

谌芸,曹勇,孙健,等,2021.中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J].气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J, et al, 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6): 655-670 (in Chinese).

中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考*

谌 芸^{1,2} 曹 勇¹ 孙 健¹ 符娇兰¹ 董 全¹
于 超¹ 刘凑华¹ 唐 健¹ 郭云谦¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082

提 要: 定量降水预报(QPF)是中央气象台最传统且最核心的天气预报业务,随着经济社会的快速发展对降水预报精细化程度需求越来越高,提升降水预报的精细化水平成为中央气象台面临和需要解决的首要问题之一。目前中央气象台制作和发布空间分辨率 5 km,未来 3 天逐 1 h 时间间隔、未来 10 天逐 3 h 时间间隔的网格化定量降水预报产品,并发布雨、雨夹雪、冻雨和雪降水相态及新增积雪深度的精细化预报产品。本文围绕精细化降水预报技术这一关键环节,回顾了中央气象台在数值模式精细化降水预报、时空精细化降水预报技术、降水相态和新增积雪精细化预报技术以及精细化检验评估技术等方面的进展,并思考目前精细化降水预报业务技术发展存在的问题及未来的发展,以期为中心和全国精细化 QPF 技术的发展提供重要参考。

关键词: 中央气象台,定量降水预报(QPF),精细化网格预报,预报检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.002

Progress of Fine Gridded Quantitative Precipitation Forecast Technology of National Meteorological Centre

CHEN Yun^{1,2} CAO Yong¹ SUN Jian¹ FU Jiaolan¹ DONG Quan¹
YU Chao¹ LIU Couhua¹ TANG Jian¹ GUO Yunqian¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

Abstract: Quantitative precipitation forecast (QPF) is the traditional and critical forecasting operation of National Meteorological Centre (NMC). With the rapid development of society and economy and its increasing demand in the fineness of various meteorological products, developing the fine gridded QPF has become the primary task of NMC. A fine gridded QPF product system with a spatial resolution of 5 km and 1 h interval for 3 d lead time and 3 h interval for 3–10 d lead time has been built, which covers rain, sleet, freezing rain, snow and depth of new snowfall forecast. This paper presents the progress of the related technology development in high resolution numerical weather forecast model, fine gridded QPF, gridded precipitation type and depth of new snowfall forecast and refined QPF verification. Finally, the existing problems and future developments of the current fine gridded QPF technology are discussed.

Key words: National Meteorological Centre, quantitative precipitation forecast (QPF), fine gridded forecast, forecast verification

* 国家自然科学基金项目(41975001)和国家重点研发计划(2017YFC1502501、2017YFC1502103)共同资助

2020 年 6 月 20 日收稿; 2021 年 1 月 6 日收修定稿

第一作者:谌芸,主要从事中尺度天气研究. E-mail:chenyun@cma.gov.cn

引言

定量降水预报(QPF)是中央气象台最传统且最核心的预报业务,20 世纪 60 年代中后期便开始国家级定量降水预报业务(宗志平等,2012)。随着经济社会快速发展对降水预报的精细化程度提出了更高的要求,如何在提高预报准确率的同时又能满足社会各界对降水预报产品精准化需求,是中央气象台面临和需要解决的首要问题。经过几十年的发展,中央气象台降水预报的精细化程度有了很大的提高。

长期以来,中央气象台开展的全国范围内降水预报业务的预报产品为等级落区预报,时空分辨率较低,预报时效不长,更新频次较少。到 2012 年,中央气象台 QPF 业务包括:每日两次未来 1 天逐 6 h 时间间隔的短时定量降水预报以及未来 7 天逐 24 h 时间间隔的短中期定量降水预报。2014 年中央气象台组织开展网格化定量降水预报技术研发和系统建设,并发布空间分辨率 5 km,未来 3 天逐 1 h 时间间隔、未来 10 天逐 3 h 时间间隔的网格化定量降水预报产品,该产品较大程度满足了社会对于数字化网格化天气预报服务的需求(金荣花等,2019;曹勇等,2016)。同时在降水相态预报方面,也由原来只有雨和雪预报,提升到雨、雨夹雪、冻雨、雪等降水相态预报。对于降雪预报,不仅有降雪量预报还有积雪深度(包括新增积雪深度)预报。相比而言,美国海洋和大气局下属的定量降水预报部门经过若干年的技术及平台的研究设计,已搭建起较为成熟的定量降水预报格点化技术体系,能够提供 0~168 h 预报时效的格点化定量降水预报产品,最短时间分辨率为 6 h、最高空间分辨率为 5 km,并能提供如 grib2,shapefile,KML 等多种流行的气象存储格式供公众下载使用(Novak et al,2014)。其定量降水预报格点化产品储存于国家数字预报服务器中,并可通过网页互动的形式展示和访问,在此基础上,美国国家大气海洋局于 1994 年开始进行逐小时快速更新同化预报,至 2016 年已经历三代系统升级,空间分辨率由 60 km 升级至当前的 3 km,更新频率由 3 h 一次升级为 1 h 一次,覆盖区域为北美大陆,预报时效为短时 18 h(Benjamin et al,2016)。由于美国快速更新同化工作起步快,工作框架统一,降水预报也包含其中统一考虑,但其结果主要是模式输出

结果,业务中并未进行进一步的实况更新订正工作。我国的国家级 QPF 业务与之存在一定差距,但思路也略有区别。

为支撑精细化降水预报业务的发展,需要发展现代化 QPF 精细化预报技术。在目前基于数值模式的现代天气预报中,数值预报模式的发展是现代预报技术的基础,主导着整个 QPF 业务的发展(李泽椿等,2019;钟琦等,2020)。在数值模式基础上,为进一步提高降水预报准确率,则需要主客观融合的平台采用数据挖掘方法从海量预报数据中获取最优的客观预报;同时,预报员在模式和最优客观预报的基础上发挥人的作用,依靠对天气概念模型的构建、模式预报的理解进行可能的主观订正;在准确率提升的基础上,通过降尺度等统计方法加入降水的气候、地形分布等信息进行时空降尺度,获得更高分辨率产品,实现时空、相态等方面的精细化预报。实时检验评估技术贯穿整个技术流程,提供模式及产品误差和质量信息,改善数值模式,同时支持预报员主观订正以及对预报质量的管理。为此,本文对当前国家级精细化降水业务技术的发展现状进行总结,并对未来发展提出思考。

1 精细网格预报的基础信息——数值预报

中央气象台目前业务中综合使用来自不同预报中心的模式系统,由于不同模式同化不同观测资料,同时采用不同动力框架和物理参数过程,导致对不同区域、季节、时效和类型的天气预报各有优缺点。另外,不同类型的数据源可提供相互补充的 QPF 信息,例如全球数值模式系统能够提供大尺度系统的降水信息,集合模式系统能够提供预报的不确定性和低概率的极端天气信息,高分辨率中尺度模式可提供对流性降水系统的形态、演变等特征。因此整合海量数值模式预报数据信息是精细化 QPF 的基础。

欧洲中期天气预报中心(以下简称 EC)成立于 1975 年,该中心于 1979 年 6 月首次做出了实时的中期天气预报,1979 年 8 月 1 日开始发布业务性中期天气预报,为其成员国提供实时的天气预报服务。EC 的全球模式 IFS(Integrated Forecasting System)从业务运行以来,模式分辨率不断提高,核心的资料同化系统技术也不断得到发展,其预报水平

一直处于全球中期天气数值预报的领先地位。目前的 EC 中期天气预报系统由一个确定性预报和包含 51 个成员的集合预报系统组成,资料同化为集合四维变分 EDA(ensemble of data assimilations),系统每天运行四次,其中确定性预报分辨率约为 9 km,每次进行 10 d 预报,其北半球可用预报天数接近 9 d。集合预报系统分辨率约为 18 km,每次 15 d 预报,提供概率预报产品。

美国国家环境预报中心(NCEP)早在 20 世纪 80 年代(Stackpole, 1973),就率先将全球数值预报模式投入业务运行,其分辨率为 2.5° ,垂直层次为 8 层。1980 年 8 月全球谱模式及优化插值产生的初始条件进入业务模式系统,预报能力和时效得以延长和提高(Sela, 1980)。随着高性能计算机的快速发展、参数化方案的引入,初始分析、资料同化系统的改进和完善,全球谱模式增加为每天四次,预报时效至 16 d,水平分辨率达到 13 km,垂直方向为混合垂直坐标共 64 层。2019 年 6 月,结束了长达 40 年的全球谱模式的使用,新的 FV3 非静力平衡模式以及新的、改进的物理过程投入业务运行,水平分辨率为 13 km,垂直方向为混合垂直坐标共 64 层,初始分析场为四维混合同化系统。其有效预报能力(60%AC)稳定在 8.5 d 左右。

我国全球与区域同化预报系统(GRAPES)全球数值模式(GRAPES_GFS),特别是 GRAPES-Meso/RAFS(徐枝芳等, 2013)和 GRAPES-3 km 中尺度数值模式的建成极大地支撑了降水时空和相态的精细化预报。

GRAPES-Meso 自 2006 年在国家气象中心业务化运行以来,成为中央气象台主要应用的区域数值模式,其先后经历了三次大的业务系统升级:1)2014 年,实现 GRAPES-Meso V4.0 版的业务升级(黄丽萍等, 2017; 庄照荣等, 2019),提高模式水平和垂直分辨率(10 km, L50),解决降水预报偏差偏大、近地面温度预报偏差过大以及计算不稳定等关键业务问题,增强资料尤其是非常规资料的同化能力,整体技术和预报能力均有明显提升;2)2018 年,GRAPES-Meso V4.3 业务化运行,三维云分析系统的业务化应用(朱立娟等, 2017),明显提高系统快速循环同化预报能力;3)2019 年,GRAPES-Meso 全国 3 km 分辨率系统实现准业务化运行,其降水和近地面要素的预报能力明显优于 GRAPES-Meso 10 km 系统,标志着 GRAPES 首次实现覆盖全国范

