

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.04.002

基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型

曹 勇^{1,2}, 包红军^{1,2}, 张恒德^{1,2}, 郭云谦^{1,2}, 刘凑华^{1,2}, 陈 双^{1,2}

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 北京 100081)

摘要: 针对中小尺度天气系统极易导致突发性短时强降水而难以定量化预报的问题, 提出了一种基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型。模型基于改进光流法技术实现临近(0~2 h)定量降水预报, 基于 GRAPES-3 km 实时频率匹配订正技术构建短时(2~12 h)定量降水预报, 基于最优背景场生成技术形成短中期(12~240 h)定量降水预报; 依据3种预报时效定量降水预报技术的技巧差异, 结合实时预报检验评估, 提出了基于经验权重函数的不同预报时效之间的预报融合技术, 并根据最新降水实况逐1 h调整预报, 构建了0~240 h快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型。选取2018年5—10月24 h定量降水预报进行检验, 并与传统定时预报对比, 结果表明该模型24 h降水预报准确率高于传统定时预报, 特别是对中小尺度天气系统突发性短时强降水预报时空精度明显提高, 有利于中小河流洪水预报与灾害防控。

关键词: 无缝隙定量降水预报; 快速滚动更新; 改进光流法; 实时频率匹配订正; 最优背景场

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)04-0303-06

Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique

CAO Yong^{1,2}, BAO Hongjun^{1,2}, ZHANG Hengde^{1,2}, GUO Yunqian^{1,2}, LIU Couhua^{1,2}, CHEN Shuang^{1,2}

(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081, China)

Abstract: The sudden short-term severe precipitation, frequently caused by mesoscale and microscale weather systems, is very complicated to forecast quantitatively. This study develops a seamless quantitative precipitation forecasting (QPF) model based on the rapid rolling update technique. In the developed model, the quantitative precipitation nowcasting (0-2 h) is based on the improved optical flow method, the short-term quantitative precipitation forecasting (2-12 h) is based on the GRAPES-3 km and real-time frequency matching correction method, and the short and medium range quantitative precipitation forecasting (12-240 h) is based on the generation technique of optimal background precipitation field. According to forecasting skills of three methods in different forecasting time, the forecast fusion technology based on the empirical weight function is developed for the seamless quantitative precipitation forecasting (0-240 h) with the real-time precipitation verification and QPF. The 24-hour quantitative precipitation forecast from May 2018 to October 2018 is taken as the experimental case to test the developed model, and the result is compared with forecasts of the traditional model. Results show that the 24-hour precipitation forecast accuracy of the developed model is higher than that of the traditional forecast model, especially for the short-term quantitative sudden severe precipitation forecasting caused by mesoscale and microscale weather systems. It is conducive to the flood forecasting, disaster prevention and control of small to medium-sized rivers.

Key words: seamless quantitative precipitation forecasting; rapid rolling update; improved optical flow method; real-time frequency matching correction; optimal background precipitation field

降水是一种重要的天气现象,同时也是公众最为关心的气象要素之一^[1]。由强降水诱发的中小河流洪水、山洪、城市内涝、泥石流滑坡等诸多次生灾害严重影响民众生命及财产安全;而降水对于缓解干旱地区旱情又起到积极正向作用。此外,降水又是地球水循环的重要组成部分,其分布及演变对于地球气候系统有着重要影响^[2]。因此,准确的定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)对于国家防灾减灾与保障

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508102);国家自然科学基金(41775111, 41875131);中国气象局气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM(2019)03)

作者简介: 曹勇(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事降水预报研究。E-mail:caoyong@cma.gov.cn

通信作者: 包红军,正高级工程师。E-mail:baohongjun@cma.gov.cn

引用本文: 曹勇,包红军,张恒德,等. 基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 303-308.
CAO Yong, BAO Hongjun, ZHANG Hengde, et al. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 303-308.

