

海河流域汛期面雨量预报检验评估

庄园煌 陈宏 梁健 孙密娜 徐姝 韩婷婷

Performance Evaluation of the Forecasting of Areal Rainfall for the Haihe River Basin during the Flood Season

ZHUANG Yuanhuang CHEN Hong LIANG Jian SUN Mina XU Shu HAN Tingting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24118>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

多源融合降水实况分析产品在海河流域的适用性评估

Assessing the Applicability of National Multisource Precipitation Analysis Product in the Haihe River Basin

气候与环境研究. 2024, 29(1): 25 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22140>

海河流域东北冷涡背景下的降水预报订正研究

Correction of Precipitation Forecast under the Northeast Cold Vortex in the Haihe River Basin

气候与环境研究. 2021, 26(5): 556 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20144>

中国区域3种数值模式的地面气象要素预报初步评估

Preliminary Evaluation of Surface Meteorological Elements Prediction Using Three Numerical Models in China

气候与环境研究. 2022, 27(2): 299 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20064>

华北“23·7”强降水对滹沱河流域的影响评估

Impact Assessment of North China “23·7” Heavy Rainfall on the Hutuo River Basin

气候与环境研究. 2024, 29(4): 457 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24041>

民航华北空管两代快速更新循环同化数值预报系统的检验评估

Evaluation of Two Generation Rapid Refresh Assimilation Numerical Prediction Systems in North China Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC

气候与环境研究. 2022, 27(4): 523 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21071>

寒潮天气过程对风/光伏发电资源要素数值预报技巧影响的检验分析

Verification and Analysis of the Impact of Cold Wave Weather Process on the Numerical Prediction Skills of Wind/Photovoltaic Power Resource Elements

气候与环境研究. 2022, 27(6): 769 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21173>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



庄园煌, 陈宏, 梁健, 等. 2025. 海河流域汛期面雨量预报检验评估 [J]. 气候与环境研究, 30(4): 463–472. ZHUANG Yuanhuang, CHEN Hong, LIANG Jian, et al. 2025. Performance Evaluation of the Forecasting of Areal Rainfall for the Haihe River Basin during the Flood Season [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 30 (4): 463–472. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24118

海河流域汛期面雨量预报检验评估

庄园煌^{1,2} 陈宏^{2,3} 梁健⁴ 孙密娜¹ 徐姝¹ 韩婷婷¹

1 天津市气象台, 天津 300074

2 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081

3 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074

4 天津市气象信息中心, 天津 300074

摘要 基于站点观测资料、国家指导预报 (NGWD)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 全球模式、中国气象局北京快速更新循环数值预报系统 (CMA_BJ) 区域模式和海河流域气象中心 (LYK) 的主观预报结果, 采用平均绝对误差、准确率、模糊评分、TS (Threat Score) 评分、漏报率和空报率等 6 个统计检验指标, 对海河流域 2023 年汛期 (6~9 月) 面雨量预报效果进行评估检验。结果表明: (1) 面雨量的预报效果随预报时效 (24 h、48 h、72 h) 延长而逐渐下降。(2) ECMWF 预报效果整体上优于其他模式, 其次是 LYK、NGWD 以及 CMA_BJ。(3) 分析典型个例发现, ECMWF、LYK 及 NGWD 对于 24 h 预报时效的强降水过程预报质量较好。但是 CMA_BJ 在强降水过程的等级预报中具有更大的优势, 预报等级误差更小, 预报结果更接近于实况。

关键词 海河流域 面雨量预报 数值模式 预报检验

文章编号 1006-9585(2025)04-0463-10

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24118

Performance Evaluation of the Forecasting of Areal Rainfall for the Haihe River Basin during the Flood Season

ZHUANG Yuanhuang^{1,2}, CHEN Hong^{2,3}, LIANG Jian⁴, SUN Mina¹, XU Shu¹, and HAN Tingting¹

1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

2 China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Beijing 100081

3 Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074

4 Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074

Abstract Based on observations, forecasts for objective rainfall were obtained from NGWD (National Guidance Weather Forecast), ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts), and CMA_BJ (China Meteorological Administration Beijing Rapid Update Cycle), while forecasts for subjective rainfall were obtained from the Haihe River Basin Meteorological Center (LYK), the forecasting performances of the three prediction models for objective rainfall and a subjective rainfall mentioned above were evaluated for areal rainfall in the Haihe River basin

收稿日期 2024-08-09; 网络预出版日期 2025-01-15

作者简介 庄园煌, 女, 博士研究生, 主要从事气候变化、水文气象研究。E-mail: zhuangyuanhuang14@mailsucas.ac.cn

通讯作者 陈宏, 女, 高级工程师, 主要从事天气预报和水文气象。E-mail: chenhongfengye@163.com

资助项目 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题资助项目 23SWQXM005、24SWQXZ014, 天津市气象台科研项目 2023QXTTKT003, 2024 年海河流域气象科技创新团队资助项目 HHXM-TD202406

Funded by Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory Project (Grants 23SWQXM005 and 24SWQXZ014), Tianjin Meteorological Observatory Research Project (Grant 2023QXTTKT003), Haihe River Basin Meteorological Science and Technology Innovation Team Funding Project (Grant HHXM-TD202406)

using mean absolute error, fuzzy grading, percentage correct, threat score, missing ratio, and false alarm ratio. The evaluation results are as follows: (1) The performances gradually declined with the extension of the period of validity (i.e., 24 h, 48 h, and 72 h). (2) ECMWF demonstrated an overall better performance than the other models, followed by LYK, NGWD, and CMA_BJ. (3) An analysis of typical rain events revealed that the grades of areal rainfall forecasts through ECMWF, LYK, and NGWD exhibited good predictive quality with a forecasting time of 24 h. However, the forecasting results generated by CMA_BJ exhibited remarkable advantages in predicting the level of heavy precipitation processes with lower forecast level errors, and more close proximity to the observation results to a greater extent.