围的对流可分辨(千米级分辨率)的业务预报,有效提高我国中小尺度灾害性天气预报能力,同时明显提升对西部地区业务天气预报的支撑能力。通过这几次关键技术的升级,GRAPES-Meso 的降水预报 ETS 评分(Jolliffe and Stephenson, 2003)逐年提高(图 1)。

随着 2019 年国家气象中心完成 GRAPES 覆盖全国范围的 3 km 分辨率系统业务化,实时给国家级和各级预报台站提供模式预报产品,有效支撑国家级和各级台站的中小尺度灾害性天气预报业务。其主要工作包括:1)在三维雷达质量控制拼图系统中实现对 SC/CD/CC 型号雷达资料的读取、质量控制及拼图处理,为模式提供全国范围特别是西部地区的云初始信息;2)采用初始时刻水平平均场优化初始参考廓线,实现单调水平扩散方案,提高动力框架计算精度及稳定性;3)改进优化边界层方案和云量诊断方案,提高对 2 m 温度和降水的预报精度(图 2);4)直接诊断及输出螺旋度、垂直风切变产品,增加降水相态(降雪)产品,为中小尺度灾害性天气预报提供大量诊断分析产品,有力地支撑降水精细化预报的发展。

GRAPES-3 km 模式系统虽然取得较大进展,但是还有许多需要完善之处,如:尚未实现其同化系统和云分析的业务化,大量高时空分辨率资料未能在业务中发挥作用,同时由于尚未实现区域模式连续滚动循环,导致其中尺度信息需要较长的“spin-up”时间,难以发挥高分辨率模式对时空精细化特别是短时临近预报的支撑。因此,GRAPES 研发团队在当前 GRAPES-3 km 模式系统基础上建立 3 h 循环系统以实现每天 8 次更新预报,解决高密度观测资料同化和实现模式“暖启动”的关键问题,具体主要包括同化系统中关键参数如背景误差参数的重

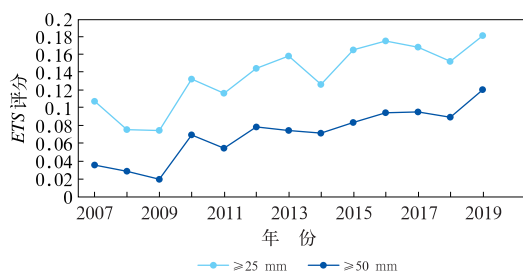


图 1 2007—2019 年 GRAPES-Meso 模式 24 h 降水预报检验 ETS 评分年平均演变

Fig. 1 Annual averaged ETS score for 24 h accumulated precipitation prediction of GRAPES-Meso from 2007 to 2019

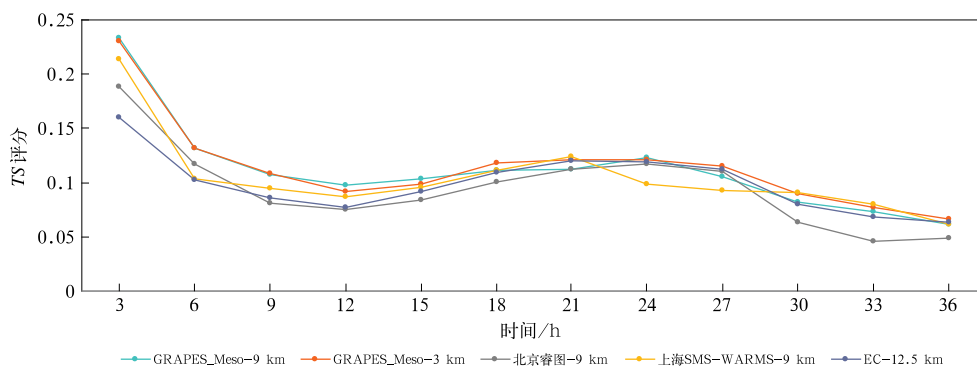


图 2 业务模式在 2019 年夏季(6—8 月)的 3 h 强降水(≥ 10 mm)TS 评分

(来自中国气象科学研究院区域高分辨率数值预报检验评估平台)

Fig. 2 TS score for heavy rainfall (≥ 10 mm $\cdot$ 3 h $^{-1}$) forecast from different NWP models in 2019 summer
(From the Regional High-Resolution NWP Verification System, developed by Chinese Academy of Meteorological Sciences)

新统计、多尺度水平相关、质量控制变量和 UV 风场控制变量的实现,高时空密度资料如地面湿度、AMSUA 资料、雷达、FY-4 卫星资料的有效同化等。经过研发和大量试验,GRAPES-3 km 3 h 循环预报系统于 2020 年 6 月实现业务运行,评估表明其预报能力优于目前 GRAPES-3 km 模式,为降水精细化预报奠定了重要基础。

2 网格降水预报的主客观融合、时空降尺度技术和滚动更新方法

2.1 主客观融合降水反演技术

降水时空精细化预报特点主要从空间、时间以及高频次滚动更新三个方面体现。目前中央气象台可提供逐小时更新,空间分辨率为 5 km,未来 3 天内逐 1 h 时间间隔,未来 10 天内逐 3 h 时间间隔的网格化定量降水预报产品,该产品的生成主要依赖网格化降水预报技术和快速滚动更新精细化降水预报技术。

降水主客观融合以及时空降尺度技术高分辨率网格化降水预报产品并非通过简单数值模式降水预报的空间插值获取,而是对预报员对数值模式的检验评估、降水天气形成机制的分析及长期的预报经验基础上的主观预报结果进行网格化降水预报技术的应用,实现降水精细化预报。网格化降水预报技术主要包括:主客观融合降水反演技术、降水空间统计降尺度技术、降水时间拆分技术 3 个技术。

主客观融合降水反演技术主要包括以下四个步

骤:1)基于多模式 QPF 实时数据集,依据针对不同时效、季节、需求的使用经验,挑选合适的 QPF 数据源;2)根据对历史、近期预报检验和对未来不确定性评估,采用多模式 QPF 集成技术获得最优猜测场;3)基于各种天气概念模型和对模式误差的理解,利用 QPF 预报场调整技术、等值线订正技术进一步校正最优猜测场;4)等值线主客观融合反演技术,主要利用最优客观降水预报背景场以及预报员主观等级落区预报实现与业务模式分辨率相当的粗网格格点化定量降水预报。在此基础上,通过降水空间统计降尺度技术实现从粗到细网格降水场转变。由于动力降尺度需要依赖成熟可靠的中尺度模式和耗费大量计算资源和时间(Pavlik et al, 2012),实际预报业务中一般利用统计降尺度技术,如美国海洋和大气局下属的水文预报中心,使用地形地图投影技术进行降水降尺度(Schaake et al, 2004)。中央气象台使用降尺度比例矢量技术来实现降水的空间统计降尺度(苏翔和袁慧玲, 2020),利用粗与细分辨率的定量降水估测产品,建立大尺度到小尺度降水的气象统计关系并确定降尺度比例矢量,实现从粗到细网格降水的映射转化。比例矢量关系由实况降水所得,能体现出局地由于地形或气候特点导致的降水精细尺度的变化,体现不同空间尺度降水的气象关系。降水时间拆分技术提高降水预报的时间分辨率,将某一时段总降水量合理地分配于各个精细化预报时段内,提高时间分辨率的同时也提高精细化时段内降水预报准确率。该技术假定,业务预报中使用的数值模式能较好反映出降水的时间变化过程,但降水量的预报准确率不高。因此需要将主客观融合订正后的网格总降水量信息合理分配到模式

原始的降水预报过程中,以达到提高降水预报时间分辨率的目的(图 3)。

图 4 为一次降水过程基于主客观融合 QPF 平台的预报思路及操作流程。多模式数据源评估发现:EC(图 4a₁)、GRAPES-3 km(图 4a₃)和华东区域高分辨率中尺度模式(简称华东 9 km 中尺度模式)(图 4a₄)对雨带形状预报大体一致,NCEP 模式(图 4a₂)降水强度预报弱于其他模式,华东 9 km 中尺度模式(图 4a₄)雨带位置较其他模式略偏南。选择上述模式进行融合,由于 EC 和中尺度模式在雨带位置及强度预报等方面同预报员主观分析结果接近,

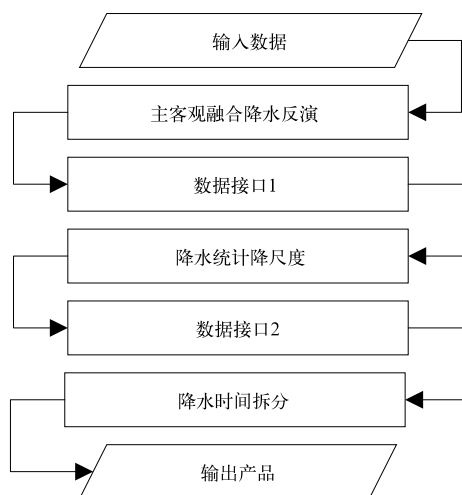


图 3 网格化定量降水预报流程图

Fig. 3 Flow chart of gridded quantitative precipitation forecast technology

给定 EC、华东 9 km 中尺度模式、GRAPES-3 km、NCEP 的权重配比为 38 : 31 : 20 : 11。由于 EC 的近期预报检验量级跟实况接近且评分较高,且稳定性优于其他模式,而华东 9 km 和 GRAPES-3 km 中尺度模式预报量级偏大,因此概率匹配量级订正选取 EC 模式。利用滤波调整,去除“噪音”降水,保留可信平滑预报结果。由于滤波操作,造成调整后强降水量级偏弱,通过值域调整进一步完成降水强度订正后自动生成等值线及格点背景场。预报员在此基础上稍作调整和修改即可完成预报。EC 模式雨带预报略偏北且量级偏弱,通过多模式对比、选择和融合对落区进行订正,并通过值域调整等完成量级订正,预报效果较 EC 原始模式提高幅度明显。