人民生命财产安全以及开展相关地球科学研究工作都至关重要。

我国受海陆与地形因素的影响,降水时空分布差异大,区域降水形成机理复杂,特别是中小尺度天气系统短时强降水。20 世纪 60 年代中后期开始,国家气象中心开展定量降水预报业务^[3]。至今,定量降水预报产品内容不断丰富,形成每日两次发布的未来 24 h 逐 6 h 的定量降水预报以及未来 1~7 d 逐 24 h 的短中期定量降水预报,但其产品主要为降水落区等值线预报,降水预报不够定量和定时定点,且时空分辨率较低,导致在流域防汛、中小河流洪水、山洪与地质灾害等灾害防治中应用程度不高。为了满足国家重大发展战略对高时空分辨率、高频滚动更新的数字化定量降水预报需求,国家气象中心 2014 年组织开展网格化定量降水预报技术研发和系统建设,2016 年发布空间分辨率 5 km、未来 3 d 逐 1 h 和未来 10 d 逐 3 h 的网格化定量降水预报产品,其核心技术采用主客观融合预报思路,业务预报更新仍为每日 2 次定时更新,较大程度地满足了社会对于数字化网格化预报服务的需求^[4-5]。近年来,中小尺度天气系统突发性短时强降水致使中小河流洪水、山洪与地质灾害等灾害损失严重,而每日 2 次的定时产品难以完全捕捉这类天气系统,对此类天气形势下的降水预报能力较低。而利用实时更新的定量降水估测资料,进行实时滚动更新订正降水预报误差,是提高中小尺度天气系统强降水定量预报精度的主要途径。

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 3 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^[6]。美国快速更新同化预报主要基于模式预报,缺少模式后处理,其预报精度仍有提高的空间。近年来,我国国家气象中心初步建立了基于全球区域同化预报系统(global regional assimilation and prediction system, GRAPES)的全国逐 3 h 的快速更新同化预报,北京市气象局发展了基于快速更新多尺度分析和预报系统,实现了区域逐 1 h 的快速更新同化分析与预报,但与美国技术框架相近,也缺少模式后处理信息融入来提高预报精度。

Browning^[7]研究表明,定量降水预报受大气可预报性限制,不同预报技术在不同预报时效内的预报技巧不同:0~2 h 临近时效,外推预报技巧预报准确率相对更高;2~12 h 短时预报时效,基于快速更新同化的中尺度模式预报技巧预报准确率相对更高;12~240 h 短中期预报时效,全球模式预报准确率相对更高。对于临近预报而言,近年来基于图像识别的传统光流法技术在定量降水临近预报中得到了广泛的应用^[8-9],并取得了较好的效果。但该方法也存在明显的技术缺陷,如对于无降水区域难以给出最优的平流风场估测,无法避免半拉格朗日外推出现降水强度减弱的计算误差,另外传统光流法难以考虑降水系统的生消发展,在临近预报中无法考虑降水强度变化。对于短时预报而言,GRAPES 中尺度模式(GRAPES-3 km)空间分辨率已达 3 km,并已实现快速更新同化和逐 3 h 快速滚动更新预报。由于实时同化了最新观测资料,GRAPES-3 km 在预报中小尺度天气系统造成的短时降水方面比全球模式的预报准确率相对要高^[10-11],但快速更新同化区域模式同样也存在预报误差,需要进行偏差订正。

针对上述问题,为进一步提高我国区域内逐小时快速更新同化预报精度,本文在多模式后处理技术以及数据处理技术基础上,提出基于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,并以 2018 年 5—10 月降水预报为例验证了本文提出的基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型的适用性与精准性。

1 模型构建

1.1 快速滚动更新技术架构

为了实现 0~240 h 无缝隙定量降水预报,本文构建逐 1 h 快速滚动更新定量降水预报模型,其技术架构如图 1 所示。模型主要包括 4 个技术模块:(a) 定量降水估测技术模块,用于构建全国卫星雷达雨量站多源降水融合的逐 1 h 定量降水实况估测场^[12]; (b) 基于改进光流法的定量降水临近外推技术模块,用于实现基于定量降水估测产品的 0~2 h 的临近外推预报; (c) 基于 GRAPES-3 km 实时频率匹配订正的短时定量预报技术模块,用于实现定量降水的 2~12 h 的短时预

