08 时的预报并未在豫北地区预报有明显降水(图 10a),但从 8 日 11 时起(图 10b),模式开始预报豫北地区有 70~140 mm 的降水,极值降水可超过 140 mm(原图上限未标注,见图 10 色标),8 日 14 时预报的量级大致相同,但降水落区更靠近新乡地区(图 10c 和图 1a),显示随着预报时效的临近,模式预报的准确度在上升。综上所述,到 8 日 14 时,BJ-RUC 明确提示 8 日 20 时至 9 日 08 时豫北地区有大暴雨,且极值可达 140 mm 以上或 250~300 mm。如果对 BJ-RUC 的降水产品进行及时分析,到 8 日 18 时,预报员可在豫北地区预报有大暴雨,极值可能达到 300 mm 左右,即局地可能有特大暴雨。

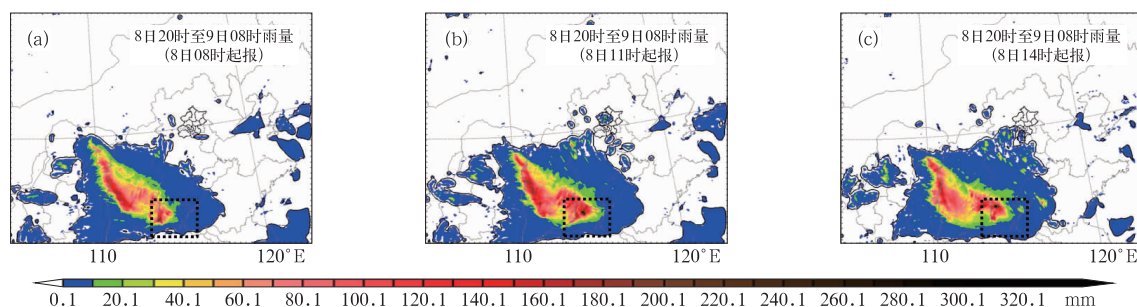


图 9 2016 年 7 月 8 日 20 时至 9 日 08 时 BJ-RUC 系统预报的累积降水量

(a)8 日 08 时起报,(b)8 日 11 时起报,(c)8 日 14 时起报

(虚线框指示豫北地区)

Fig. 9 Accumulated precipitation by BJ-RUC from 20:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2016

(a) initiated at 08:00 BT 8, (b) initiated at 11:00 BT 8, (c) initiated at 14:00 BT 8

(Dashed frame indicates northern Henan)

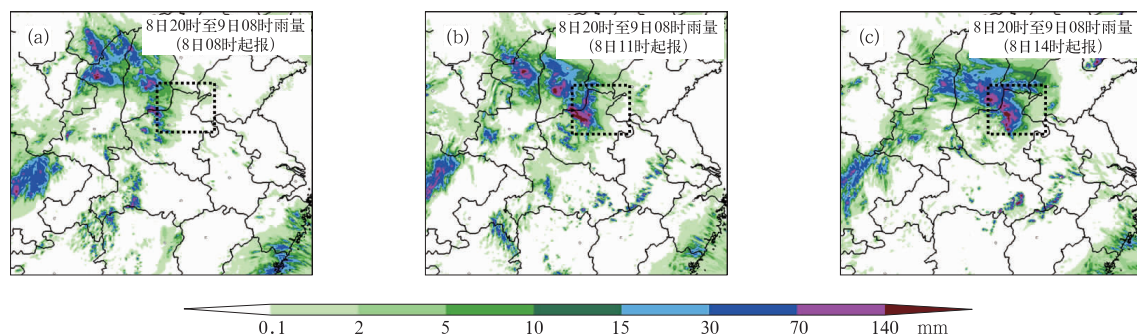


图 10 同图 9,但为 WH-RR 系统预报的结果

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for WH-RR

综合多个高分辨区域模式和快速同化更新系统的预报结果分析看,对于此次特大暴雨过程,这些模式有一定的预报能力。从业务决策参考看,提前 12 h (8 日 06 时对外预报)可提示豫北地区有暴雨;提前 6 h (8 日 18 时对外预报)可提示豫北地区有大暴雨或特大暴雨。本次特大暴雨过程预报失败的主要原因还是预报员过份依赖全球模式的结果,缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足。必须指出的是,上述区域模式的边界条件、同化方案和物理过程等方面均存在差异,其预报结果也或多或少有差异。然而对于这类由中小尺度系统主导的暴雨过程,各模式的表现大多好于全球模式,给出了更为积极的预报或提示。随着互联网通信技术的发展和中國气象局数值预报云的建立,各种高分辨区域模式产品在全国各地的实时共享程度明显提高,预报员如果积极使用高分辨区域模式产品,重视分析这些产品给出的明显(或极端)降水信号,可望很大程度上避免重大天气过程漏报。