2.2 快速滚动更新精细化降水量预报技术

由于中小尺度天气系统的突发性(俞小鼎, 2012),每日 2 次的定时产品难以完全捕捉这类天气系统,对其导致的降水预报能力有限。因此,当获取到最新定量降水估测(QPE)产品,并发现与网格化定量降水预报存在较大差异时,或当发生突发性灾害性强降水时,如何利用实时 QPE 产品实现对网格定量降水预报的订正、以提高网格定量降水预报的准确率和实用性,是国家级网格化定量降水发展的一个重要方向。中央气象台主要是基于多尺度改进光流法的临近外推预报技术、基于 GRAPES-3 km 的实时频率匹配的降水预报偏差订正技术和基于最

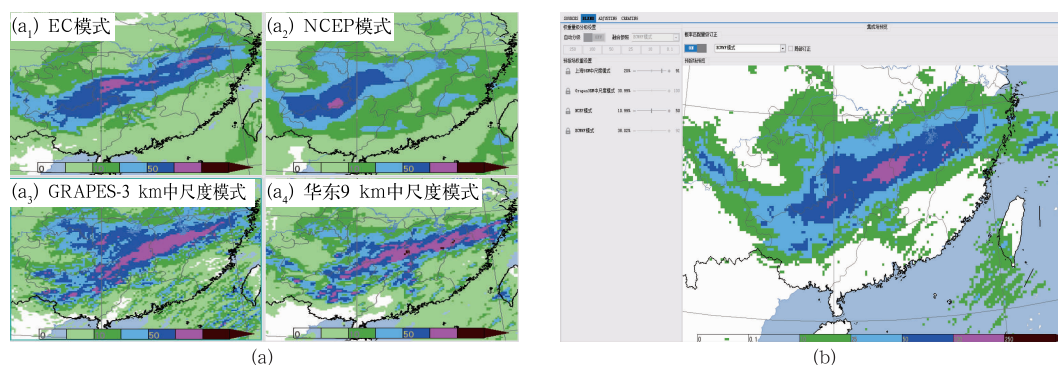


图 4 2019 年 7 月 8 日强降水过程主客观融合 QPF 平台示意图

(a) 2019 年 7 月 7 日 20 时起报的 36 h 预报数据:(a₁)EC、(a₂)NCEP、(a₃)GRAPES-3 km 和(a₄)华东 9 km;

(b) 相应权重集成选择界面

Fig. 4 Schematic diagram of forecasted heavy rainfall on 8 July 2019 in south of the Yangtze River using QPF Master Blender

(a) all models initiated at 20:00 BT 7 July 2019 with 36 h: (a₁) EC, (a₂) NCEP,

(a₃) GRAPES-3 km, (a₄) The SMS-WRF-ADAS Real-Time Modeling

System developed by Shanghai Meteorological Service (SMS-WARMS 9 km);

(b) how four corresponding weights

优背景场生成技术的短中期定量降水预报技术来实现逐小时滚动更新订正,相比美国纯模式快速滚动更新,较多的模式后处理及数据处理技术被应用到该领域。

研究表明,定量降水预报存在可预报性问题,不同预报技术在不同预报时效内的预报技巧不同(Browning, 1980): $0 \sim 2$ h, 临近外推预报的预报技巧相对最高; $2 \sim 12$ h, 基于快速更新同化的中尺度模式预报技巧相对最高; 短中期时效, 对天气尺度系统预报全球模式预报效果会最高。基于此研究, 可构建逐 1 h 快速滚动更新定量降水预报技术架构, 如图 5 所示, 主要包括 4 个技术模块: 定量降水估测技术模块, 实现实时全国定量降水实况估测(潘旸等, 2015); 基于多尺度改进光流法的定量降水短时临近外推技术模块, 实现定量降水估测产品 $1 \sim 6$ h 的临近外推预报; 基于 GRAPES-3 km 实时频率匹配订正的短时定量预报技术模块, 实现定量降水 $1 \sim 18$ h 短时预报; 基于最优背景场生成技术的短中期降水预报技术, 即前期中央气象台定时网格定量降水预报技术(曹勇等, 2016)。值得注意的是在临

近外推、短时及短中期降水预报之间会通过不同预报时效的准确率评估, 利用权重函数相互融合, 实现逐 1 h 快速滚动更新定量降水预报产品。

2.3 滚动更新精细化降水预报检验

选取 2019 年 5—10 月共计 6 个月的实况、模式及滚动产品数据, 对快速滚动更新精细化降水预报进行统计检验(图 6)。临近预报方面: 日降水预报平均图中, 区域模式(华东 9 km)预报量级明显偏

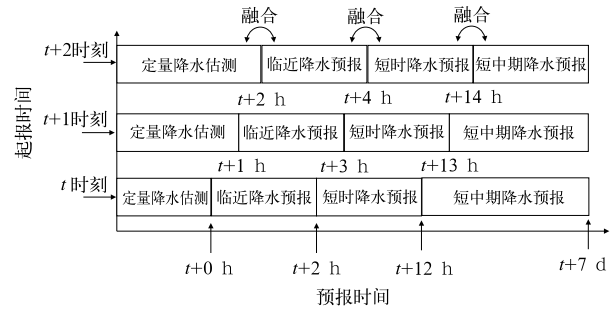


图 5 快速滚动更新定量降水预报流程图

Fig. 5 Flow chart of the rapid update quantitative forecasting technology

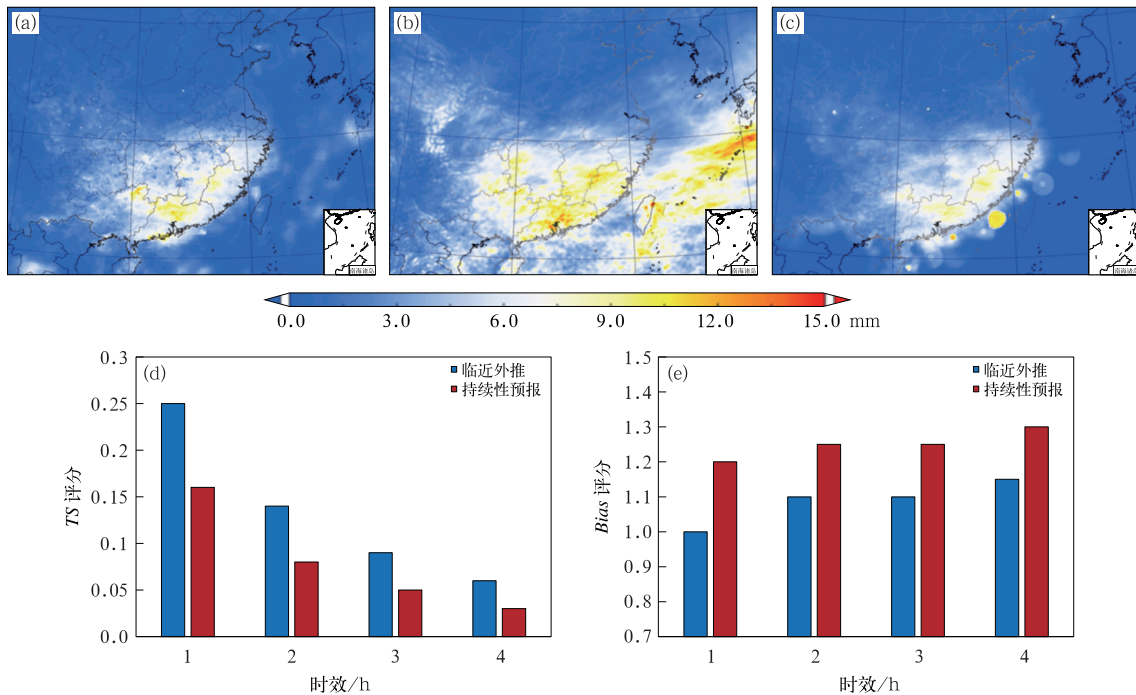


图 6 2019 年汛期(5—11 月)的(a)格点日平均雨量, (b)华东 9 km 24 h 预报累加日平均雨量及(c)快速滚动更新(临近预报)逐 2 h 时效预报累加日平均雨量;

同时期临近外推预报以及持续性预报降水(d)TS 评分和(e)Bias 评分(>5 mm · h⁻¹)

Fig. 6 (a) The grid daily average rainfall analysis, (b) daily averaged accumulated rainfall of 24 h forecast by the regional model (East China), (c) rapid update of daily averaged rainfall with 2 h lead time of the 2019 flood season (May—November); (d) TS score and (e) Bias score (>5 mm · h⁻¹) of the precipitation in the same period, including the continuous forecast and nowcast of precipitation

大,贵州湖南西部等地雨量偏多;滚动降水预报的临近时效预报雨量分布、量级大小等更接近实况格点降水分析。临近时效(1~3 h),滚动更新降水中的临近外推方案也有明显优势,TS评分和空报率较区域模式和持续性预报更准确,而区域模式有明显空报。但3 h以后,区域模式赶上并超过外推方案,滚动更新也转以区域模式订正产品为主。

短时预报方面:滚动预报以区域模式的客观订正为基础,对短时效各家模式及其订正产品进行检验,如图7,区域模式(华东、GRAPES-Meso)表现较全球模式(EC)更优,但仍有量级偏大问题(小雨量级24 h内逐小时 $Bias > 2.0$)。区域模式经过短时客观预报订正后(实时频率匹配订正技术),有效降低了预报偏强现象(小雨量级 $Bias$ 在1.2左右),同时有效地提升了预报准确率(晴雨及较强降水 TS 均明显上升)。因此,在短时效内,区域模式实时动态频率匹配订正产品是滚动更新降水预报最重要参考。