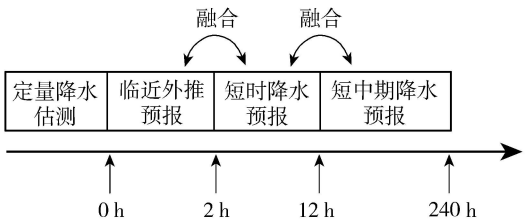


图1 快速滚动更新定量降水预报技术架构
Fig.1 Framework of quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique

报;(d)基于最优背景场生成技术的短中期降水预报技术模块,结合多中心多模式预报的主客观融合预报,用于实现12~240 h的短中期定量降水预报^[4]。不同预报时效之间预报无缝隙连接,通过评估各个预报时效的准确率,结合权重函数相互融合,实现了逐1 h快速滚动更新定量降水预报。依据该技术构建的系统现在国家气象中心投入业务应用,所需输入数据为国家气象信息中心实时提供的全国范围的逐1 h的定量降水估测产品,数值模式资料为GRAPES-3 km提供的逐1 h降水预报产品,短中期预报为国家气象中心智能网格预报提供的逐1 h降水预报产品,上述资料的空间分辨率均为0.05°。最终预报为全国范围的快速滚动更新预报,空间分辨率为0.05°,时间分辨率为1 h。

1.2 基于改进光流法的临近外推预报技术

改进光流法的临近外推技术即通过构建基于金字塔架构的Lucas-Kanade光流技术(LK光流技术)解决无降水区域无法估测最优平流风场的问题;另外,采用强度守恒约束的半拉格朗日平流外推法来减小半拉格朗日外推出现降水强度减弱的计算误差,发展了基于GRAPES-3 km热力环境场预报的降水强度变化预报技术。平流背景风场是控制中小尺度天气系统移动的背景风场,该风场不同于某层大气实际的风场,而是由中小尺度天气系统移动方向速度具体确定的。若将降水分布场视为某种图像,并假定系统在短时间内强度不变,利用时间间隔较短的两张图像的差异,实现LK光流技术反演平流背景风场^[13]。由于LK光流技术对无降水区域的平流背景风场无反演能力,本文提出基于金字塔架构的LK光流法来实现平流背景风场的反演:利用图像分辨率升尺度技术,构建8种空间尺度的降水预报场,从底层到高层分辨率逐渐降低,如图2(图中绿色和红色网格代表天气系统的降水区域,其中红色区域降水强度大于绿色区域)所示,依据LK光流技术由上至下逐层获取当层的平流背景风场,并作为下一层的平流背景风场的初始猜测场。基于金字塔架构的LK光流法既能获得无降水区域最优的背景平流风场的估计,同时也可以获取有降水区域背景平流风场的精细结构。

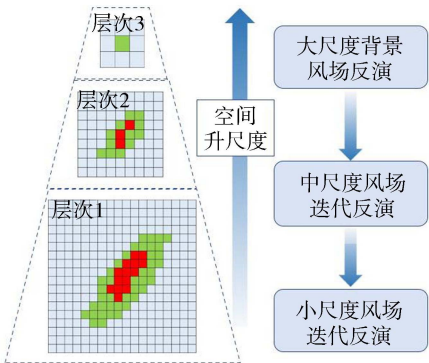


图2 基于金字塔架构的LK光流风场反演示意图

Fig.2 Sketch map of LK optical flow wind inversion field based on pyramid structure

利用改进光流法的临近外推预报技术可获取定量降水场对应的平流背景风场,并在此基础上可利用半拉格朗日平流技术实现降水场的临近外推。半拉格朗日外推中往往需要通过插值获取非网格点值,极易导致外推降水强度逐渐减弱的虚假计算问题,为此提出采用降水守恒约束条件加以解决,即利用插值连续两个时次降水累积百分位匹配技术,进行外推后的强度订正计算,保持降水强度守恒。传统外推技术难以计算出外推过程中真实降水的强度变化,本文采用GRAPES-3 km环境预报技术,基于前两个时次的降水生消变化及热力不稳定环境场关系,实时构建降水强度增减幅统计经验关系模型,实现在外推过程中降水强度订正计算。通过采用上述3种技术即可实现未来0~2 h定量降水临近外推预报。

