

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.002

基于多模式预报优选融合技术的短时定量降水预报

曹 勇^{1,2}, 张恒德^{1,2}, 郭云谦¹, 包红军^{1,2}, 徐成鹏¹, 赵 威¹

(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: 为提升短时定量降水预报准确率, 使其更好地支撑城市暴雨洪涝及中小河流洪水预报, 基于多源数值天气模式预报值, 构建了基于预报成员优选融合的短时(0~12 h)逐小时定量降水预报模型, 模型由单模式百分位映射订正技术模块、模式订正预报成员实时优选技术模块、预报成员实时融合技术模块和融合预报的百分位映射订正技术模块 4 个技术模块组成。以河南省为例对模型进行检验, 结果表明: 模型预报降水分布和强度随着预报时效临近更接近实况降水; 模型提前 6 h 预报出郑州“7·20”暴雨最强时段降水的落区和强度; 在 2021 年 1—9 月降水预报对比检验中, 模型预报准确率高于任意单模式订正预报和原始模式预报, 且准确率随着预报时效的临近逐步提高。

关键词: 短时定量降水预报; 多数值模式预报; 成员优选; 最优融合; 河南省

中图分类号: P456.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)05-0010-06

Short-term quantitative precipitation forecast based on optimization fusion technology of multi-model forecasts

CAO Yong^{1,2}, ZHANG Hengde^{1,2}, GUO Yunqian¹, BAO Hongjun^{1,2}, XU Chengpeng¹, ZHAO Wei¹
(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological studies, Beijing 100081, China)

Abstract: Accurate short-term precipitation forecasts are an important basis for improving the capacities for the forecasting of urban rainstorms, urban floods, and small and medium-sized river floods, and disaster risk prevention and control. In order to improve the accuracy of short-term quantitative precipitation forecasts (QPF), a short-term (0-12 h) QPF model based on the optimization fusion method of multi-model forecasts is developed. The developed model system mainly includes four modules: a single model-based quantile mapping correction module, a real-time optimization module based on model forecasts correction, a real-time fusion module of optimized forecasts and quantile mapping correction module of fused forecasts. By taking the Henan Province as a test region, the developed model is applied and tested for the short-term quantitative precipitation forecasting. The results show that the developed model performs well, and the distribution and intensity of the precipitation forecasts using the new approach are much closer to the observations than the traditional methods; the developed model forecast is able to forecast the precipitation intensity and its cover area of the “7·20” rainstorm in Zhengzhou for 6 hours in advance; the forecasting accuracy of the developed model is much higher than the other traditional models through the intercomparing of rainfall predictions from January to September, 2021, and the forecasting accuracy increases gradually as the forecasting lead-time approaches the rainfall event.

Key words: short-term quantitative precipitation forecasting; multi-model forecasts; forecasts optimization; optimization fusion; Henan Province

降水是一种重要的天气现象, 密切影响着人类社会生产活动。精准地定量预报降水是水旱灾害防御与水库兴利减灾的重要保障^[1-4]。为了更好地满足国家社会经济发展和重大战略需求, 中央气象台已经建立了 0~30 d 无缝隙精细化智能网格降水预报技术体系, 空间分辨率达到 5 km×5 km^[2,5-6]。在整个智能网格降水预报技术体系中, 短时临近与延伸期时效预报精度不高一直是限制整体定量降水预报能力提升的主要瓶颈之一^[7]。短时时效的定时、定点、定量的精细化降水预报是提升城市应对暴雨灾害风险的重要支撑^[8]。如,

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508102, 2017YFC1502000); 中国气象局气象业务技术发展专项(YBGJXM(2020)3A-02); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z009); 国家自然科学基金(41775111, 41875131)

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: 张恒德(1977—), 男, 研究员级高级工程师, 博士, 主要从事灾害性天气研究。E-mail: zhanghengde@cma.gov.cn

引用本文: 曹勇, 张恒德, 郭云谦, 等. 基于多模式预报优选融合技术的短时定量降水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 10-15.
CAO Yong, ZHANG Hengde, GUO Yunqian, et al. Short-term quantitative precipitation forecast based on optimization fusion technology of multi-model forecasts[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 10-15.