通过无缝隙动态融合各时效性能较好的订正产品,生成滚动更新降水预报,其产品性能评分在整个0~24 h内各时效中均相对原始模式有明显提升(TS及Bias相对优势明显)(图8)。同时,由于产品根据最新实况进行调整,充分考虑模式和实况偏差,其滚动预报效果(准确率、TS等)较定时模式预报有更大提升(图6,以3 h间隔的滚动预报为例)。

3 网格降水相态和新增积雪的客观精细化预报技术

降水相态精细化预报不仅包括雨、雪、雨夹雪和冻雨等天气现象的预报,还包括降雪量和积雪深度(包括新增积雪深度)的预报。2008年低温雨雪冰冻事件(杨贵名等,2008)之后,国内对雨雪相态的研究和预报技术的开发得到了极大的重视和发展。中央气象台开展了气候背景态的统计分析、天气学概念模型的归纳和建立,以及雨雪相态客观预报方法

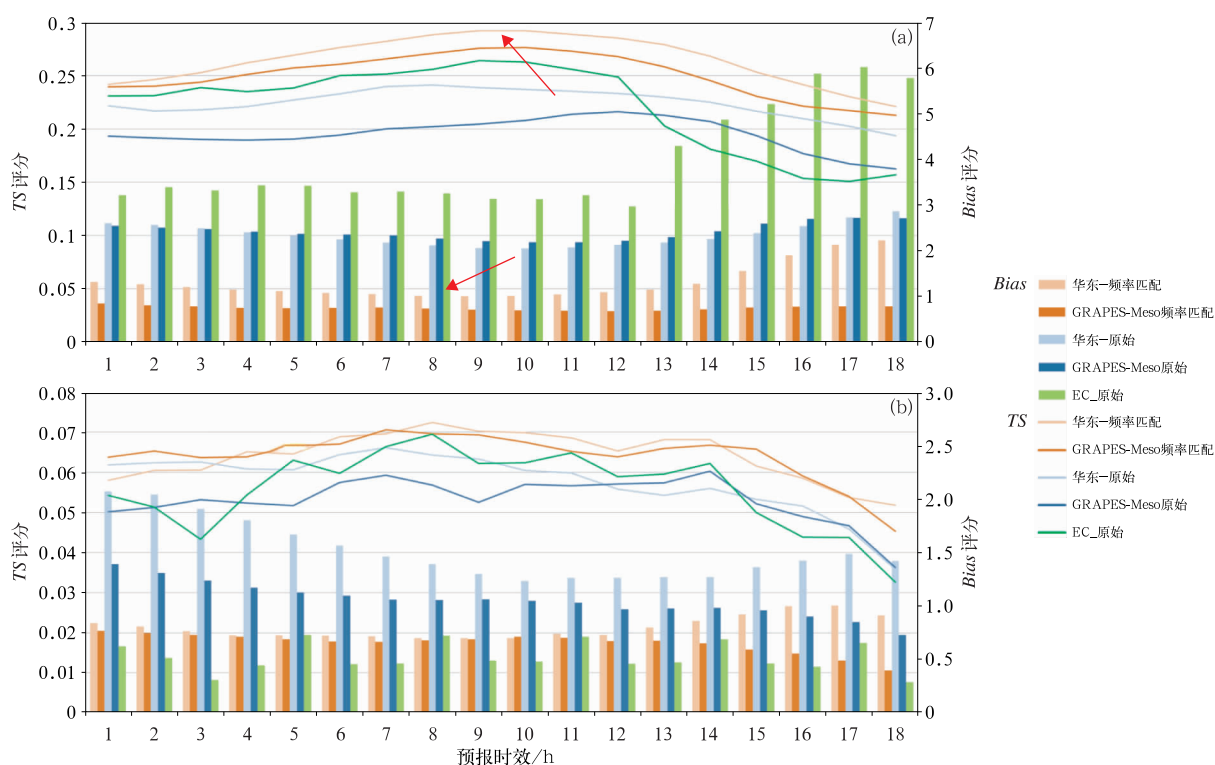


图7 2019年汛期(5—11月)1~18 h短时预报时效,区域模式频率匹配产品、原始区域预报及EC模式降水预报性能检验(20时起报)
(a)晴雨($>0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), (b)强降水($>5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 7 Verification of short-time precipitation forecast from frequency matching products, original regional forecast and EC model precipitation forecast in 2019 flood season (May—November)
(a) light rain ($>0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), (b) heavy precipitation ($>5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

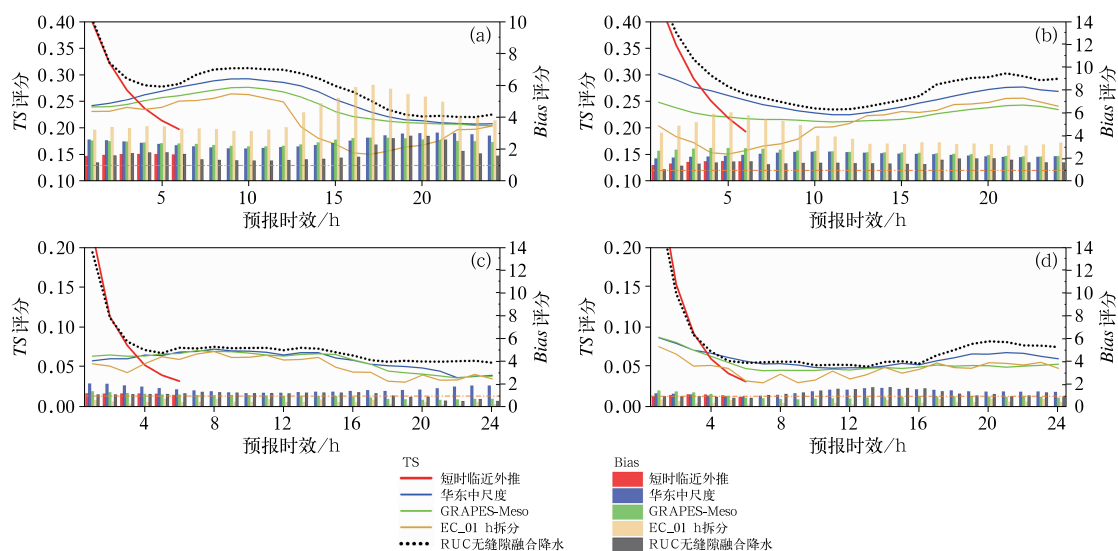


图 8 2019 年汛期(5—11 月)RUC 无缝隙融合降水产品、短时临近外推、区域模式和 EC 全球模式降水预报性能检验:(a,c)20 时起报;(b,d)08 时起报
(a,b)晴雨($>0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),(c,d)强降水($>5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Fig. 8 Verification of hourly rain forecast from the RUC seamlessly integrated precipitation products and short-time extrapolation, rainfall forecasts of regional models and EC global models initiated at 20:00 BT (a, c) and 08:00 BT (b, d) in 2019 flood season (May—November)
(a, b) light rain ($>0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), (c, d) heavy precipitation ($>5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

的研究和开发,为降水相态精细化预报提供支撑。近年来中央气象台降水相态精细化预报的提高主要是在降水相态的客观预报和新增积雪预报技术两个方面。

3.1 网格降水相态的客观预报技术

2012 年前后,降水相态预报处于刚起步阶段,其时空分辨率较低。中央气象台运用人工神经网络,基于数值模式偏差订正结果,开发了全国 600 多个站逐 3 h 的雨、雪和雨夹雪的客观预报方法和产品(董全等,2013)。

近年来随着智能网格预报的发展,对高时空分辨率(空间分辨率为 5 km,时间分辨率为 1~3 h)的降水相态格点预报提出新要求。中央气象台充分运用高时空分辨率地面资料,开发了基于地面 2 m 气温阈值法的降水相态预报方法(Chen et al, 2014)和产品,以解决模式预报无降水处无相态预报的问题,以及在复杂地形区域模式相态预报精度较低的问题。运用我国 1 000 多个站点的地面观测资料,基于过去 30 年(1981—2010 年)天气现象和地面 2 m

气温观测,用频数分析方法,以雨和雪频数达到 50% 分别作为雨和雪的气温阈值(图 9a,9c)。选取克里金插值方法(刘世伟等,2015;李军龙等,2006),插值生成空间分辨率为 0.05° 的雨和雪格点化气温阈值(图 9b,9d)。基于智能网格气温预报就可以生成格点化雨、雨夹雪和雪预报产品。

EC 模式基于温湿层结曲线预报结果,通过经验参数化模拟降水粒子下降过程中的相态变化,对降水相态进行直接预报(Gascón et al, 2018)。检验结果(董全等,2020a)显示其对我国的雨雪相态具有较好的预报能力,且集合预报系统降水相态概率预报结果较细网格确定性预报具有更高相对经济价值和预报技巧。为挖掘集合预报系统对降水相态预报能力,提高预报效果,运用最优概率阈值法,通过历史资料评估最优概率阈值,从而将概率预报转换为确定性预报。结果显示,集合最优概率阈值法预报效果最好(图 10),相对于地面 2 m 气温阈值法和细网格确定性预报,明显提高了四类降水相态预报正确率和 HSS 评分(董全等,2020b)。