1.3 基于GRAPES-3 km的预报实时偏差订正技术

频率匹配订正技术已在气象要素订正,尤其定量降水预报订正领域得到了较广泛的应用^[14],其原理是利用待订正量以及观测量样本资料,分别计算待订正量经验累积概率分布函数以及观测量经验累积概率分布函数,利用两者在经验累积概率分布函数之间的差异来订正待订正量,最终使得订正后的待订正量经验累积概率分布函数与观测量经验累积概率分布函数一致,计算公式为

$$x_c = F_o^{-1}(F_m(x_m))$$
 (1)

式中: x_m ——待订正量; $F_m(x_m)$ ——待订正量经验累积概率分布函数,是观测量经验累积概率分布函数的逆函数; x_c —— x_m 对应的订正值。

该技术的本质是要实现待订正量和观测量的对应分位数的映射。具体实现流程如图3所示,利用当前滚动时刻到最近GRAPES-3 km起报时间之间的降水实况和模式预报降水通过实时频率匹配技术,进行降水强度偏差订正,完成短时时效阶段(2~12 h)的定量降水预报。

1.4 定量降水预报最优背景场生成技术

不同预报技术在不同预报时段内的预报技巧不同,表现为在不同预报时效内的预报准确率不同,为此可分别检验临近预报、短时预报以及短中期预报逐1 h准确率,并以此为标准构建权重(图4),通过动态权重融

合,形成无缝隙降水预报。

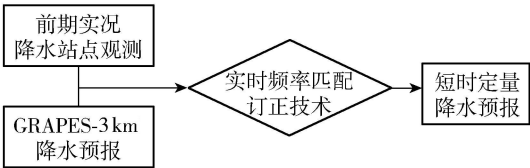


图3 基于 GRAPES-3 km 的预报实时偏差订正技术流程

Fig.3 Flow chart of real-time forecasting error correction technique based on GRAPES-3 km model

预报准确率以过去 30 d 平均准确率作为标准,以体现评价的稳定性,准确率评价使用 TS 评分,TS 评分计算公式为

$$F = H_1 / (H_1 + H_2 + H_3) \tag{2}$$

式中: F ——TS 评分值; H_1 ——预报站点命中数; H_2 ——预报站点漏报数; H_3 ——预报站点空报数。

TS 评分考察量级为 2 mm/h,该量级为短时中雨量级。以 2018 年 8 月 1—30 日 8 时起报 24 h 时效为例(图 5),计算该时段内临近、短时以及短中期 3 种预报技术在全国国家站的平均 TS 评分,临近预报的准确率在 1~6 h 预报时效由 0.6 迅速下降到 0.1 附近;短时预报的准确率下降则比较缓慢,在 14 h 内逐渐由 0.36 下降到 0.07;国家气象中心发布的主客观融合的定时短中期小时降水预报^[5]在 0~12 h 内预报准确率最低,但是其准确率下降速度最慢,24 h 内由 0.2 逐渐下降到 0.08。值得关注的是临近预报与短时预报准确率的交点在 3 h 附近,短时预报和短中期预报的交点在 12 h 附近,这之前对于临近预报以及短时预报时间段的定义基本一致。

各种预报技术的权重主要是依据 TS 评分采用下式计算:

$$a_{ij} = F_{ij} / \sum F_{ij} \tag{3}$$

式中: a_{ij} ——第 i 个预报技术第 j 小时预报时效的权重; F_{ij} ——第 i 个预报技术第 j 小时预报时效的 TS 评分。

表 1 是依据式(3)计算 TS 评分并进行归一化后得到的 3 种预报技术的权重。在 1~3 h 临近预报权重最高,但是权重随预报时效增加而逐渐降低;短时预报权重先逐渐增大,到第 7 小时达到最大,而后逐渐减小。短中期预报权重在 19 h 内是逐渐增大的,到第 11 小时接近短时预报,到第 13 小时超过短时预报,成为权重最大的预报技术,第 14 小时后权重达到 1。