Keywords Haihe River basin, Areal rainfall forecast, Numerical weather prediction model, Evaluation of forecast

1 引言

面雨量表征的是整个流域内单位面积上的平均降水量, 它能较为客观地反映整个流域内的降水情况。同时, 面雨量也是洪水预报中非常重要的参数(彭涛等, 2014; 吴国芳等, 2023; 庄园煌等, 2024)。精准的面雨量预报能更好地为各级相关政府组织防汛抗洪以及水库等决策提供重要的理论参考依据, 对防灾抗灾和经济建设具有十分重要的意义(包红军等, 2020)。

近年来, 随着数值预报技术的发展和降水预报产品的增多, 越来越多业务人员和科研人员利用数值预报降水场的结果客观地计算面雨量预报产品, 并在评估检验的基础上, 应用于江河流域的水文气象预报服务中, 从而提高流域面雨量预报水平。目前, 许多学者基于不同数值模式预报结果开展了流域面雨量及其检验研究工作(周国兵, 2005; 付晓辉等, 2006; 朱红芳等, 2007; 高琦等, 2011; 刘静等, 2014; 朱占云等, 2017; 郝莹等, 2019; 罗静等, 2019; 庞玥等, 2019; 邱辉等, 2020; 屠妮妮等, 2020; 孔祥波等, 2021; 杨寅等, 2022; 吕劲文等, 2023)。其中, 高琦等(2011)基于面雨量预报, 建立了长江上游洪水分级预估模型, 进一步将 7 天面雨量定量预报产品输入洪水预报模型, 结果可使宜昌洪峰预报的预见期提前 5 天。杨寅等(2022)基于 2018~2021 年欧洲中期天气预报中心集合降水预报数据开发了众数、平均数、最优百分位数、百分位数、概率等集合统计量面雨量预报产品, 并应用于 2020 年长江第 5 号洪水过程, 结果说明了集合统计量面雨量产品误差明显小于确定性预报。罗静等(2019)利用 CMORPH 融合降水产品与地面降水观测资料对基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球模式集合预报的面雨量预报进行性能评估, 指出 ECMWF 集合预报在 0~96 h 时效比

气候均值预报有明显优势。郝莹等(2019)对数值模式预报降水场在淮河流域面雨量预报结果开展研究, 结果发现 ECMWF 和日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)全球模式存在系统性高估, WRF(Weather Research and Forecasting)对短历时强降水的预报性能最优。在太湖流域, ECMWF 模式对小雨和中雨量级的面雨量预报范围和等级偏大, 而对大雨和暴雨量级则偏小(吴娟等, 2017)。综上所述, 目前关于多种数值预报模式降水预报产品应用于海河流域面雨量预报的检验评估分析方面的研究还较少。

海河流域地处京畿要地, 整个流域山地和高原面积广, 一旦有强降水发生, 容易给当地经济社会发展以及人民生命财产安全造成严重威胁。日益加剧的全球变暖, 使得流域内极端降水天气事件趋多趋重, 流域性大洪水出现的机率也会增大(李维京等, 2018; 刘明竑等, 2018; Ding et al., 2021; 庄园煌等, 2021)。比如, 2023 年 7 月, 受台风“杜苏芮”残涡影响, 海河流域出现暴雨到大暴雨, 局地特大暴雨, 降水总量 494 亿立方米, 引发了流域性大洪水, 给当地及其下游地区造成重大人员伤亡和财产损失, 引起了社会广泛关注。因此, 本文基于中央气象台下发的国家指导预报(NGWD)、ECMWF、中国气象局北京快速更新循环数值预报系统(CMA_BJ)区域模式和海河流域气象中心主观预报结果(LYK), 利用网格算术平均法分别计算出海河流域的逐日面雨量, 采用平均绝对误差、正确率、模糊评分、TS(Threat Score)评分、漏报率和空报率等统计评价指标, 对 2023 年汛期海河流域面雨量预报效果展开检验评估分析。

2 海河流域概况与资料说明

2.1 海河流域概况

海河流域地处中国华北地区, 是区域内最大的

水系，面积约 32.06 万平方千米。它的经纬度范围大概是（35°N~43°N，112°E~120°E），流域内主要包括北京、天津、河北、河南、山东、辽宁、内蒙古和山西等 8 个省（自治区、直辖市），全流域国家基本气象站和区域站大约有 4928 个。整个流域地势呈现西北高东南低，北有燕山山脉横贯东西，西接黄土高原和太行山区，东部和东南部为广阔的平原地区。海河水系支流众多，上游河网庞大，下游尾闾狭细，各支流由北部和西部的山地流向平原，在地势最低的天津附近汇集后经海河干流东流入海（图 1）。整个流域属于温带季风气候，年内降水量分配极为不均，年际变化较大，全年大约有 75%~85% 的降水量集中在 6~9 月，多年平均降水量大约为 400 mm（图 2）。

2.2 资料来源

本文使用的月平均降水量来源于英国国家大气科学中心制作的全球高分辨率数据集 CRU（Climatic Research Unit TS v.4.08）；地面站点降水数据资料来源于气象大数据云平台“天擎”；数值模式预报降水场是从国家局下发的 MICAPS 资料获取。各模式的降水预报均是以 08:00（北京时间，下同）为起始场。由于数据获取的局限性，NGWD、

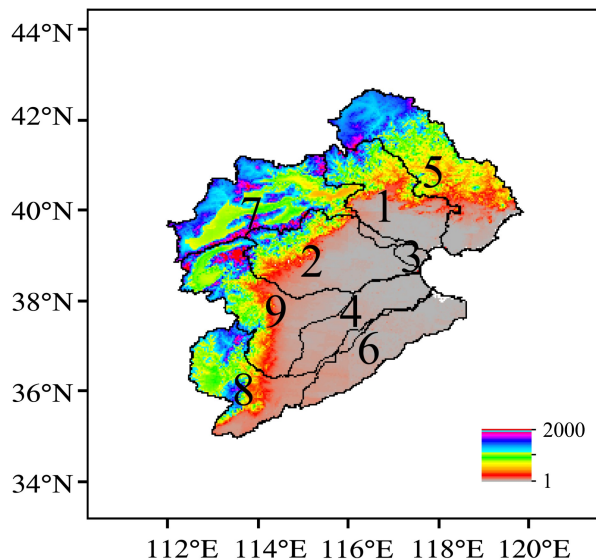


图 1 海河流域及其 9 个子流域分布（数字 1~9 分别代表北三河、大清河、海河干流、黑龙港运东、滦河、徒骇马颊河、永定河、漳卫河和子牙河等 9 个子流域）。

Fig. 1 Distribution of the Haihe River basin and its nine sub-basins (numbers 1~9 represent the North Three Rivers, Daqing River, Haihe River Mainstream, Heilonggang Yundong, Luan River, Tuhai Majia River, Yongding River, Zhangwei River, Ziya River, respectively).