3.2 预报反思

上文归纳了特大暴雨预报失败的主要原因是预报员过份依赖全球模式的结果,缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足。本节主要从两个方面来反思:首先分析为什么预报员会“缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足”;然后从 QPF 的业务决策环节上作一些反思。

关于预报员“缺乏使用高分辨区域数值模式产品的经验”,主要是由于高分辨区域数值模式投入业务使用的时间比较短或者未能充分业务共享所致。2014 年起,GRAPES-MESO V4.0 模式产品(10 km/3 km)才在中央气象台或部分省(区、市)投入业务使用,SMS-WARMS 模式产品和 BJ-RMAPS 模式产品 2016 年才开始在全国范围实时共享。WH-RR 系统产品 2016 年起可通过互联网调阅,但并未成为各级气象台的业务参考,只有部分感兴趣的预报员知晓其访问网址。而 BJ-RUC 系统产品同样只是限于试用阶段,并未进入业务参考之列。正由于业务使用时间过短或无法业务实时调阅,预报员的相关应用经验自然是不足的。那预报员“对这些模式产品信心不足”的原因又是什么呢?这一方面是由于这些区域模式在投入准业务运行或业务运行之前,缺少对预报员的系统性培训,尤其是缺少结合实

例分析的培训。预报员虽然大致认可区域数值模式在强对流天气预报中较全球模式有优势,但具体的原因并不清楚,也不了解区域模式的不同构架或设计,会对模式预报导致怎样的影响,比如积分区域大小、模式边界条件处理、初猜场的选取、物理方案的选择等。另一方面,在强对流天气(包括局地暴雨)预报中,这些区域模式也会存在误差和系统偏差。即模式对对流过程描述更精细的同时,也可能会更混乱(错误的对流触发、过强的对流发展、不合理的云团相互作用等)。这些误差或偏差经常会干扰预报员有效地提取模式预报信息,进而影响预报员对模式的信心。比如,前文在分析 BJ-RUC 系统降水预报(图 9)和 WH-RR 系统降水预报(图 10)时,提及 BJ-RUC 系统预报豫北地区局地有特大暴雨可能(250~300 mm),而 WH-RR 系统预报的极值在 140 mm 以上。事后分析而言,这些信息对预报大暴雨或特大暴雨应当有很好的指示意义。但实时业务中,当预报员面对这么极端的降水量预报时,有时很难去采信,因为预报员不确定这些极值是否合理(经验上,高分辨区域模式对大量级降水容易出现较多空报,但目前为止,尚未见有针对高分辨区域模式降水的系统性检验结果,尤其是针对强对流降水的触发时间、触发地点、延续时间和降水极值等)。预报员的这种“不确定”,最终影响对高分辨区域模式产品的信心。

从目前国家级和省级 QPF 业务决策过程的各环节看,预报员大体是根据某个全球模式预报的形势场(200 hPa 流场、500 hPa 高度等)、低层(700、850 或 925 hPa)风场及水汽分布来确定主要降水区的位置、降水性质等,然后参考该全球模式的降水量级、其他全球模式的降水预报结果、客观预报方法(主要基于模式产品)的预报结果来最终确定降水落区。近 1~2 年,部分预报员也会参考高分辨区域数值模式的结果,并根据前期的检验或经验对落区作相应调整。具体业务中,预报员要考虑的因素还包括上一次主观预报结果、其他省(区、市)台站的预报结论等。概略的业务决策过程示意如图 11,其中虚线框表示该环节的业务应用还不足或不规范。当然,不同的预报员参考的资料不尽相同,进行思考和决策的顺序也未必固定,因此图 11 只是大致涵盖预报员参考的主要资料和通常情况下的决策环节或过程。