表1 2018年8月1—30日8时起报19h时效内预报技术权重

Table 1 Weight coefficient distribution of forecasting technique in 19-hour lead time from August 1st to August 30th, 2018 (forecasting time was 8:00)

预报技术	权 重									
	第1小时	第3小时	第5小时	第7小时	第9小时	第11小时	第13小时	第15小时	第17小时	第19小时
临近预报	0.50	0.40	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
短时预报	0.32	0.38	0.46	0.55	0.54	0.51	0.43	0.00	0.00	0.00
短中期预报	0.18	0.22	0.31	0.45	0.46	0.49	0.57	1.00	1.00	1.00

2 实例检验

2.1 2018年7月5日长江中下游地区定量降水预报检验

2018年7月5日受江淮地区低层切变线影响,长江中下游地区普遍出现大雨到暴雨天气,但是降水过程不均匀,有多个中 β 尺度强降水系统生效传播。图6(a)(b)(c)分别为7月5日9时、12时和20时的1h降水估测,可见降水分布极度不均匀,在9时有3处相对大值中心,分别位于湖北东部、安徽北部和江苏西南

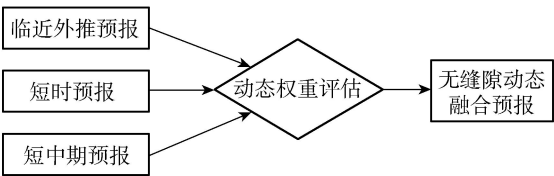


图4 定量降水预报动态融合技术流程

Fig.4 Flow chart of dynamic fusion technique for QPF

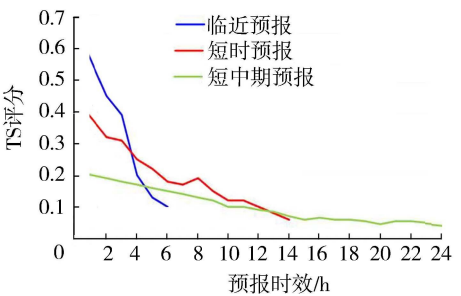


图5 2018年8月1—30日8时起报24h时效内逐1h TS评分

Fig.5 TS scores for hourly precipitation forecasting with 24-hour lead time from August 1st to August 30th, 2018 (forecasting time was 8:00)

部;到 12 时安徽北部强降水略向东移动,江苏西南部降水明显加强;到 20 时又有新的强降水系统位于安徽中部地区。图 6(d)(e)(f)为传统定时降水预报产品,制作时间为 5 时,可见虽然对于天气尺度的大范围降水落区位置把握较好,但是预报相对均匀,且强度明显偏弱,如 9 时预报,安徽北部强降水中心有所体现,但是预报强度明显偏弱,江苏西南部强降水中心漏报;12 时,能较好预报安徽北部强降水中心东移到江苏北部,但江苏南部以及湖北东部强降水预报依旧偏弱。图 6(g)(h)(i)是滚动更新降水预报,对于 9 时上述 3 个区域强降水中心的移动和强度均有较好的体现,随着预报时效的增长,预报形态与实况出现差异,江苏北部和南部的强降水与实况位置基本一致,但预报强度较实况偏弱;随后,20 时由于逐渐过渡到短中期的小时预报,预报结果与图 6(f)类似,漏报安徽中部强降水带。由于滚动更新预报是逐 1 h 滚动更新,后期起报时刻随着更多实况信息通过临近预报融入最终滚动更新预报,对于安徽中部强降水也能较好的预报。由于我国中东部地区夏半年降水多对流性质,此实例较好地说明了定量降水预报进行快速滚动更新,及时融入最新实况信息,对于提高降水预报的精细化程度以及准确率十分重要。