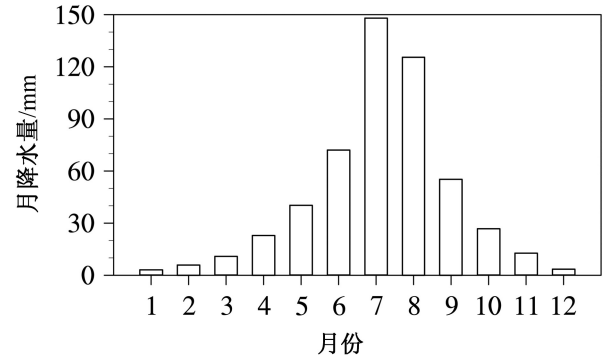


图 2 1981~2023 年海河流域月平均降水量。

Fig. 2 Monthly average precipitation in the Haihe River basin from 1981 to 2023.

ECMWF 和 LYK 主观预报选取的评估对象是 24 h、48 h 和 72 h 预报时效的 24 h 累积面雨量，而 CMA_BJ 则是 24 h 和 48 h 预报时效的 24 h 累积面雨量，评估时段是从 6 月 15 日至 9 月 15 日。

2.3 面雨量预报检验方法

本文首先采用算术平均法分别计算海河流域站点、数值模式和主观预报面雨量数据。然后，基于《全国七大江河流域面雨量监测和预报业务规定》和《高分辨率区域数值预报业务检验评估指标及算法》，采用平均绝对误差、正确率、模糊评分、TS 评分、漏报率和空报率等统计评价指标，对海河流域面雨量预报结果进行检验评估。各统计评价指标计算如下：

（1）平均绝对误差：指的是预报值与实况值的平均绝对误差，其计算公式如下：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |F_j - O_j|, \quad (1)$$

其中， n 为统计天数， F 为面雨量预报值， O 为面雨量实况值。

（2）模糊评分（FG）：参照中国气象局制定的《全国七大江河流域面雨量监测和预报业务规定》中模糊评分检验方法进行检验。当实况无雨且预报也无雨时不参与评分；当出现空报或漏报时，模糊评分为 0；当预报等级和实况等级一致时（即等级误差为 0），该等级预报评分为 100 分；当预报等级有误差时，按其误差大小给分，误差越大，分值越低。

第 i 个预报子流域第 j 级降雨预报的模糊评分 $FG(j, i)$ 的计算公式如下：

$$FG(j, i) = 60 + 40 \times \left[1 - \frac{|F_i - O_i|}{MAX(j)} \right], \quad (2)$$

其中, 第一项是有雨预报正确的基础分, 规定为 60 分; 第二项是强度 (等级) 预报的加权分。等级误差 $|F_i - O_i|$ 和该等级最大等级误差 $MAX(j)$ 。

第 i 个预报子流域模糊评分为

$$FG(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N FG(j, i), \quad (3)$$

其中, N 为降水等级数。第 j 级降水模糊评分为

$$FG(j) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T FG(j, i), \quad (4)$$

其中, T 为预报子流域。

(3) 准确率 (PC): 检验 “有”、“无” 面雨量的预报正确率, 其计算公式为

$$PC = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \times 100\%, \quad (5)$$

其中, NA 为降水预报正确的天数, NB 为空报天数, NC 为漏报天数, ND 为无降水预报正确的天数。

(4) 技巧评分 (TD)、漏报率 (MR) 和空报率 (FAR)。参考 2019 年中国气象局数值预报中心《高分辨率区域数值预报业务检验评估指标及算法》中提供的方法, 检验面雨量预报效果。TS 评分、漏报率和空报率计算公式如下:

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \times 100\%, \quad (6)$$

$$MR = \frac{NC}{NA + NC} \times 100\%, \quad (7)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \times 100\%. \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 平均绝对误差检验

图 3 给出的是 2023 年汛期 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 种数值模式与 LYK 主观预报结果对海河流域 (24~72 h) 面雨量预报的平均绝对误差。结果显示, 各预报时效的平均绝对误差均以 ECMWF 最小, CMA_BJ 次之, NGWD 和 LYK 最大。不同预报时效比较, 24 h 预报时效的平均绝对误差最低, 48 h 次之, 72 h 最高, 表明随着预报时效的延长, 3 种模式和 LYK 主观预报面雨量结果的平均绝对误差均呈增大趋势, 其中, CMA_BJ 和 NGWD 增幅较小, ECMWF 次之。因此, 从平均绝对误差检验结果看, ECMWF 和 CMA_BJ 在海河流域面雨量预报中比较具有参考意义。

汛期每个月平均绝对误差结果显示 (图 4), 除了 8 月的 NGWD, 其余的各月每个模式的预报误差随着时效的延长而增大, 即 24 h 预报时效的平均绝对误差最低, 48 h 次之, 72 h 最高。不同模式误差比较来看, 6 月各个模式的预报误差相近; CMA_BJ 模式在 7 月误差最小, ECMWF 在 8 月和 9 月预报误差最小。比较来看, 7 月的误差最大, 8 月次之, 6 月和 9 月的误差相近, 这可能主要是因为海河流域的强降水过程基本出现在 7~8 月。

3.2 准确率检验

图 5 显示的是 2023 年汛期 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 种模式与 LYK 主观预报结果对海河流域不同时效 (24~72 h) 面雨量预报的正确率检验结果。由图可知, 随预报时效延长, 面雨量预报的 PC 均呈下降趋势。ECMWF 和 LYK 下降幅度