2021 年 7 月 20 日郑州出现特大暴雨,经统计发现,日降水量及 1 h 降水量均打破郑州气象观测站建站以来历史记录,后者更突破我国大陆地区小时雨量历史极值,导致了极为严重的洪涝灾害。传统的降水预报技术往往仅能支撑 2 h 左右的精准预报,对标市政部门应急响应时间需求仍有明显差距。因此,如何延长突发性强降水预报的预见期,尤其是提升 0 ~ 12 h 逐小时短时降水预报精准度,对于提升城市暴雨洪涝防御与政府应急管理能力和至关重要^[9-13]。

研究表明^[14-18],现阶段限制 0 ~ 12 h 短时降水预报精度提升的主要因素为基于实况信息外推的降水预报精度随着预报时效延长急速下降,而此时效内,全球数值天气预报模式正处于模式“spin-up”阶段,模式降水预报精度普遍不可用于暴雨洪涝预报。近年来,区域中尺度数值天气预报模式取得了长足发展,明显提升了模式对中小尺度天气系统短时降水预报能力^[9],如中国气象局 2006 年业务化区域中尺度模式,并在 2019 年实现该模式空间 3 km×3 km 并覆盖全国范围,成为提升降水 0 ~ 12 h 短时预报重要的支撑^[19-20]。业务实时应用发现,区域中尺度数值模式预报的准确率依然不可避免的受数值模式动力过程的离散化和物理过程的参数化两方面影响,极易导致模式预报的系统性偏差。发展数值天气预报模式后处理技术是减少模式偏差重要手段^[21]。Zhu 等^[22]用频率匹配方法对降水预报进行订正,发现订正后的降水落区面积预报偏差显著减小,雨带轮廓和位置更接近实际情况。但每次不同降水过程,不同模式以及模式订正预报的性能表现不一样,且传统的模式后处理技术只能订正模式的系统性偏差,对于 0 ~ 12 h 突发性短时强降水难以有理想的预报性能。

综上,本文紧扣大城市暴雨洪涝气象服务需求,基于多源数值模式预报,开展多数值模式预报成员实时优选,在优选基础上开展预报最优化融合,构建逐小时的实时降水短时预报模型,并以 2021 年河南区域典型强降水过程为例进行预报验证,探讨构建的降水短时预报模型对大城市突发性强降水 0 ~ 12 h 精细化预报准确率的提升效果。

1 模型构建

1.1 模型总体架构

降水短时预报模型主要由 4 个技术模块构成:①单模式百分位映射订正技术模块。由于数值模式存在系统性的预报偏差,因此主要利用该技术模块订正单模式原始降水预报的系统性偏差。②模式订正预报成员实时优选技术模块。该技术模块会利用最新降水估测结果对数值模式订正预报进行实时检验评估,在检验评估基础上进行预报成员优选,挑选出预报结果最接近当前降水评估的数值模式订正预报成员。③预报成员实时融合技术模块。在优选成员基础上,将归一化的准确率评估结果作为权重系数进行多源模式订正预报结果融合。④融合预报的百分位映射订正模块。由于权重融合结果一定程度减弱了强降水预报,同时增加了弱降水预报^[23],利用单模式订正预报对融合预报结果进行百分位映射,消除融合预报强度偏差,最终生成降水短时预报结果。

1.2 单模式百分位映射订正技术

百分位映射订正技术是一种模式降水预报订正技术,由于模式存在系统性偏差导致最终模式预报降水的累积概率分布函数与实况降水的累积概率分布函数有差异,百分位映射技术主要就是实现此类系统性偏差的订正。具体计算公式为

$$x_o = F_o^{-1}(F_m(x_m)) \tag{1}$$

式中: x_o 为模式降水预报订正预报值; x_m 为数值模式降水预报值; $F_m(x_m)$ 为模式降水预报的累积概率分布函数; $F_o^{-1}(F_m(x_m))$ 为实况降水估测的累积概率分布逆函数。

通过式(1)可以实现模式预报降水的订正。考虑到模式降水预报的误差随着季节以及预报时效会有差异,为了保证订正的效果和平稳性,在本模型中,会针对每个模式的每次起报及不同预报时效分别训练建立模型,训练数据采用滑动时间窗口的方式选取最近 3 a 的模式降水预报和对应的实况降水估测,建立短时降水预报模型,实现单数值模式预报的订正。

1.3 预报成员实时优选技术

利用单模式百分位映射技术实现了模式降水预报的订正,但是对于每次降水过程预报,模式降水订正预报精度并不稳定,且精度优劣各异。因此,模型构建预报成员实时优选技术模块,在多源数值模式订正预报