这个业务决策过程主要是基于全球模式的形势



图 11 国家级或省级 QPF 业务决策过程概略图

Fig. 11 General decision process of QPF at national or provincial observatory

分析来大致划定强降水落区,划定的规则大致基于天气概念模型的总结(分析槽、切变线、水汽辐合和稳定度等),期间也参考多种模式或释用方法的降水预报结果(主要还是基于全球模式,区域模式的结果并未完全纳入参考或使用不充分)。这种决策过程的主要问题在于:(1)基于模式预报的天气形势分析来确定强降水落区,通常来说,和模式本身预报的强降水落区不会有很大差别,毕竟模式预报的降水也来自环流形势的配置。当然,如果形势配置有利于强对流天气发生,预报员或可根据这种思路部分修正模式预报的降水强度或调整落区;(2)要预报中小尺度系统主导的强降水或极端降水,区域模式的预报结果非常重要,这一环节在目前的业务决策过程中仍不够突出,或者预报员的整体应用能力仍有很大不足;(3)概率化的思维或理念在决策过程中体现

不够。总体而言,现代数值预报技术正由确定性预报向概率性预报转化(杜钧和陈静,2010;杜钧和钱维宏,2014),从预报产品的角度看,不远的将来,所有的预报产品都将是概率化的,服务产品则可根据需求不同,生成确定性服务产品或概率性服务产品。而目前 QPF 决策过程中的参考产品或中间产品,很多还是基于确定性结果,最终也决策出确定性结果,这显然有悖数值预报技术的发展趋势。因此,在业务决策过程中要逐渐树立概率化思维(参考概率产品并得出概率化结果),以适应这一技术发展趋势。

仔细回顾 2016 年 7 月 8 日 08 时的天气形势配置可以发现,本次豫北特大暴雨发生时,华东沿海有台风活动并登陆(图 12a)。根据孙建华等(2005)对 20 世纪 90 年代所有华北大暴雨过程的统计研究表明,约 74% 的华北大暴雨个例中,有台风直接或间接影响。台风的作用主要表现在:与中纬度系统直接作用导致大暴雨;台风东侧和北侧的东南气流向华北地区输送水汽。从图 12a 可知,“尼伯特”东侧和北侧的东南气流在沿海地区可达 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,到达内陆(黄淮地区)仍有 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。丛春华等(2012)对我国远距离台风暴雨的研究表明:远距离台风暴雨的落区主要有两个类型,I 型位于环渤海地区(包括河南大部),II 型位于川陕地区。其中,I 型暴雨落区示意图和相应的高层流场和低层风场配置分别见图 12b 和 12c。图 12a 和 12c 的 850 hPa 风场配置有很大的相似性,台风东侧和北侧的东南气流向远离台风的华北地区输送水汽。本例中

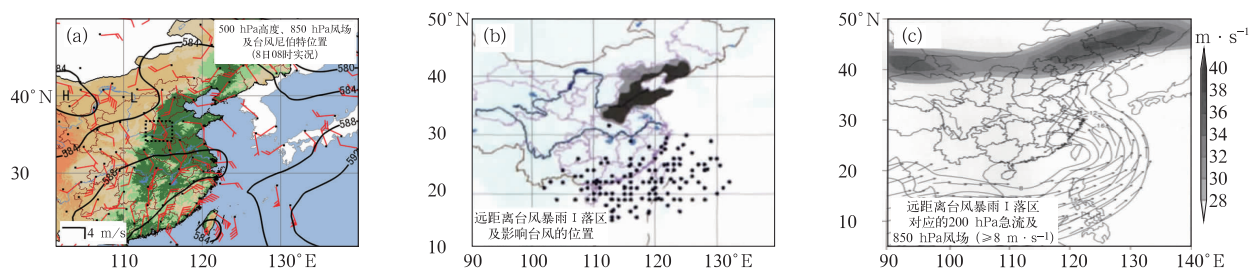


图 12 (a)2016 年 7 月 8 日 08 时的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场及“尼伯特”台风位置(虚线框指示豫北地区),