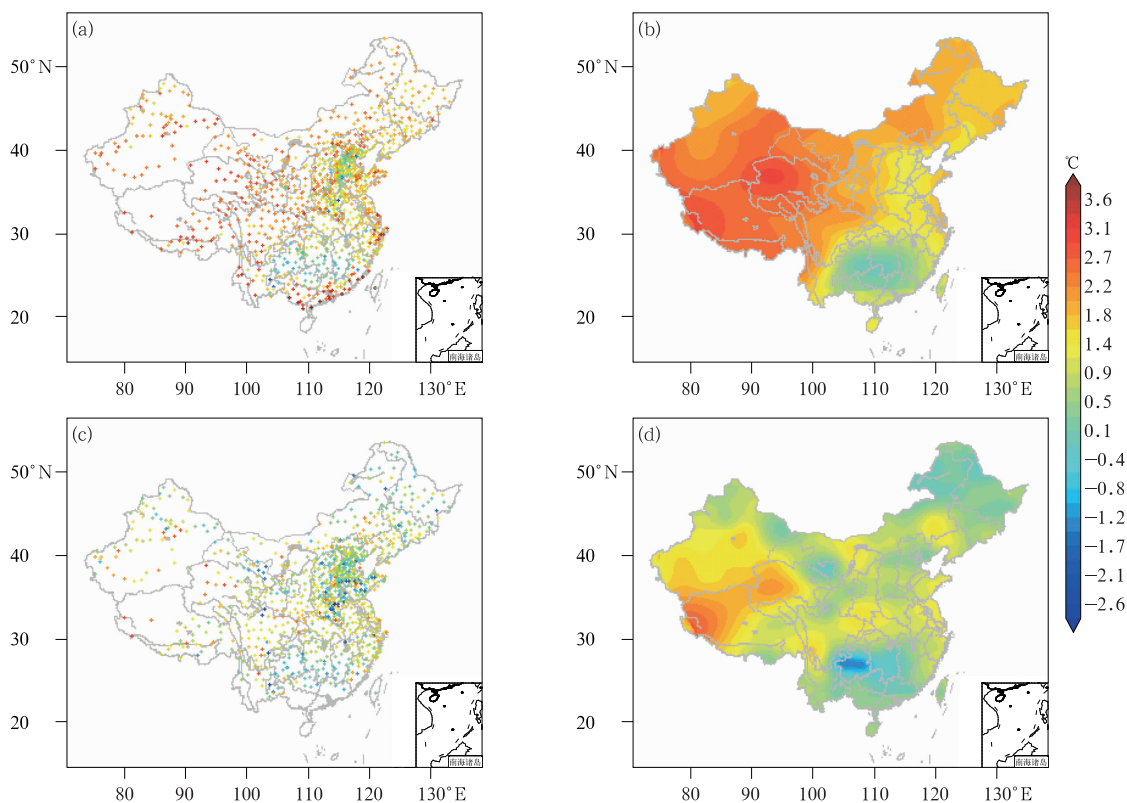


图 9 雨(a,b)和雪(c,d)站点气温阈值(a,c)以及克里金插值格点气温阈值(b,d)

Fig. 9 Station temperature thresholds (a, c) and the gridded interpolation results (b, d) of rain (a, b) and snow (c, d)

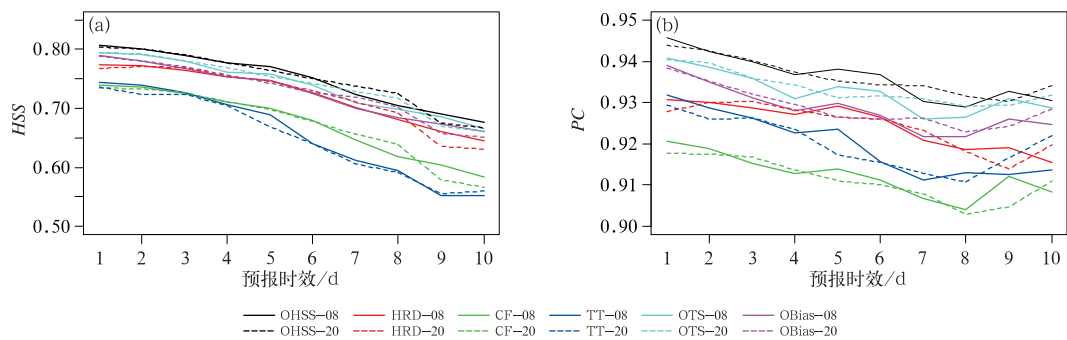


图 10 08 时(实线)和 20 时(虚线)起报,对 2018 年冬半年全国 2000 多个站点雨雪相态不同时效预报的 HSS 评分(a)和正确率(b)

(OHSS: HSS 评分最优, OTS: TS 评分最优, OBias: Bias 最优, HRD: EC 细网格确定性模式, CF: 集合预报系统控制预报, TT: 地面 2 m 气温阈值法)

Fig. 10 The precipitation type forecast measures of HSS (a) and accuracy (b) with initial time of 08:00 BT and 20:00 BT at different lead times based on the dataset of more than Chinese 2000 stations in the 2018 winter half year

(OHSS: optimal HSS, OTS: optimal TS,

OBias: optimal bias based on ensemble prediction system (EPS),

HRD: EC high resolution deterministic model,

CF: EPS control forecast, TT: 2 m temperature threshold method)

由于集合预报系统空间分辨率为 0.5° , 远达不到智能网格预报 5 km 的分辨率要求, 结合最优概率阈值法和地面 2 m 气温阈值法的预报结果进行融合和空间降尺度。假设降水相态是气温的分段反函数, 而气温是海拔、经度和纬度的线性函数, 并且气温垂直递减率为湿绝热递减率。基于以上假设关系, 当 0.5° 网格内两种方法的站点相态预报出现差异时, 结合高精度的地形高度资料将最优概率阈值法的预报结果进行空间降尺度, 在保证高空间分辨率同时, 进一步提高雨雪相态客观预报效果。如图 11, 实况雨雪分界线基本位于河南北部和山东北部沿黄河一线(图 11a)。两种方法融合以后的产品(图 11a), 较细网格确定性模式(图 11d)以及两种客观方法(图 11b, 11c)对雨雪相态预报都更好, 可反映由于地形差异而导致的更细相态预报差异(如陕西中南部)。

地面 2 m 气温阈值法发挥地面观测和智能网格预报资料高时空分辨率优势, 在地形复杂地区, 可更为细致地刻画出受海拔高度等因素影响的降水相态差异, 但由于降水相态受整层温湿层结影响, 该方法存在较大局限性。基于集合预报系统的集合最优

概率阈值法, 可进一步改进雨雪相态预报效果, 但受模式分辨率影响, 无法满足精细化预报要求。两者融合产品, 可发挥各自优势, 进一步改进现有降水相态格点预报效果。

3.2 新增积雪预报技术

早期中央气象台主要发布降雪量预报产品, 无积雪深度预报产品。由于公众并不清楚降雪量和积雪量区别, 易造成公众对降雪预报产品理解上的偏差(曹冀鲁, 2010)。由于缺乏新增积雪预报相关科学问题研究, 以及相应预报方法与技术支持, 业务上主要是基于雪水比(新增积雪深度/降雪量)经验值(10:1)进行新增积雪深度经验预报。随着公众对气象预报服务需求精细化程度的逐渐提高, 对于降雪天气而言, 仅提供定量降水预报很难满足需求, 有必要开展定量积雪深度预报(QSF)。目前 EC、NCEP 等全球模式均提供积雪预报指导产品, 从 EC 模式积雪预报方案可见, 积雪预报是陆面物理过程的一部分, 通过降雪量、雪密度等预报量诊断得到(ECMWF, 2019), 由于模式对上述预报量预报存在一定偏差, 积雪预报能力与业务需求存在一定差距。

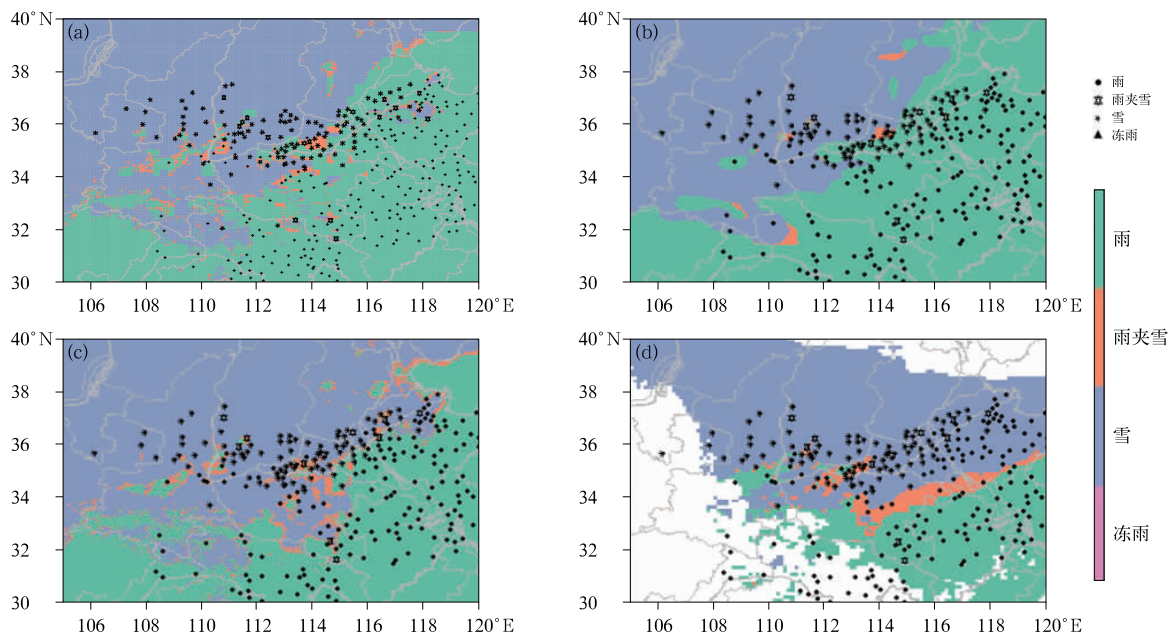


图 11 2020 年 1 月 7 日 02 时降水相态实况(散点)以及对应时刻的 78 h 时效预报(填色)