中挑选预报精度最高的降水预报用于后期的融合技术处理。相似标准采用余弦相似值,余弦相似值是通过测量 2 个向量的夹角余弦值来度量它们之间的相似性,余弦值为 1 代表 2 个向量同方向,-1 代表 2 个向量反方向,余弦相似值介于-1 和 1 之间。

余弦相似的特点是考虑 2 个向量之间的方向一致性,而不考虑彼此绝对长度的大小。对于模式降水预报订正场和实况降水估测场,余弦相似值则表达了两者降水预报雨带的相似程度。由于降水订正场在百分位映射部分已经实现了强度订正,余弦相似值能较好地表达出模式降水预报场和实况估测场的相似程度。在本模型中,分别计算多源模式的订正降水预报与最新实况估测之间的余弦相似度。通过统计验证,发现选取 4 家数值模式订正预报参与后期的融合技术,短时降水预报准确率最高。

1.4 预报成员实时融合技术

构建基于余弦相似值的权重融合技术,根据最新时次优选的数值模式订正预报开展实时融合,权重由实时余弦相似值进行标准化计算获取:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n w'_i x_i \tag{2}$$

其中

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}$$

式中: $\bar{x}$ 为多模式融合预报值; w'_i 为标准化的权重; x_i 为模式降水订正预报值; w_i 为利用余弦相似值计算的非标准化权重; n 为参与融合的模式降水订正预报值数量。

1.5 融合预报百分位映射订正技术

由于构建模型中是采用线性权重融合方式,易导致预报强降水偏弱、预报弱降水偏强,主要原因为融合后的降水预报概率分布函数与单模式订正预报的分布有差异。为了消除这种系统偏差,采用百分位映射技术进行偏差订正,并设置输入训练数据为融合降水预报和优选的 4 个单模式降水订正预报,利用优选的 4 个单模式降水预报总体的累积概率分布函数完成融合降水预报的偏差订正。

2 总体及个例预报检验

2.1 研究区域

选择河南省作为模型验证的研究区域,范围为 110°E ~ 117°E,31°N ~ 37°N。河南省地跨长江、淮河、黄河、海河四大流域。地势呈望北向南、承东启西,地势西高东低,北、西、南三面由太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布;中、东部为黄淮海冲积平原;西南部为南阳盆地。大部分区域处于暖温带,南部跨亚热带,属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,同时还具有自东向西由平原向丘陵山地气候过渡的特征,具有四季分明、雨热同期、复杂多样和气象灾害频繁的特点,年均降水量约为 852 mm,主要在汛期 6—8 月。

2.2 研究数据

使用的数据主要有模式降水预报和实况降水估测两部分,降水预报数据的全球模式包括中国气象局模式、欧洲中期预报中心模式、美国大气海洋局模式和德国气象局模式等 4 家全球模式;区域模式包括中国气象局中尺度模式、上海市气象局中尺度模式、广东省气象局中尺度模式以及北京市气象局中尺度模式。模式降水预报数据分别采用线性插值方案,处理成时空尺度统一的逐小时、5 km×5 km 分辨率 36 h 预报时效的降水产品。实况降水估测数据为国家气象信息中心发布的逐小时实况降水估测产品,空间分辨率为 5 km×5 km。

2.3 预报检验

对 2021 年 1—9 月河南地区的数值模式原始预报、数值模式订正预报以及多模式实时优选及融合预报进行预报准确率检验,检验对象为短时时效(0 ~ 12 h)逐小时降水预报,准确率评分标准为气象预报业务常用的 TS 评分^[2]。对于 1 mm/h 量级降水而言,数值模式订正预报较原始预报准确率有所提升,但提升不明显;多模式优选及融合预报较数值模式订正预报及原始预报均提升较明显,平均提升率达到 10% (图 1(a))。对于 5 mm/h 量级降水而言,数值模式订正预报较原始预报准确率有明显提升,在此基础上多模式优选及融合预报依然较数值模式订正预报及原始预报有较明显提升,平均提升率达 15% (图 1(b))。整体而言,多源模式成员优选及融合预报产品各时效、各量级(明显降水、较强降水)的逐小时降水预报准确率高于任意单模式