(b) 远距离台风暴雨 I 区分布(阴影)及相应的影响台风位置(黑点)(摘自丛春华等,2012),

(c) 远距离台风暴雨 I 区对应的平均 200 hPa 急流场、850 hPa 风场($\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)(摘自丛春华等,2012)

Fig. 12 (a) Height field at 500 hPa, wind plot at 850 hPa and position of Typhoon Nepartak at 08:00 BT 8 July 2016 (Dashed frame indicates northern Henan),

(b) typhoon remote precipitation zone I (shaded area) and related positions of typhoon (dot) (extracted from Cong et al, 2012),

(c) corresponding jet flow at 200 hPa (shaded area) and wind field at 850 hPa ($\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) for typhoon remote precipitation zone I (extracted from Cong et al, 2012)

200 hPa 的流场结构与图 12c 不太一样,本例中豫北地区处在 200 hPa 急流分流区(图略),而图 12c 中,豫北地区大致处在 200 hPa 急流区入口的右侧,但总体而言,这种分流区也是有利于暴雨发生的。由此可知,本次豫北特大暴雨与台风关系密切,很可能也是一次远距离台风暴雨。此外,从图 12a 也可以看出,豫北地区处在山西高原南麓的平原。本次过程中,上游雷暴下高原之后,在豫北地区不断加强发展。这种与地形关系密切的对流云团演变模式,前人有很好的研究和统计(孙继松,2005;孙继松和杨波,2008;陈双等,2011;黄荣等,2012)。如果综合考虑地形作用和台风影响,结合前人研究成果,能否在业务预报中提供某种客观的概率预报结果,比如,依据最新的高低空观测、地面降水实况、卫星云图和台风位置等,结合多年历史资料统计,得出华北地区(或其他地区)出现大暴雨的概率预报。这一概率预报信息基于大样本的历史资料和相关性判识,可能包含目前数值模式尚不能解析或正确描述的某些物理过程,因此与数值模式的预报可以形成相互补充,陶祖钰(2016)对此有较系统的阐述。

而对于高分辨区域模式产品和 RUC 的参考应用,也最好使用概率化产品。从 3.1 节的分析看,不同高分辨区域模式的预报结果会有差异(图 8),不同起报时刻的 BJ-RUC 产品也会有改变(图 9)。当这些产品越来越多(模式产品增多,更新频次密集),模式结果不一致的情况会经常出现(类似图 8),预报员很难在短时间内合理决策。合适的办法是将这些模式产品采用集成、加权(傅娜等,2013)或其他客观方法得到概率化的产品,这样既可以客观地反映区域模式的总体结果,也可以大大减少预报员的工作负担;毕竟,在预报员发布预报之前用于分析和决

策的时间是有限的(通常只有 1~2 h)。

结合上述分析,增加基于实况和基于高分辨区域模式(包括快速同化更新)的相关预报产品,并充分运用概率化思维之后,推荐更合理的 QPF 业务决策过程(图 13),其中“快速同化更新预报分析”用虚线框给出,主要是考虑到现阶段很难实时共享和集成处理各业务中心开发的 RUC 产品。可以看出,在推荐的业务决策过程中,概率化产品应基本贯穿每个决策环节。

4 结论与讨论

2016 年 7 月 9 日豫北特大暴雨的短期预报是不成功的。本文的目的不在于揭示本次特大暴雨的形成机制或中小尺度演变过程,而试图通过对业务模式(全球和区域)的检验分析和现有 QPF 业务决策过程的反思,归纳出在具体业务决策环节中,应该重视或改进之处,以便预报员能在特定业务环境下(参考资料繁多、决策时间短促、预报范围覆盖大),高效而相对准确地作出决策。主要结论如下:(1)此次降水过程存在明显的对流云团之间的合并及组织化过程,这些过程涉及到中小尺度系统相互作用(对流触发、冷池驱动和凝结潜热主导环境场变化等),全球模式的预报能力相对要差一些。(2)作为重要业务参考的全球模式(包括确定性和集合预报)均未能提前(24 或 12 h)对此次暴雨过程做出有效的预报或提示。(3)综合多个高分辨区域模式和 BJ-RUC 的预报结果分析看,这些模式大多表现出更好的预报能力。从业务决策参考看,提前 12 h(8 日 06 时对外预报)可提示豫北地区有暴雨;提前 6 h(8 日 18 时对外预报)可提示豫北地区有大暴雨或特大暴雨。本次特大暴雨过程预报失败的主要原因是预报员过份依赖全球模式的结果,缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足。高分辨区域模式在投入业务运行之前,需增加对预报员的系统性培训,尤其是结合实例分析的培训,由此才能更有效地发挥这些模式产品的业务效能。(4)现代数值预报技术正由确定性预报向概率性预报转化,从预报产品的角度看,不久的将来,所有的预报产品都将是概率化的。在现有 QPF 业务流程中逐渐增加概率产品的使用(包括基于实况资料分析的客观概率预报和基于多个或多时次高分辨区域模式的客观概率预报),既符合新技术的发展趋势,也可