(a) 融合产品, (b) 最优概率阈值法, (c) 地面 2 m 气温阈值法, (d) 细网格确定性预报

Fig. 11 The precipitation type observations at 02:00 BT 7 January 2020 (scatter point) and the corresponding forecast with 78 h lead time (colored area)

(a) fusing product, (b) optimal HSS, (c) 2 m temperature threshold method,

(d) ECMWF high-resolution deterministic model

近年来,欧美等气象工作者已逐步开展积雪深度预报的技术与方法研究。目前国际上主要开展气候学、统计学及物理学(Alcott and Steenburgh,2010)等三类方法研究,前期采用雪水比的经验预报属于气候学方法。Bossolasco(1954)、Diamond(1954)、Judson and Doesken(2000)、Wetzel et al(2004)和 Simeral(2005)针对当地的降雪天气,通过线性回归方法建立地面或700 hPa 温度与雪水比统计模型。Waldstreicher(2001)研究指出降雪微物理过程对于雪暴等强降雪天气的形成至关重要,在分析冰晶类型、温度垂直分布、垂直速度的空间分布特征的基础上,在纽约以及宾夕法尼亚州建立了基于 cross-hair signature 的雪暴预警方法,当最大垂直速度与树枝状冰晶形成的温度环境处于同一垂直高度上时,则发布雪暴警报。Cobb and Waldstreicher(2005)利用温度和雪水比的高斯分布特征,以垂直速度作为权重系数建立了雪水比的物理预报模型,最终结合降雪量的预报得到积雪深度的预报产品,该方法目前在美国国家气象局(NWS)得到很好应用。Roebber et al(2007)通过分析温度、湿度、地面风场等物理因子与雪水比统计关系,利用神经网络方法建立雪水比预报模型,并在美国威斯康星大学建立实时融化比预报平台。Alcott and Steenburgh(2010)通过分析温度、对流层中层湿度、风速与融化比的统计关系,利用多元回归方法建立了当地的融化比预报方程。

2015 年中央气象台开展雪水比气候特征以及关键影响因子研究,以北京和武汉站为例(图 12),雪水比分布较广,北京站雪水比最大可达 37,最小为 2,其中 50% 以上个例雪水比大于 10 : 1,而武汉站最大为 27,最小为 1,且 40% 雪水比低于 5 : 1,可见雪水比具有显著的区域特征,经验预报无法满足积雪预报准确率的需求。

在此基础上,引用 Cobb 算法,基于温度与融化比统计关系,以及云内抬升运动对冰晶增长效率等影响雪水比的关键因子构建了新增积雪的物理预报模型,通过地形降尺度技术以及中央气象台降水和相态智能网格技术,结合模式预报的温度、湿度、垂直速度等物理量,开发了未来 10 天 5 km 分辨率的雪水比和新增积雪网格预报产品,目前该产品已在中央气象台业务中应用,在降雪预报中发挥了重要支撑作用。图 13 为 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 20 日期间 EC 模式和基于 Cobb 算法新增积雪短期时效(1~3 d)预报 TS 评分,可以看出 Cobb 算法大于 3 cm 的各新增积雪评分较 EC 明显提高,表明该产品较 EC 模式在积雪较深的降雪过程预报中改进明显。此外,从 2019 年 11 月 18 日新增积雪预报结果(图 14)可见:模式对积雪落区把握较好,同时对于东北地区东部大于 10 cm 的积雪预报较为准确,EC 模式总体预报较实况明显偏小。

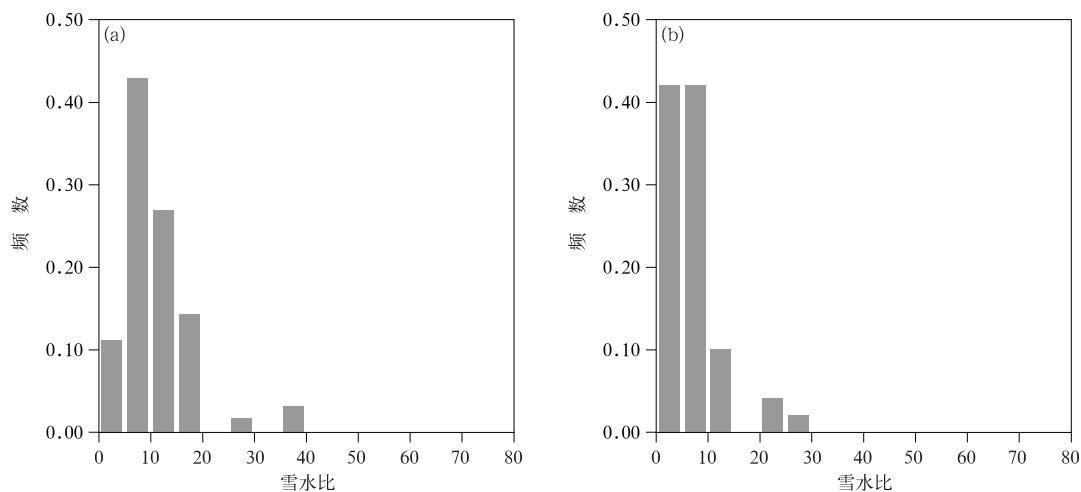


图 12 1951—2012 年典型降雪个例雪水比分布

(a)北京,(b)武汉

Fig. 12 The frequency of snow to liquid ratio for the typical snow weather from 1951 to 2012

(a) Beijing, (b) Wuhan

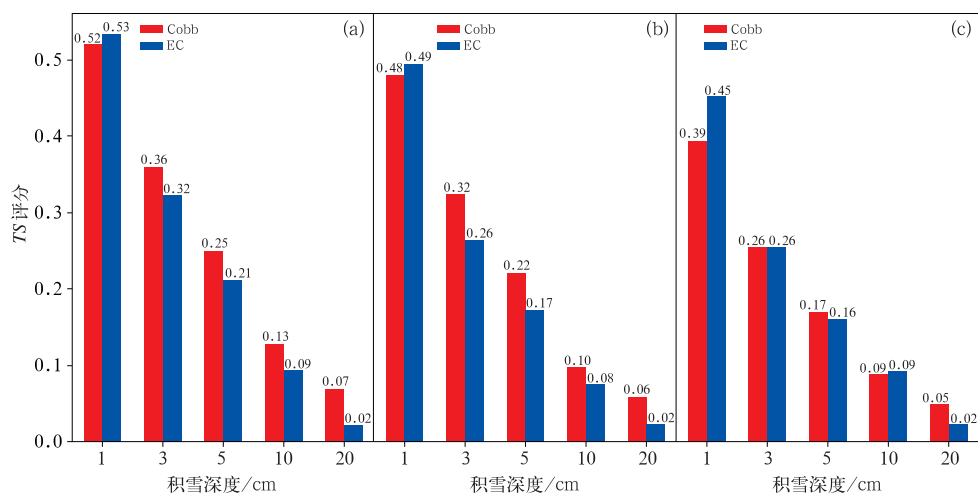


图 13 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 20 日 Cobb 算法和 EC 全球模式新增积雪 TS 评分
(a)36 h 预报时效,(b)60 h 预报时效,(c)84 h 预报时效

Fig. 13 TS score of the depth of new snowfall of Cobb method and ECMWF IFS model outputs with lead times of (a) 36 h, (b) 60 h and (c) 84 h from 1 October 2019 to 20 March 2020

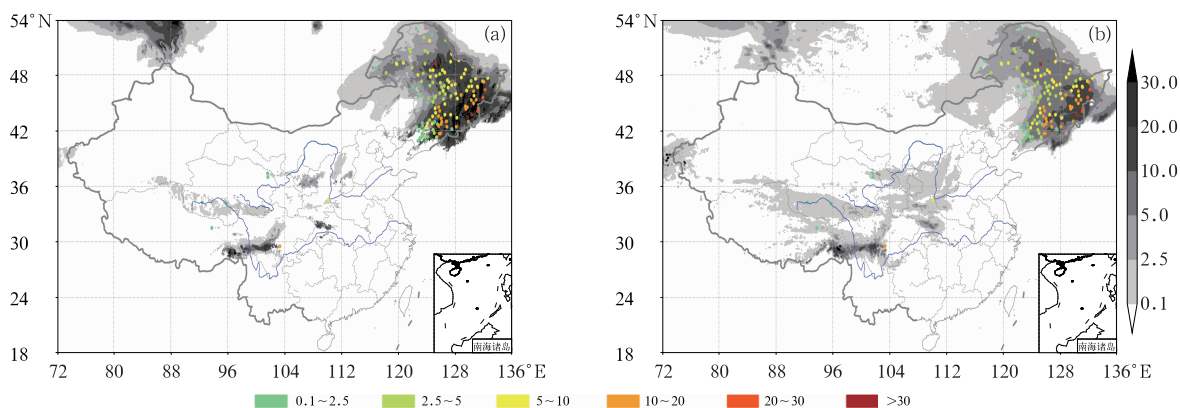


图 14 2019 年 11 月 18 日 08 时 24 h 累计新增积雪深度(单位:cm)实况(圆点)及预报(阴影)
(a)基于 Cobb 算法 36 h 新增积雪客观预报,(b)EC 模式 36 h 新增积雪预报

Fig. 14 Synoptic verification of observed (dot) 24 h depth of new snowfall (unit: cm) at 08:00 BT 18 November 2019 and the forecast (shaded)

(a) observed and Cobb method forecasted depth of new snowfall with 36 h lead time,
(b) observed and EC forecasted depth of new snowfall with 36 h lead time