订正预报和原始模式预报。

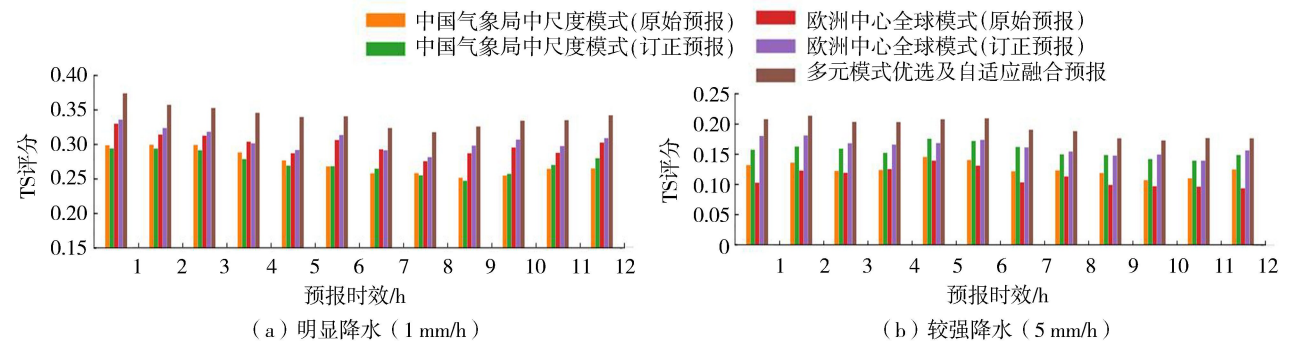


图 1 2021 年 1—9 月多模式客观产品的 0~12 h 逐小时降水预报结果对比

Fig. 1 Results comparison of multi-model forecasts of 0-12 h hourly precipitation from January to September, 2021

2021 年 7 月 20 日郑州出现特大暴雨,日降水量(624.1 mm)及最大 1 h 降水量(201.9 mm)均打破郑州气象观测站建站以来历史记录,后者更突破大陆气象观测小时雨量历史极值(198.0 mm),导致极为严重的城市暴雨洪涝灾害。此次降水过程与台风“烟花”靠近,台风与副热带高压之间东风急流加强有关,且受地形作用影响明显,因此具有强度大、范围集中及沿地形分布的特点。由图 2 可知,欧洲中心数值模式预报降水最强中心较实况偏西、偏北,同时中心强度也较实况偏弱,降水预报中心的雨强约为 80 mm/h,远低于实况,对此次郑州暴雨的极端性预报不足。多模式成员优选及融合预报结果,随时效临近,降水强度预报明显较欧洲中心数值模式偏大,上午 10:00 之后预报下午 6 h 累积降水超 150 mm,与实况(区域 150 mm,局地 300 mm)量级接近,且随着预报时效的临近,强降水区向南调整,逐步与实况贴合。在这次极端性极强的区域中尺度强降水中,多模式成员优选及融合预报的效果远好于以欧洲中心数值模式预报为代表的数值模式预报效果。