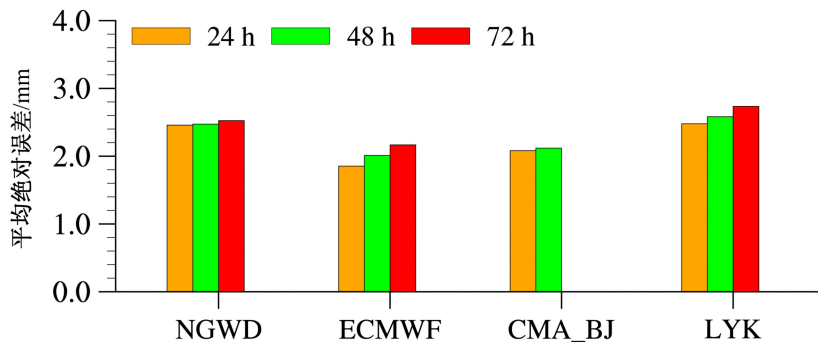


图 3 2023 年 6~9 月海河流域 24 h、48 h 和 72 h 的 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 模式预报及 LYK 主观预报面雨量的平均绝对误差。

Fig. 3 Mean absolute error of areal rainfall forecasted by NGWD (National Guidance Weather Forecast), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), CMA_BJ (China Meteorological Administration Beijing Rapid Update Cycle), and LYK (Haihe River Basin Meteorological Center) for 24, 48, and 72 h over Haihe River basin from June to September of 2023.

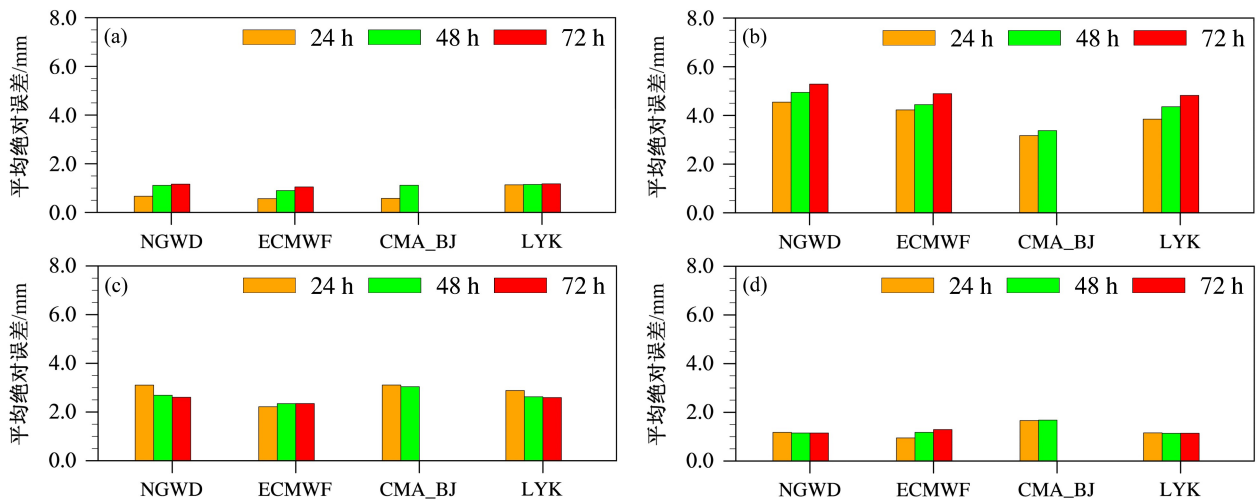


图4 2023年(a)6月、(b)7月、(c)8月、(d)9月海河流域24 h、48 h和72 h的NGWD、ECMWF、CMA_BJ模式预报及LYK主观预报面雨量的平均绝对误差。

Fig. 4 Mean absolute error of areal rainfall forecasted by NGWD, ECMWF, CMA_BJ, and LYK for 24, 48, and 72 h over Haihe River basin in (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September of 2023.

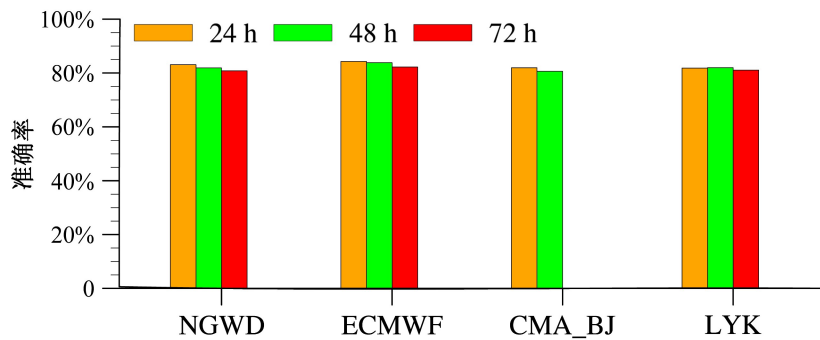


图5 同图3, 但为面雨量预报的准确率。

Fig. 5 Same as Fig.3, but for percentage correct.

较小。24 h 预报时效中, ECMWF 为最高 (84.3%), 其次为 NGWD (83.1%); 在 48 h 和 72 h 预报时效中, 均以 ECMWF 的正确率最高, 其次是 LYK。各预报时效的正确率均以 CMA_BJ 最低。可见, 对于面雨量的“有”、“无”预报, 各预报时效以 ECMWF 预报结果最具有参考价值。

从 6~9 月每个月的准确率结果可知 (图 6), 各月各个模式的准确率随着时效的延长而减小, 即 24 h 预报时效的准确率最高, 48 h 次之, 72 h 最低。比较来看, ECMWF 的准确率最高, 尤其是在 6~8 月, 24~72 h 时效的准确率均在 80% 以上 (图 6a~6c); 其次是 NGWD 和 LYK。对于 9 月, NGWD 准确率最高, LYK 第二, ECMWF 最低, 这可能主要是因为 9 月海河流域的降水过程主要以局地性为主。