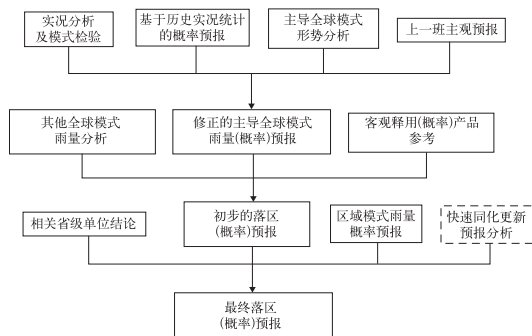


图 13 推荐的 QPF 业务决策过程示意图

Fig. 13 A proposed decision process for QPF

望对暴雨或极端降水的预报提供更有效的支撑。

从本个例的预报检验看,分辨率为3 km的高分辨率区域模式的表现似乎要好于分辨率为9 km的模式。例如GRAPES-MESO(3 km)的预报结果好于BJ-RMAPS和SMS-WARMS(图8,后两者分辨率为9 km);而3 km分辨率的BJ-RUC均在豫北地区预报了大暴雨或特大暴雨(图9)。Kain et al(2008)的研究表明:对于面积大于200 km²(水平尺度至约15 km)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模式表现类似;对面积小于200 km²的对流回波,WRF2则更接近实况,也可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,如果要预报中尺度对流系统演变,考虑到计算成本,模式分辨率从4 km升级到2 km可能并无必要。Clark et al(2012)也指出:即使将模式分辨率提高到1 km,对预报中尺度对流系统而言,也未必能给预报员提供更积极的帮助。从我国各地高分辨区域模式的发展趋势看,2~3年内都有将模式分辨率提升到1 km的计划。华南区域气象中心甚至已经在2017年3月开始业务运行1 km分辨率的快速同化更新系统。研究表明(金之雁和王鼎兴,2002),模式分辨率提高1倍,计算时间可能会增加12~16倍。因此,模式分辨率的提高会导致运算成本(包括存储成本)的迅猛增加。如果旨在解决水平尺度20~100 km对流系统的预报问题(β 中尺度的低端,大致相当于我国县级行政区的范围),从国外的研究和本例的检验情况看,模式分辨率达到3 km就可望满足业务需求(单就分辨率而言)。如果能发展3 km分辨率的集合预报系统(20~40个成员),则可望明显提高对此类对流系统的预报支撑。如将资源用于发展1 km分辨率的确定性模式,一方面可能耗费更多的计算资源,另一方面也未必能取得更多预报价值。从欧美国家的业务高分辨数值模式发展趋势看,3~5年的计划还是着重现有1~3 km分辨率模式的集合预报系统研发,并未追求更高分辨率的确定性模式。

此外,一般而言,3 km分辨率的区域模式业务运行,都会需要分辨率更粗(9 km左右)的区域模式提供边界条件或背景驱动场,这一因素对3 km分辨率区域模式预报性能的优劣是至关重要的(陈葆德等,2013;漆梁波,2015)。因此,各业务中心也需持续投入研发力量,稳定提高9 km(或相当)分辨率

区域模式的性能,才可保障分辨率更高的区域模式在极端强天气中有更好的表现。

致谢:感谢国家气象中心张涛首席提供GRAPES-MESO降水预报产品;中国气象局北京城市气象研究所范水勇博士提供BJ-RMAPS及BJ-RUC降水预报产品;华中区域气象中心快速同化更新系统的预报产品取自 <http://yubao.whihr.com.cn/>。