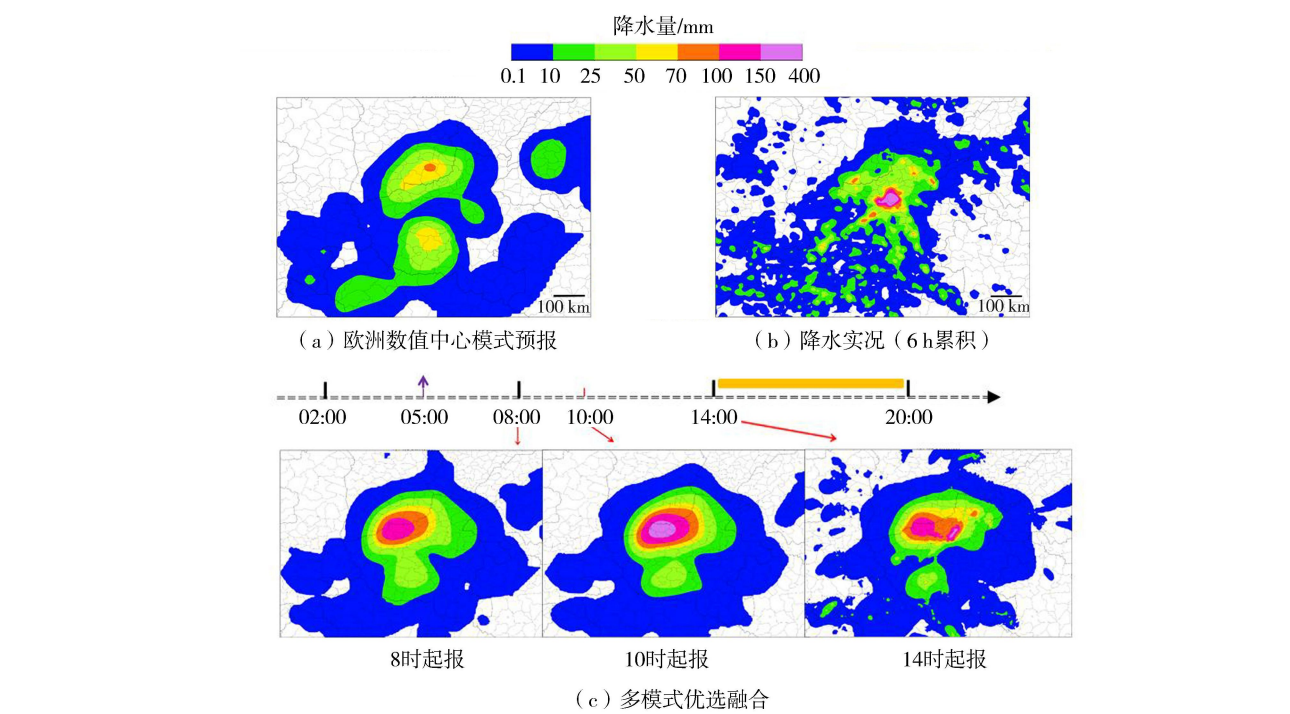


图 2 7 月 20 日最强降水时段欧洲中心模式预报以及多模式优选融合预报对比

Fig. 2 Comparison of ECMWF forecasts and multi-model optimization fusion forecasts during the maximum rainfall period in the study area on July 20th

4 月 23 日,河南中西部地区出现连续性、稳定性降水,此次降水主要受冷暖空气对峙影响,豫西地区大部分时间小时降水量在 6 mm 以内,持续时间超过 30 h,河南中西部降水主要集中在时段为 23 日夜间,12 h 累积降水量 25~60 mm(图 3)。最新时次的欧洲中心数值模式预报的落区与实况接近,但预报 12 h 雨水小于 25 mm(小到中雨),明显偏弱(图 3),而其他多家全球模式对 24 h 降水预报也偏小;多模式成员优选及融合预报的

结果,从18时起将降水量级调整为大雨,局地大于35 mm(图3),且强降水位置和强度均较原始模式提升。对比豫西两站点(图3(d)栾川,图3(e)卢氏)1 h降水实况与不同起报时刻的多模式优选及融合预报的时间序列图,逐小时降水预报在短时效内随着预报时效的临近,预报准确率逐渐提升。

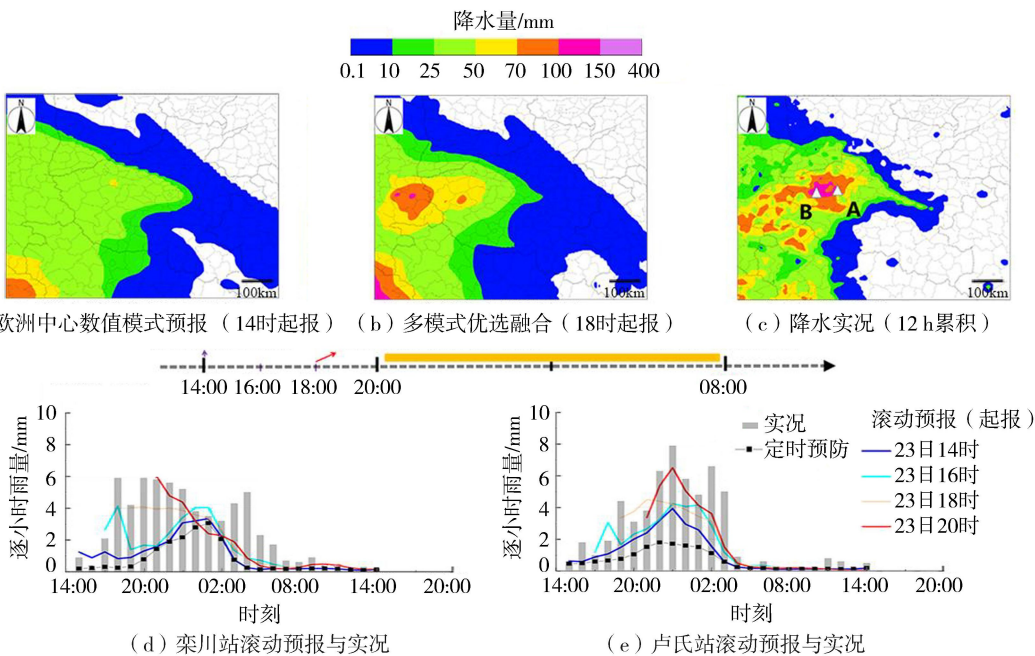


图3 4月23日最强降水时段欧洲中心模式预报以及多模式优选融合预报对比

Fig.3 Comparison of ECMWF forecasts and multi-model optimization fusion forecasts during the maximum rainfall period in the study area on April 23th