3.3 模糊评分检验

进一步对 2023 年汛期 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 种模式与 LYK 主观预报结果不同时效 (24~72 h) 面雨量预报进行模糊评分检验。结果表明, 除 24 h 预报时效的 LYK 结果外, 模式以及主观预报结果的其他预报时效的模糊评分与平均绝对误差和准确率相似, 均随预报时效的延长而呈现明显下降。各预报时效的模糊评分均以 ECMWF 最高, NGWD 最低。CMA_BJ 在 24 h 预报时效次高, 在 48 h 和 72 h 预报时效, LYK 的模糊评分均为次高 (图 7)。从 FG 检验结果上看, ECMWF 最具有参考意义, 其次为 LYK, 但 CMA_BJ 在 24 h 预报时效的 FG 评分高于 LYK, 说明 CMA_BJ 在 24 h 预报时效也具有较好的参考意义。

图 8 给出了 6~9 月各个月的模糊评分结果。

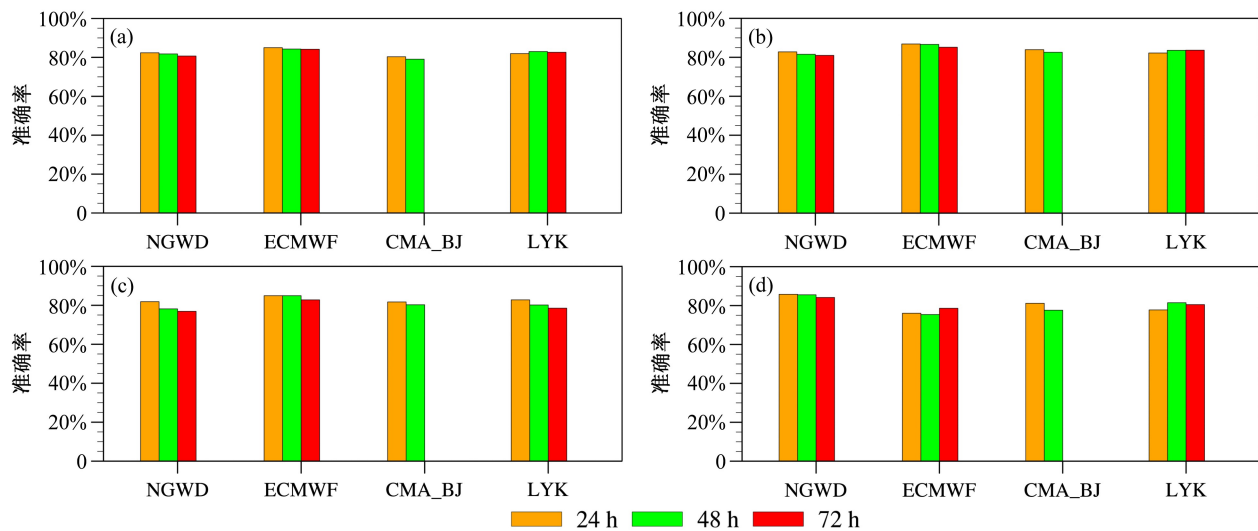


图6 同图4, 但为面雨量预报的准确率。

Fig. 6 The same as Fig. 4, but for percentage correct.

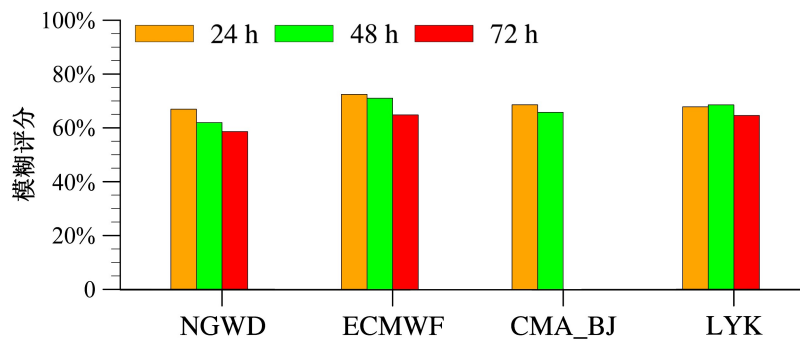


图7 同图3, 但为面雨量预报的模糊评分。

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for fuzzy grading.

由图可知, 同一月份中, 所有模式 24 h 预报时效的模糊评分最高, 48 h 次之, 72 h 最低, 即随着预报时效的延长, 模糊评分逐渐减小。不同模式结果比较来看, ECMWF 的评分相对较高, 特别是在 7 月和 8 月, 评分基本在 75% 以上; 排名第二是 LYK; 不同月份来看, 7 月和 8 月的模糊评分最高, 9 月评分第二, 6 月评分最低。所以 6~9 月整体结果表现出 ECMWF 的评分最高, LYK 次之 (图 7)。

3.4 TS 评分以及空报率和漏报率检验

图 9 给出的是 2023 年汛期 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 种模式与 LYK 主观预报结果对海河流域不同时效 (24~72 h) 面雨量预报的 TS 评分、空报率和漏报率, 从图中可看出: 随面雨量预报时效的延长, 面雨量预报的 TS 均下降, 空报率和漏报率均增大。各预报时效的 TS 评分, 总体上以 LYK 和 ECMWF 较好 (图 9a)。NGWD 在 24 h

时效的 TS 评分高于 CMA_BJ, 但在 48 h 预报时效以 NGWD 表现较优 (图 4a)。从空报率结果来看, NGWD 的空报率最低, 其次是 CMA_BJ, ECMWF 和 LYK 的空报率相对较高 (图 9b)。但从漏报率来看, ECMWF 和 LYK 的漏报率最低, 其次是 CMA_BJ, NGWD 的漏报率是最高的 (图 9c)。分月来看, 7 月和 8 月的 TS 评分、空报率最高, 9 月次之, 6 月最低; 而对于漏报率, 6 月、7 月、8 月和 9 月的漏报率均在 5% 以下。不同模式比较, ECMWF 的 TS 评分最高, LYK 次之, NGWD 和 CMA_BJ 最低。