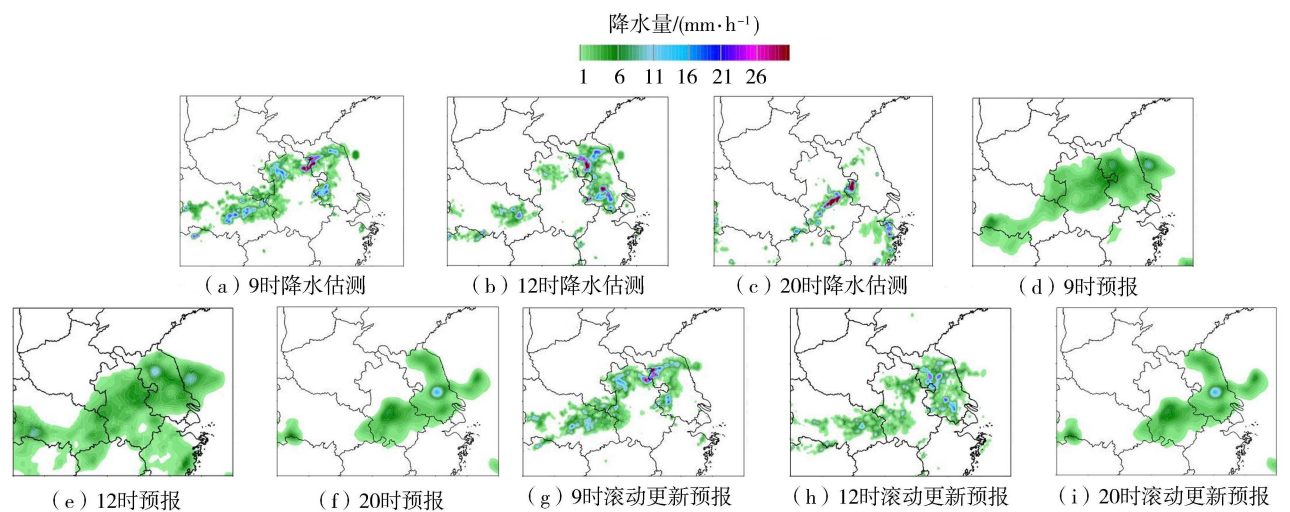


图 6 2018 年 7 月 5 日长江中下游地区 3 种预报技术预报结果与降水实况对比
Fig. 6 Comparison between rainfall observation and QPFs in the middle and lower reaches of the Yangtze River on July 5, 2018

2.2 2018 年 5 月 1 日至 10 月 30 日全国定量降水预报检验

为了更好地说明滚动更新预报与定时预报的预报性能差异,通过逐小时累加,获取 8 时滚动更新的 24 h 累积降水预报,并与 4 时制作的 8 时起报的定时 24 h 降水预报进行对比。表 2 为 2018 年 5 月 1 日至 10 月 30 日汛期二者 TS 评分,可见从小雨到暴雨各个量级滚动更新降水预报准确率均高于定时降水预报。其原因主要有两点:第一,传统定时降水预报一般于凌晨 4 时发布,4—8 时在夏半年存在一些突发强降水系统,传统定时预报往往会疏漏这些突发强降水系统,而滚动更新 8 时预报一般于 7 时发布,比定时预报更接近起报时间,会有更多最新的实况信息用于降水的滚动订正;第二,滚动更新前几个小时主要是临近预报的作用,在这个预报时效内临近预报精度一般是高于短中期的逐 1 h 预报,通过融入至滚动更新预报,提升预报精度。但滚动更新预报并不意味着损失预见期,由于滚动更新预报是逐 1 h 预报一次,因此即使是 4 时发布的滚动更新预报,效果也好于同时期的定时预报。与原始的 GRAPES-3 km 相比,2018 年 5—10 月逐小时降水预报精度在 10 mm/h 这个量级上提高了 8%,快速滚动更新降水预报整体 TS 评分高于传统定时降水预报。

表 2 定时降水预报与滚动更新降水预报累积 24 h 降水 TS 评分

Table 2 TS score comparison between regular QPFs and rapid updating QPFs with 24 h lead time				
预报技术	小雨	中雨	大雨	暴雨
定时预报	0.56	0.39	0.26	0.18
滚动更新预报	0.62	0.45	0.31	0.21