3 结 论

a. 模型融合了单模式百分位映射订正技术、模式订正预报成员实时优选技术、预报成员实时融合技术和融合预报的百分位映射订正技术,实现了基于多源数值模式预报优选及融合的降水0~12 h短时预报,在研究区域试验结果表明,相比于原模式预报,定量降水预报精度明显提升。

b. 针对河南地区“4·23”和“7·20”暴雨个例试验,模型能根据最新的实况估测检验评估结果,进行成员优选同时能实现多模式的融合预报,预报的范围和强度随着时效的临近更接近实况降水估测,能提前6 h较好地给出“7·20”河南暴雨最强时段降水的落区和强度预报。对河南地区2021年夏季整体预报情况检验,最终多模式融合预报准确率高于任意单模式订正预报和原始模式预报,同时准确率随着预报时效的临近逐步提高。

参考文献:

[1] 丁一汇,张建云.暴雨洪涝[M].北京:气象出版社,2009.

[2] 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,ZHENG 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. (in Chinese))

[3] 刘玉环,刘志雨,李致家,等.华北地区分布式蓄超空间动态组合 TOKASIDE-D 模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):105-112. (LIU Yuhuan,LIU Zhiyu,LI Zhijia,et al. TOKASIDE-D model of spatial dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff for North China region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(2):105-112. (in Chinese))

[4] 张珂,周佳奇,张企诺,等.栅格岩溶分布式水文模型[J].水资源保护,2022,38(1):43-51. (ZHANG Ke,ZHOU Jiaqi,ZHANG Qinuo,et al. Grid-based karst distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):43-51. (in Chinese))

[5] 金荣花,代刊,赵瑞霞,等.我国无缝隙精细化网格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))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 793-799. (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] 李致家, 朱跃龙, 刘志雨, 等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium sized rivers[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 13-18. (in Chinese))
- [11] 刘志雨, 刘玉环, 孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and earlywarning for small and medium-sized rivers[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese))
- [12] 马勇, 顾正华, 王庭辉, 等. 基于SWMM的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 499-505. (MA Yong, GU Zhenghua, WANG Tinghui, et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 499-505. (in Chinese))
- [13] 黄国如, 陈易偲. 高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 82-90. (HUANG Guoru, CHEN Yisi. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 82-90. (in Chinese))
- [14] 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.
- [15] SHI Xingjian, CHEN Zhoulong, WANG Hao, et al. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting[C]//Advances in neural information processing systems. Cambridge: MIT Press, 2015: 802-810.
- [16] KRISHNAMURTI T N, BEDI H S, ECKLEY W, et al. Reduction of the spinup time for evaporation and precipitation in a spectral model[J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(4): 907-920.
- [17] KALNAY E, YANG S C. Accelerating the spin-up of ensemble Kalman filtering[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(651): 1644-1651.
- [18] 包红军, 王莉莉, 沈学顺, 等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. *气象*, 2016, 42(9): 1045-1057. (BAO Hongjun, WANG Lili, SHEN Xueshun, et al. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. *Meteor Mon*, 2016, 42(9): 1045-1057. (in Chinese))
- [19] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 773-777. (CHEN Dehui, SHEN Xueshun. Recent progress on GRAPES research and application[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 773-777. (in Chinese))
- [20] 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 451-476. (SHEN Xueshun, WANG Jianjie, LI Zechun, et al. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 451-476. (in Chinese))
- [21] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. *气象学报*, 2018, 76(4): 493-510. (DAI Kan, ZHU Yuejian, BI Baogui. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(4): 493-510. (in Chinese))
- [22] ZHU Yuejian, LUO Yan. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. *Wea Forecasting*, 2015, 30(5): 1109-1124.
- [23] FOWLER H J, EKSTRÖM M, BLENKINSOP S, et al. Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: D18104.