3.5 检验结果综合评估

图 10 是 2023 年汛期海河流域 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 个模式和 LYK 主观预报结果 24~72 h 面雨量预报的各项检验结果的平均值。结果表明, ECMWF 的平均绝对误差、准确率和模糊

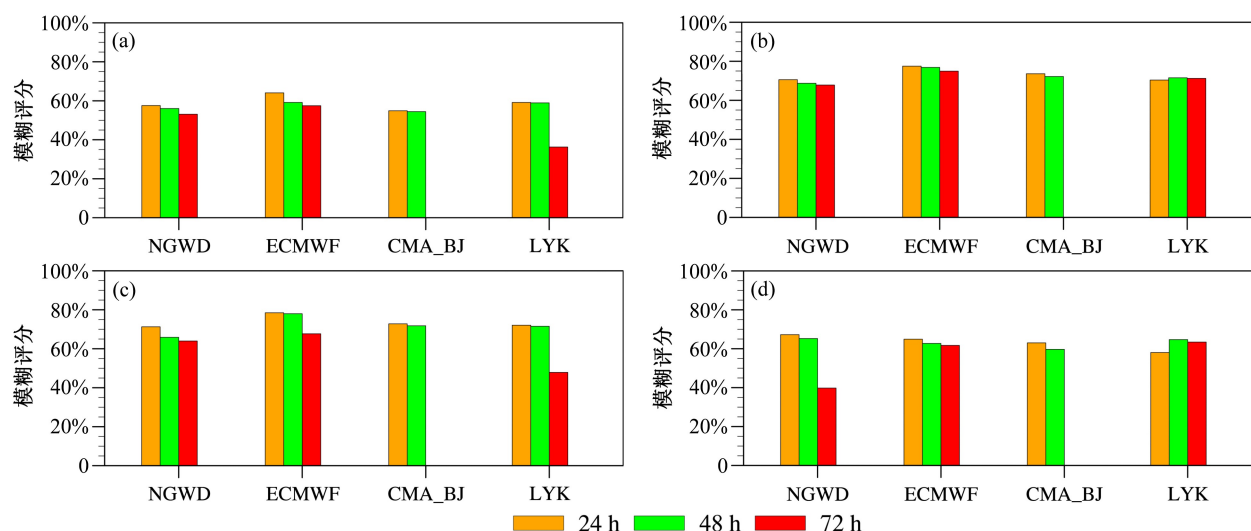


图8 同图4, 但为面雨量预报的模糊评分。

Fig. 8 The same as Fig.4, but for fuzzy grading.

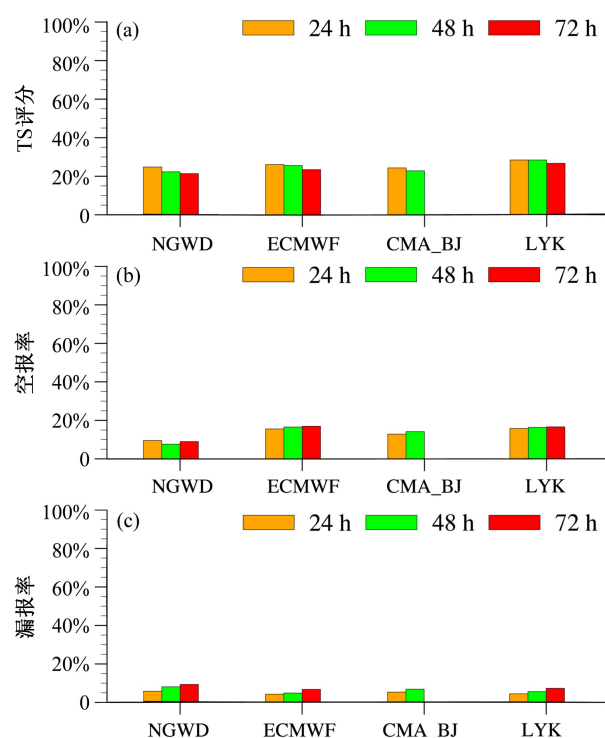


图9 2023年6~9月海河流域24 h、48 h和72 h的NGWD、ECMWF、CMA_BJ模式及LYK主观面雨量预报的(a) TS评分、(b)空报率和(c)漏报率。

Fig. 9 (a) Treat score (TS), (b) falsing ratio, and (c) missing ratio of areal rainfall forecasted by NGWD, ECMWF, CMA_BJ, and LYK for 24, 48 and, 72 h over Haihe River basin from June to September of 2023.

评分检验结果均为最优, TS评分和漏报率次优。NGWD虽然空报率较低(空报较少), 准确率排名第二, 但其余指标均较低。CMA_BJ的漏报率

排名第一, 平均绝对误差、模糊评分和空报率排名第二, TS评分和准确率排名第四; LYK的主观预报虽然平均绝对误差和空报率排名较为靠后, 但是其他指标均较为优秀, 尤其是TS评分排名第一。从检验结果的平均值分析可知, 面雨量预报的参考价值可以排序为ECMWF、LYK、NGWD和CMA_BJ。总体上看, ECMWF和LYK的面雨量预报效果优于NGWD和CMA_BJ模式。

3.6 典型降水过程面雨量预报检验评估

为了比较上述各模式对强降水过程的预报能力, 以24 h预报时效为例, 选取4次今年汛期流域强降水过程进行检验评估。4次强降水过程如下: (1) 2023年7月10~13日, 受高空槽和切变线影响, 流域大部分地区出现小到中雨, 大雨以上的降水主要位于流域的北部和西南部, 整个流域有2383个站和981个站分别达到大雨和暴雨级别以上, 整个流域平均有33.59 mm降水。(2) 2023年7月20~22日, 受高空槽影响, 流域大部分地区有中到大雨, 流域的中部和西南部出现暴雨。25 mm以上降水的气象站总共有2196个站, 其中大约有40%的站点达到暴雨以上级别。区域平均来看, 整个流域降水量为31.04 mm。(3) 2023年7月28日至8月2日: 受台风“杜苏芮”减弱低压北上影响, 整个流域出现明显的降雨过程, 降水持续时间长达3天以上, 过程雨量较大, 整个流域平均雨量高达173.3 mm, 引发了流域性特大洪水。(4) 2023年8月10~12日: 受高空槽影响, 流