4 精细化网格预报检验评估技术

随着精细网格预报业务的稳步推进,预报检验业务也逐步由对城镇预报的检验向精细化网格预报检验发展过渡。目前中央气象台精细化网格预报检验主要包括以下几个方面进展。

4.1 精细化网格预报检验的改进

(1)传统的城镇预报检验技术继续被应用到精

细化格点预报中。包括降水晴雨预报准确率、分级累加降水空报率、漏报率、TS 评分和 Bias 评分等在内的传统的检验指标,一方面能大致体现精细化网格预报的预报水平,同时也非常便于同历史上城镇预报产品进行对比,从而准确表现精细网格预报技术进步带来的预报准确率的变化。

(2)扩大检验实况数据的时空范围。传统的城镇预报只重点关注城镇站点附近的天气,远离城镇站点的地区通常没有定量的预报,自然也无需相应检验。而智能网格预报覆盖范围内每个点,无论其

是否邻近观测站点,都有了定量预报,也因此有了检验的需求。如果仍然以国家站的观测数据作为检验的实况,显然不能满足大部分区域的检验需求。为此,中央气象台对自动站观测资料进行梳理统计,挑选 10 461 个站点组成一套检验用稠密站点序列,通过扩展检验站点数量提高检验精细程度。

在站点稀疏地区,即使扩大检验站点数量,仍存在诸多远离观测站点区域的网格预报无法进行有效的检验。采用网格化的实况作为检验参照是一个必要选择,其前提是充分准确地估算网格实况的误差范围,否则无法理解检验结果所代表的含义。然而在站点稀疏的区域对网格化实况的准确性评估本身也是一项困难的工作,这还有待于更深入的研究。

4.2 适应精细化网格预报的检验方法研发和应用

随着精细化智能网格预报时空分辨率逐步提高,传统的点对点的检验方法,包括常用的 TS、Bias 等检验方法缺乏对噪音的容忍能力,常出现“双重惩罚”现象,其评分结果不能稳定体现预报产品的性能。

针对传统检验方法在精细化网格预报中应用的问题,各类空间检验方法(Gilleland et al, 2009)是有效的应对方案。目前,中央气象台研究和应用的空间检验方法主要有点对点检验、升尺度检验、邻域空间检验等方法(陈法敬等, 2019; 赵滨和张博, 2018; 唐文苑等, 2018), 这些方法在一个相对更大的窗口内建立观测和预报的匹配关系, 因此能给出更加稳定检验结果。另外, 基于目标识别的降水检验方法通过对预报和观测中的降水雨带进行识别和匹配, 基于雨带而不是站点进行检验, 因此能给出更接近天气学意义的检验结果, 中央气象台也开展了相关方法研究和应用试验(刘湊华和牛若芸, 2013; 符娇兰和代刊, 2016; 牛若芸等, 2018), 目前国家级天气预报检验分析系统(韦青等, 2019)中正开展基于目标识别的降水检验的业务试验。

5 精细化降水预报业务技术思考

5.1 GRAPES 数值预报系统

GRAPES 数值预报系统作为中央气象台降水预报的重要支撑, 近年来得到了长足的发展, 其预报能力逐年提高。但随着业务预报逐渐走向精细化, 模式发展也必须适应其要求。对“定时定点定量”的

降水预报需求, 数值天气模式面临更多的挑战。一是高分辨率资料如何有效应用, 如雷达(包括双偏振雷达和相控阵雷达)和静止卫星特别是 FY-4 卫星等。高时空分辨率资料提供的更新、更高效的观测信息(包括云物理观测信息), 如何通过同化、云分析等技术手段, 利用这些资料得到准确、协调的分析场, 对强天气预报特别是短时临近预报有着极为重要的意义。二是模式分辨率亟待提高至 1 km 左右或更高, 在这样的分辨率尺度上, 才可能解决地形问题、复杂下垫面包括超大城市及相关的边界层和微物理等问题, 这也是高分辨率数值模式面临的重要挑战。此外, 建立更加快速更新(如 10 min 或更高频次更新)的数值预报系统, 以向业务预报提供“最新”的数值预报产品, 对海量数据的处理、快速同化和预报模型、产品的快速分发都提出了更高的要求。

5.2 降水预报的时空精细化发展

通过上述技术的发展, 中央气象台降水预报精准化水平得到一定程度的提高, 但还存在如下几个问题和需要突破的方向: 首先是降水预报的准确率有待进一步提高, 网格降水预报的背景场虽然是利用多家全球和中尺度模式订正和融合的最优背景场, 相比原始模式预报以及单模式订正预报, 准确率有较明显提高, 但仍需进一步挖掘模式误差特征、提高背景场的准确率。其次社会对更高时空分辨率的降水预报提出要求, 而产生强降水的中小尺度系统受下垫面影响强烈, 如何将复杂下垫面的影响纳入时空统计降尺度技术提高降水时空分辨率也是需要解决的问题。此外滚动更新降水预报中的临近、短时及短中期预报由于采用不同的数据源和技术方案, 因此存在一定的时空分辨率以及降水位置强度不匹配问题, 如何利用相应的融合技术实现多预报时效降水匹配, 提高无缝隙降水融合质量也需要进一步研究。通过时间降尺度的小时降水预报, 由于主要参考天气尺度信息, 中尺度信息表现不足, 短时强降水预报偏多, 需改进小时降水强度预报问题。如何基于海量观测和模式预报数据, 利用以深度学习为代表的大数据挖掘技术等, 提高降水预报准确率和精细化程度也是需要重点研究的。

5.3 精细化降水相态及新增积雪预报

由于目前降水相态积雪观测等资料时空分辨率较低, 也缺乏有关降雪云微物理过程研究, 对影响新增积雪的物理机制认识还不够, 客观定量描述降雪

粒子在云内、云外以及近地面的变化过程有一定难度,制约着降水相态和积雪精细化预报能力的提升和预报产品评估检验。另外,社会对电线结冰厚度、道路结冰等精细化预报,也有越来越迫切的需求。高分辨率卫星、双偏振雷达等非常规观测手段在积雪、降水相态以及云内降水粒子方面监测能力的提升,将有助于加深对积雪物理过程的认识,从而进一步提高积雪和降水相态的精细化客观预报能力。结合集合预报系统,开发雨雪冰冻等灾害性天气的概率预报产品,满足多样化用户的需求。

5.4 精细化网格预报检验

未来精细化网格预报检验技术的研发主要是要解决评价公平性和通过检验反馈信息及问题的能力两个方面。公平的评价方法不仅能够选择出更合理的产品供下游使用,还能帮助了解预报制作采用的不同数值模式和不同客观方法的优劣,以便合理地选择数据源。检验分析的目的在于发现预报存在的规律性误差。检验方法通常分为传统和空间检验方法。传统检验方法不便揭示存在问题和改进途径。空间检验方法能提供一些有天气学意义的检验结果,但算法较为复杂,在业务中推广应用仍存在一定困难。此外,为提高检验精细化程度,除研发新的检验方法,还需广泛开展分类检验,通过按季节、区域、不同天气系统或更多其他条件分别统计预报误差,找到预报问题。精细化预报检验工作的关键是效率问题。为此中央气象台研发全流程检验评估程序库,并通过开源形式和全国气象部门共享,基于该程序开展精细化网格预报的检验计算或检验系统的研发效率将明显提高。

6 结 论

中央气象台经过 70 年的发展,降水精细化预报水平有了很大的提高。在降水精细化预报技术方面的进展主要包括:

(1)除 GRAPES 全球数值模式 (GRAPES_GFS) 以外还发展了 GRAPES-Meso 和 GRAPES-3 km 中尺度数值模式,并以 GRAPES-3 km 为基础,建立了 3 h 循环每天 8 次更新的循环更新系统并在 2020 年 6 月实现业务运行,将更好地支撑降水的时空和相态的精细化预报。

(2)在数值模式预报发展基础上,利用降水网格化技术,帮助预报员从海量预报数据选取、集成、调

整和订正,实现预报员主观预报与最优客观预报背景场的数字化融合,同时利用时空统计降尺度技术进一步提高了网格降水时空精细化程度;与此同时,利用基于多尺度光流法的临近预报及基于中尺度模式实时频率匹配的短时订正预报,构建了快速滚动更新网格降水预报,进一步提高了降水预报频次。

(3)开发了基于集合预报系统的最优概率阈值法和地面 2 m 气温阈值法相融合的降水相态客观预报方法和产品;引用 Cobb 算法,基于温度与融化比统计关系及云内抬升运动对冰晶增长效率等影响雪水比的关键因子构建新增积雪物理预报模型,通过地形降尺度技术,开发了未来 10 天逐 3 h、5 km 分辨率的雨、雪、雨夹雪、冻雨及雪水比和新增积雪网格预报产品。

(4)随着精细降水预报业务的稳步推进,预报检验业务也向精细化网格预报检验发展过渡,中央气象台在继续保留传统城镇预报检验方法基础上,采用更加精细的观测资料作为检验参考,研究空间检验方法在精细化网格预报中的应用,推进全流程检验评估程序库建设并进行开源共享,以推进更加高效的精细化分类检验。

中央气象台的 QPF 业务将在数值模式和统计后处理技术不断发展的基础上,通过在便捷高效的预报编辑工具(主客观融合平台)上进行海量信息及数据挖掘,获得最优客观预报,并依靠预报员对降水物理概念模型的构建、数值模式及误差的理解和订正,通过贯穿整个技术流程的实时检验评估等多个技术环节中进一步向智能化、精细化、精准化发展。