3 结 语

本文针对国家级传统降水预报时空分辨率低、临近预报产品缺乏、连续性弱等问题,建立了基于快速滚

动更新的无缝隙定量降水预报模型。模型引入了守恒约束条件解决了外推计算误差问题,结合中尺度模式实现临近预报中的降水强度订正,采用实时降水偏差订正方法,结合最新实况降水场对定量降水预报完成实时滚动更新订正,生成未来1~3 d、逐1 h时间分辨率、5 km空间分辨率的全国区域降水预报产品。2018年长江中下游地区定量降水预报和5—10月全国定量降水预报检验结果表明,滚动更新定量降水预报产品准确率较传统定时预报准确率有明显提升,对国家级定量降水预报业务发展有较好的借鉴与促进作用。

随着数值预报模式后处理与人工智能技术的快速发展,利用实况信息进一步改进临近降水预报强度,利用集成技术进一步提高短时预报准确率,改进短中期小时预报中涉及的时空降尺度技术,多种预报技术无缝隙拼接等是提高基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报精度亟需解决的关键问题。此外,在多源数据及多源技术发展的背景下,在临近、短时时效内开展多源多方法最优融合,进一步提高临近短时预报的准确率也是重要的发展方向。

参考文献:

[1] 毕宝贵,代刊,王毅,等. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 534-549. (BI Baogui, DAI Kan, WANG Yi, et al. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 534-549. (in Chinese))

[2] 包红军,张珂,魏丽,等. 淮河流域2016年汛期洪水预报试验[J]. 气象, 2017, 43(7): 831-844. (BAO Hongjun, ZHANG Ke, WEI Li, et al. Test on flood forecasts for Huaihe River in the 2016 flood season[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7): 831-844. (in Chinese))

[3] 宗志平,代刊,蒋星. 定量降水预报技术研究进展[J]. 气象科技进展, 2012, 2(5): 29-35. (ZONG Zhiping, DAI Kan, JIANG Xing. The research progress of quantitative precipitation forecast[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(5): 29-35. (in Chinese))

[4] 金荣花,代刊,赵瑞霞,等. 我国无缝隙精细化网格天气天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457. (JIN Ronghua, DAI Kan, ZHAO Ruixia, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(4): 445-457. (in Chinese))

[5] 曹勇,刘凑华,宗志平,等. 国家级格点化定量降水预报系统[J]. 气象, 2016, 42(12): 1476-1482. (CAO Yong, LIU Couhua, ZONG Zhiping, et al. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(12): 1476-1482. (in Chinese))

[6] BENJAMIN S G, WEYGANDT S S, BROWN J M, et al. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: the rapid refresh[J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(4): 1669-1694.

[7] BROWNING K A. Structure, mechanism and prediction of orographically enhanced rain in Britain[C]// HIDE R, WHITE P W, eds. Orographic Effects in Planetary Flows. Geneva: WMO GARP Publications, 1980: 85-114.

[8] 毛冬艳,朱文剑,樊利强,等. GRAPES_MESO V3.3模式强天气预报性能的初步检验[J]. 气象, 2014, 40(12): 1429-1438. (MAO Dongyan, ZHU Wenjian, FAN Liqiang, et al. Preliminary synoptic verification on the performance of GRAPES_MESO V3.3 in severe weather forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(12): 1429-1438. (in Chinese))

[9] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 197-203. (BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 197-203. (in Chinese))

[10] BOWLER N E H, PIERCE C E, SEED A. Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques[J]. Journal of Hydrology, 2004, 288(1/2): 74-91.

[11] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))

[12] 潘旸,沈艳,宇婧婧,等. 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, 2015, 73(1): 177-186. (PAN Yang, SHEN Yan, YU Jingjing, et al. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 177-186. (in Chinese))

[13] BAKER S, MATTHEWS I. Lucas-Kanade 20 years on: a unifying framework[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 56(3): 221-255.

[14] MARAUN D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue[J]. Journal of Climate, 2013, 26(6): 2137-2143.

(收稿日期:2021-05-06 编辑:熊水斌)