参考文献

- 边清河,丁治英,吴明月,等,2005.华北地区台风暴雨的统计特征分析[J].气象,31(3):61-65.
- 曹晓岗,张吉,王慧,等,2009.“080825”上海大暴雨综合分析[J].气象,35(4):51-58.
- 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[J].气象科技进展,3(2):29-35.
- 陈双,王迎春,张文龙,2016.北京香山“7.29” γ 中尺度短时局地大暴雨过程综合分析[J].暴雨灾害,35(2):148-157.
- 陈双,王迎春,张文龙,等,2011.复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J].气象,37(7):802-813.
- 丛春华,陈联寿,雷小途,等,2012.热带气旋远距离暴雨的研究[J].气象学报,70(4):717-727.
- 杜钧,陈静,2010.单一值预报向概率预报转变的基础:谈谈集合预报及其带来的变革[J].气象,36(11):1-11.
- 杜钧,钱维宏,2014.天气预报的三次跃进[J].气象科技进展,4(6):13-26.
- 冯伍虎,程麟生,程明虎,2001.“96.8”特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟[J].气象学报,59(3):294-307.
- 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[J].气象,39(10):1247-1256.
- 何光碧,张利红,屠妮妮,2014.区域中尺度模式对西南地区一次强降水过程的预报分析[J].高原山地气象研究,34(2):1-7.
- 侯凯,闫瑾瑜,靖春悦,等,2011.2008年7月13—14日河南大暴雨过程的V-30图特征分析[J].气象与环境科学,34(2):49-53.
- 黄荣,王迎春,张文龙,2012.复杂地形下北京一次局地雷暴新生和增强机制初探[J].暴雨灾害,31(3):232-241.
- 江吉喜,项续康,1997.“96·8”河北特大暴雨成因初探[J].气象,23(7):19-23.
- 金之雁,王鼎兴,2002.一种适用于有限差分模式的负载均衡区域分解方法[J].气象学报,60(2):188-193.
- 刘还珠,王维国,邵明轩,等,2007.西太副高影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,31(4):727-734.
- 毛冬艳,朱文剑,樊利强,等,2014. GRAPES_MESOV3.3模式强天气预报性能的初步检验[J].气象,40(12):1429-1438.
- 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[J].气象,41(6):661-673.
- 苏爱芳,孙景兰,谷秀杰,等,2013.河南省对流性暴雨云系特征与概念模型[J].应用气象学报,24(2):219-229.
- 孙继松,2005.气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J].高原气象,24(1):62-69.
- 孙继松,王华,王令,等,2006.城市边界层过程在北京2004年7月

- 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学, 30(2): 221-234.
- 孙继松, 杨波, 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 32(6): 1352-1364.
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等, 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506.
- 陶祖钰, 2016. 谈谈统计预报的必要性[J]. 气象科技进展, 6(1): 6-13.
- 陶祖钰, 郑永光, 2013. “7·21”北京特大暴雨的预报问题[J]. 暴雨灾害, 32(3): 193-201.
- 吴乃庚, 林良勋, 曾沁, 等, 2012. 广东高空槽后暴雨的多尺度天气特征及概念模型[J]. 热带气象学报, 28(4): 506-516.
- 伍志方, 曾沁, 吴乃庚, 等, 2011. 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析[J]. 气象, 37(7): 838-846.
- 曾明剑, 王桂臣, 吴海英, 等, 2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. 气象学报, 73(5): 868-882.
- 章丽娜, 王秀明, 熊秋芬, 等, 2014. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害, 33(1): 1-9.
- 张小玲, 林建, 张涛, 等, 2015. 2013 年暖季试验概述[J]. 气象, 41(6): 521-532.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2008. 短期天气预报: GB/T 21984—2008[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周鸣盛, 1993. 我国北方 50 次区域性特大暴雨的环流分析[J]. 气象, 19(7): 14-18.
- 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[J]. Bull Am Meteor Soc, 93(1): 55-74.
- 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[J]. Wea Forecasting, 23(5): 931-952.
- Yu Zifeng, Liang Xudong, Yu Hui, et al, 2010. Mesoscale vortex generation and merging process: a case study associated with a post-landfall tropical depression[J]. Adv Atmos Sci, 27(2): 356-370.