参考文献

- 曹冀鲁, 2010. 降雪量和积雪深度一样吗[J]. 气象知识, (1): 28. Cao J L, 2010. Is snowfall and snow depth the same[J]. Meteor Knowl, (1): 28(in Chinese).
- 曹勇, 刘凑华, 宗志平, 等, 2016. 国家级格点化定量降水预报系统[J]. 气象, 42(12): 1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al, 2016. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system[J]. Meteor Mon, 42(12): 1476-1482(in Chinese).
- 陈法敬, 陈静, 韦青, 等, 2019. 一种基于可预报性的暴雨预报评分新方法 II: 暴雨检验评分模型及评估试验[J]. 气象学报, 77(1): 28-42. Chen F J, Chen J, Wei Q, et al, 2019. A new verification method for heavy rainfall forecast based on predictability II: verification method and test[J]. Acta Meteor Sin, 77(1): 28-42 (in Chinese).
- 董全, 胡宁, 宗志平, 2020a. ECMWF 降水相态预报产品 (PTYPE) 应用和检验[J]. 气象, 46(9): 1210-1221. Dong Q, Hu N, Zong Z P, 2020a. Application and verification of the ECMWF precipitation type forecast product (PTYPE)[J]. Meteor Mon, 46(9):

- 1210-1221(in Chinese).
- 董全,张峰,宗志平,2020b. 基于 ECMWF 集合预报产品的降水相态客观预报方法[J]. 应用气象学报,31(5):527-542. Dong Q, Zhang F, Zong Z P, 2020b. Objective precipitation type forecast based on ECMWF ensemble prediction product[J]. J Appl Meteor Sci,31(5):527-542(in Chinese).
- 董全,黄小玉,宗志平,2013. 人工神经网络法和线性回归法对降水相态的预报效果对比[J]. 气象,39(3):324-332. Dong Q, Huang X Y, Zong Z P, 2013. Comparison of artificial neural network and linear regression methods in forecasting precipitation types[J]. Meteor Mon,39(3):324-332(in Chinese).
- 符娇兰,代刊,2016. 基于 CRA 空间检验技术的西南地区东部强降水 EC 模式预报误差分析[J]. 气象,42(12):1456-1464. Fu J L, Dai K, 2016. The ECMWF model precipitation systematic error in the east of Southwest China based on the contiguous rain area method for spatial forecast verification [J]. Meteor Mon, 42(12):1456-1464(in Chinese).
- 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci,28(1):25-37(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China [J]. Meteor Mon, 45(4):445-457(in Chinese).
- 李军龙,张剑,张丛,等,2006. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. 草业科学,23(8):6-11. Li J L, Zhang J, Zhang C, et al, 2006. Analyze and compare the spatial interpolation methods for climate factor[J]. Pratacul Sci,23(8):6-11(in Chinese).
- 李泽椿,湛芸,张夕迪,等,2019. 中央气象台暴雨预报业务的发展及思考[J]. 暴雨灾害,38(5):407-415. Li Z C, Chen Y, Zhang X D, et al, 2019. Development and perspectives on torrential rain forecasting operation in National Meteorological Center [J]. Torr Rain Dis,38(5):407-415(in Chinese).
- 刘凑华,牛若芸,2013. 基于目标的降水检验方法及应用[J]. 气象,39(6):681-690. Liu C H, Niu R Y, 2013. Object-based precipitation verification method and its application[J]. Meteor Mon,39(6):681-690(in Chinese).
- 刘世伟,吴锦奎,张文春,等,2015. 基于克里金插值估算区域降水量的抽样方法对比分析——以甘肃省为例[J]. 冰川冻土,37(3):650-657. Liu S W, Wu J K, Zhang W C, et al, 2015. Comparison analysis of sampling methods to estimate the regional precipitation based on Kriging interpolation method; a case study in Gansu Province[J]. J Glaciol Geocryol,37(3):650-657(in Chinese).
- 牛若芸,刘凑华,刘为一,等,2018. 1981—2015 年中国 95°E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征[J]. 气象学报,76(2):182-195. Niu R Y, Liu C H, Liu W Y, et al, 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015[J]. Acta Meteor Sin,76(2):182-195(in Chinese).
- 潘旸,沈艳,宇婧婧,等,2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报,73(1):177-186. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al, 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteor Sin,73(1):177-186(in Chinese).
- 苏翔,袁慧玲,2020. 集合预报统计学后处理技术研究进展[J]. 气象科技进展,10(2):30-41. Su X, Yuan H L, 2020. The research progress of ensemble statistical postprocessing methods[J]. Adv Meteor Sci Technol,10(2):30-41(in Chinese).
- 唐文苑,郑永光,张小雯,2018. 基于 FSS 的高分辨率模式华北对流预报能力评估[J]. 应用气象学报,29(5):513-523. Tang W Y, Zheng Y G, Zhang X W, 2018. FSS-based evaluation on convective weather forecasts in North China from high resolution models[J]. J Appl Meteor Sci,29(5):513-523(in Chinese).
- 韦青,李伟,彭颂,等,2019. 国家级天气预报检验分析系统建设与应用[J]. 应用气象学报,30(2):245-256. Wei Q, Li W, Peng S, et al, 2019. Development and application of national verification system in CMA[J]. J Appl Meteor Sci,30(2):245-256(in Chinese).
- 徐枝芳,郝民,朱立娟,等,2013. GRAPES_RAFS 系统研发[J]. 气象,39(4):466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al, 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 39(4):466-477(in Chinese).
- 杨贵名,孔期,毛冬艳,等,2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报,66(5):836-849. Yang G M, Kong Q, Mao D Y, et al, 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. Acta Meteor Sin,66(5):836-849(in Chinese).
- 俞小鼎,2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象,38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon,38(11):1313-1329(in Chinese).
- 赵滨,张博,2018. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J]. 暴雨灾害,37(1):1-7. Zhao B, Zhang B, 2018. Application of neighborhood spatial verification method on precipitation evaluation [J]. Torr Rain Dis,37(1):1-7(in Chinese).
- 钟琦,薛童,朱禾,等,2020. 面向预报员的精细化数值预报产品应用培训需求研究[J]. 气象科技进展,10(2):92-99. Zhong Q, Xue T, Zhu H, et al, 2020. Research on the forecaster training needs of using refined numerical weather forecast[J]. Adv Meteor Sci Technol,10(2):92-99(in Chinese).
- 朱立娟,龚建东,黄丽萍,等,2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报,28(1):38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. J Appl Meteor Sci,28(1):38-51(in Chinese).
- 庄照荣,王瑞春,王金成,等,2019. GRAPES_Meso 背景误差特征及应用[J]. 应用气象学报,30(3):316-331. Zhuang Z R, Wang R C, Wang J C, et al, 2019. Characteristics and application of background errors in GRAPES_Meso[J]. J Appl Meteor Sci,30(3):316-331(in Chinese).
- 宗志平,代刊,蒋星,2012. 定量降水预报技术研究进展[J]. 气象科技

- 进展, 2(5):29-35. Zong Z P, Dai K, Jiang X, 2012. The research progress of quantitative precipitation forecast[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 2(5):29-35(in Chinese).
- Alcott T I, Steenburgh W J, 2010. Snow-to-liquid ratio variability and prediction at a high-elevation site in Utah's Wasatch Mountains[J]. *Wea Forecasting*, 25(1):323-337.
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al, 2016. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: the rapid refresh[J]. *Mon Wea Rev*, 144(4):1669-1694.
- Bossolasco M, 1954. Newly fallen snow and air temperature[J]. *Nature*, 174(4425):362-363.
- Browning K A, 1980. Structure, mechanism and prediction of orographically enhanced rain in Britain[M]//Hide R, White P W. *Orographic Effects in Planetary Flows*. GARP Publication Series; 85-114.
- Chen R S, Liu J F, Song Y X, 2014. Precipitation type estimation and validation in China[J]. *J Mt Sci*, 11(4):917-925.
- Cobb Jr D K, Waldstreicher J S, 2005. A simple physically based snowfall algorithm[C]//Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction. Washington, DC: Amer Meteor Soc.
- Diamond M, 1954. Correlation of density of new snow with 700-millibar temperature[J]. *J Atmos Sci*, 11(6):512-513.
- ECMWF, 2019. IFS Documentation CY43R1-Part IV: Physical Processes[M/OL]. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/19308-part-iv-physical-processes>.
- Gascón E, Hewson T, Haiden T, 2018. Improving predictions of precipitation type at the surface: description and verification of two new products from the ECMWF ensemble[J]. *Wea Forecasting*, 33(1):89-108.
- Gilleland E, Ahijevych D, Brown B G, et al, 2009. Intercomparison of spatial forecast verification methods[J]. *Wea Forecasting*, 24(5):1416-1430.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2003. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*[M]. Chichester: John Wiley and Sons.
- Judson A, Doesken N, 2000. Density of freshly fallen snow in the Central Rocky Mountains[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 81(7):1577-1588.
- Novak D R, Bailey C, Brill K F, et al, 2014. Precipitation and temperature forecast performance at the Weather Prediction Center[J]. *Wea Forecasting*, 29(3):489-504.
- Pavlik D, Söhl D, Pluntke T, et al, 2012. Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km[J]. *Environ Earth Sci*, 65(5):1475-1482.
- Roebber P J, Butt M R, Reinke S J, et al, 2007. Real-time forecasting of snowfall using a neural network[J]. *Wea Forecasting*, 22(3):676-684.
- Schaake J, Henkel A, Cong S, 2004. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western U. S [C]//Preprints, 18th Conf on Hydrology Seattle, Amer Meteor Soc.
- Sela J G, 1980. Spectral modeling at the National Meteorological Center[J]. *Mon Wea Rev*, 108(9):1279-1292.
- Simeral D B, 2005. New snow density across an elevation gradient in the park range of northwestern Colorado[D]. Flagstaff: Northern Arizona University:101.
- Stackpole J D, 1973. The NMC 8-Layer Global and Hemispheric Primitive Equation Models (8L-GLOPEP & 8L-HEMPEP) on a Longitude-Latitude Grid[R]. NMC office Not. 90.
- Waldstreicher J S, 2001. The importance of snow microphysics for large snowfalls [C]//Preprints, 3rd Northeast Operational Workshop.
- Wetzel M, Meyers M, Borys R, et al, 2004. Mesoscale snowfall prediction and verification in mountainous terrain[J]. *Wea Forecasting*, 19(5):806-828.