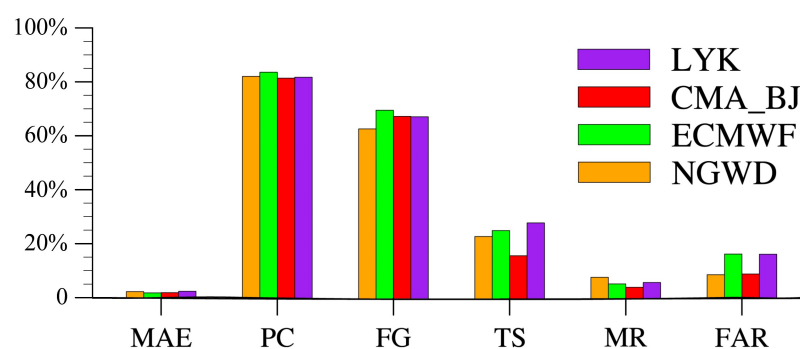


图 10 2023 年 6~9 月海河流域 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 模式及 LYK 主观面雨量预报的综合检验结果。

Fig. 10 Comprehensive evaluation results of areal rainfall forecast by NGWD, ECMWF, CMA_BJ, and LYK for different periods over Haihe River basin from June to September of 2023.

域自西向东出现小到中雨，局部大到暴雨，区域平均雨量为 27.91 mm。大雨以上的降水主要出现在流域的中部和东部，达到暴雨以上的气象站总共有 790 个站。比较来看，过程 3 的降水是最强的，过程 1、过程 2 和过程 4 是中等强度的降水。

平均绝对误差检验统计指标结果来看，各个模式和主观预报对 3 次中等强度降水的面雨量预报误差小于强降水过程。对比来看，ECMWF 面雨量预报误差在 3 次中等强度降水最小；其次是 LYK 和 CMA_BJ。在强降水过程中，区域模式的误差小于全球模式，CMA_BJ 的预报误差是最小的，其次 LYK，ECMWF 和 NGWD 误差是最大的，达 10 mm 以上。模糊和 TS 评分结果可以看出，NGWD、ECMWF、CMA_BJ 和 LYK 对前三次过程的预报质量高于第四次降水过程。在模糊评分结果中，ECMWF 对强降水的预报评分低于 CMA_CJ，说明 ECMWF 预报的面雨量等级误差大于 CMA_CJ，而在 TS 评分结果中，ECMWF 的评分最高，表明 ECMWF 预报正确的单元数较多。从表中还可以看出，LYK 的主观预报质量还是较为优秀的，尤其是在强降水过程中，平均绝对误差排名第二，高于 CMA_CJ；模糊评分超过了所有的数值模式，

排名第一（表 1）。

综上所述，4 次流域性降雨过程的检验结果发现，ECMWF、LYK 及 NGWD 对于 24 h 预报时效的中等强度降水过程预报质量较好；而对于强降水过程预报，ECMWF 模式预报等级误差则偏大，区域模式对于强降水的预报表现较优。

4 结论与讨论

本文检验评估了 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 3 个模式和 LYK 主观预报结果对 2023 年汛期（6~9 月）海河流域的预报效果，并选取 4 次强降水过程进行典型个例检验评估。结果表明，随预报时效的延长，面雨量预报效果表现为逐渐下降。具体表现为平均绝对误差逐渐增大，准确率、模糊评分和 TS 评分逐渐降低，而空报率和漏报率逐渐上升。各预报时效相比较，ECMWF 在各个预报时效上均表现较优，但是从 TS 评分结果来看，LYK 在 24 h 预报也具有较好的参考意义，而且 LYK 在 42 h 和 72 h 预报时效的准确率评分和模糊评分仅次于 ECMWF。因此，综合检验评估结果来看，ECMWF 的预报效果总体上优于其他模式；其次

表 1 NGWD、ECMWF、CMA_BJ 模式及 LYK 主观面雨量预报对海河流域 2023 年 6~9 月 4 次强降水过程面雨量预报检验
Table 1 Verification of areal rainfall forecast by NGWD, ECMWF, CMA_BJ, and LYK for four precipitation events over Haihe River basin from June to September of 2023

	平均绝对误差				模糊评分				TS评分			
	NGWD	ECMWF	CMA_BJ	LYK	NGWD	ECMWF	CMA_BJ	LYK	NGWD	ECMWF	CMA_BJ	LYK
7月10~13日	5.42	4.55	5.43	5.39	85.73	86.46	85.67	86.61	0.66	0.56	0.64	0.66
7月20~22日	6.76	3.99	6.09	3.86	86.73	84.28	89.53	81.03	0.66	0.67	0.64	0.64
7月28至8月2日	12.15	10.53	7.61	9.11	88.02	90.06	91.42	91.57	0.68	0.69	0.54	0.63
8月10~12日	9.19	3.77	6.51	8.69	79.2	81.34	76.69	77.50	0.48	0.48	0.46	0.48

是 LYK 的主观预报, 尤其是 TS 评分, 排名第一; NGWD 的空报率和 CMA_BJ 的漏报率虽然排名第一, 但是其他各项检验指标结果均与实况偏差较大。

进一步分析各模式对典型降水过程面雨量预报结果表明, ECMWF、LYK 及 NGWD 对于 24 h 预报时效的强降水过程预报质量较好。但是在强降水过程的预报中, CMA_BJ 的平均绝对误差最小, 模糊评分均高于其他模式, 表明区域模式在强降水预报过程中具有更大的优势, 预报等级误差更小, 量级更接近于实况。

总体而言, ECMWF 模式对海河流域汛期面雨量预报的效果最好, 其次是 LYK 的主观预报。但是由于数据资料的限制, 本文仅利用 3 个数值模式对 2023 年 6~9 月海河流域的面雨量预报进行检验评估。在未来, 还可以利用更多数值模式和更长时段数据资料对海河流域面雨量进行检验评估。同时, 本文主要考虑整个海河流域地区的面雨量预报检验, 后期还可以根据业务应用和流域防汛抗旱服务的需求, 对海河流域进行分区研究, 更细致地揭示数值模式和主观预报在不同子流域的预报效果。

参考文献 (References)

- 包红军, 林建, 曹爽, 等. 2020. 基于流域地貌的中小河流致洪动态临界面雨量阈值研究 [J]. 气象, 46(11): 1495–1507. Bao Hongjun, Lin Jian, Cao Shuang, et al. 2020. Topography-based dynamic critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(11): 1495–1507. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.010
- Ding Z M, Huang G, Liu F, et al. 2021. Responses of global monsoon and seasonal cycle of precipitation to precession and obliquity forcing [J]. Climate Dyn., 56(11): 3733–3747. doi:10.1007/s00382-021-05663-6
- 付晓辉, 肖稳安, 龙利民, 等. 2006. 数值预报产品在长江干流段面雨量概率预报中的释用 [J]. 长江流域资源与环境, 15(4): 537–540. Fu Xiaohui, Xiao Wenan, Long Liming, et al. 2006. A NWPS' application for area-rainfall probability prediction for the main valley of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 15(4): 537–540. doi:10.3969/j.issn.1004-8227.2006.04.024
- 高琦, 金琪, 王仁乔, 等. 2011. 基于面雨量预报的长江上游洪水分级预估及其应用 [J]. 暴雨灾害, 30(4): 370–374. Gao Qi, Jin Qi, Wang Renqiao, et al. 2011. A flood classified projection model in the upper reaches of the Yangtze River and its applications based on area rainfall forecast [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 30(4): 370–374. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2011.04.014
- 郝莹, 王皓, 刘杰, 等. 2019. 多模式多分辨率面雨量预报在淮河流域的性能评估 [J]. 气象研究与应用, 40(1): 24–28. Hao Ying, Wang Hao, Liu Jie, et al. 2019. Performance evaluation of multi-model and multi-resolution area rainfall forecast in Huaihe River basin [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 40(1): 24–28. doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.006
- 孔祥波, 夏晓玲, 醋院科, 等. 2021. EC 模式对北盘江流域降水的预报能力检验 [J]. 人民珠江, 42(5): 9–19. Kong Xiangbo, Xia Xiaoling, Cu Yuanke, et al. 2021. Verification of EC model's effect to forecast precipitation in Beipan River basin [J]. Pearl River (in Chinese), 42(5): 9–19. doi:10.3969/j.issn.1001-9235.2021.05.002
- 李维京, 刘景鹏, 任宏利, 等. 2018. 中国南方夏季降水的年代际变率主模态特征及机理研究 [J]. 大气科学, 42(4): 859–876. Li Weijing, Liu Jingpeng, Ren Hongli, et al. 2018. Characteristics and corresponding mechanisms of the leading modes of interdecadal variability of summer rainfall in southern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 859–876. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17283
- 刘静, 叶金印, 张晓红, 等. 2014. 淮河流域汛期面雨量多模式预报检验评估 [J]. 暴雨灾害, 33(1): 58–64. Liu Jing, Ye Jinyin, Zhang Xiaohong, et al. 2014. The performance evaluation of the multi-model forecasting of areal rainfall for Huaihe River basin during flood season [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(1): 58–64. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.01.008
- 刘明站, 任宏利, 张文君, 等. 2018. 超强厄尔尼诺事件对中国东部春夏季极端降水频率的影响 [J]. 气象学报, 76(4): 539–553. Liu Minghong, Ren Hongli, Zhang Wenjun, et al. 2018. Influence of super El Niño events on the frequency of spring and summer extreme precipitation over eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(4): 539–553. doi:10.11676/qxxb2018.021
- 罗静, 叶金印, 王喜, 等. 2019. 基于 ECMWF 集合预报的淮河流域面雨量预报性能评估 [J]. 中低纬山地气象, 43(4): 1–9. Luo Jing, Ye Jinyin, Wang Xi, et al. 2019. Performance evaluation of areal precipitation forecasting for Huaihe River basin based on ECMWF ensemble system [J]. Journal of Mountain Meteorology (in Chinese), 43(4): 1–9. doi:10.3969/j.issn.1003-6598.2019.04.001
- 吕劲文, 申华羽, 涂小萍, 等. 2023. ECMWF 细网格模式降水在浙江省行政区域面雨量预报中的释用 [J]. 气象与环境科学, 46(5): 75–85. Lü Jinwen, Shen Huayu, Tu Xiaoping, et al. 2023. Verification and interpretation of ECMWF fine-grid model in areal precipitation forecast in Zhejiang Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 46(5): 75–85. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2023.05.010
- 庞玥, 王欢, 夏繁, 等. 2019. ECMWF 集合预报统计量产品在重庆降水预报中的检验与分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 13(3): 1–7. Pang Yue, Wang Huan, Xia Fan, et al. 2019. Verification and analysis of ECMWF ensemble statistic products in Chongqing precipitation forecast [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 13(3): 1–7. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.03.001
- 彭涛, 殷志远, 李兰. 2014. 水文模型在计算中小流域致汛临界面雨量中的应用 [J]. 气象, 40(11): 1354–1362. Peng Tao, Yin Zhiyuan, Li Lan. 2014. Application of hydrological model to calculating flood critical area rainfall in small and medium river valleys [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(11): 1354–1362. doi:10.3969/j.issn.1001-9235.2014.11.002

- 7519/j.issn.1000-0526.2014.11.008
- 邱辉, 郭云谦, 李帅, 等. 2020. ECMWF 集合降水预报在长江流域应用性能评估 [J]. 人民长江, 51(2): 71–76. Qiu Hui, Guo Yunqian, Li Shuai, et al. 2020. Application performance assessment on ECMWF ensemble prediction system in Yangtze River basin [J]. Yangtze River (in Chinese), 51(2): 71–76. doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.02.013
- 屠妮妮, 何光碧, 衡志炜, 等. 2020. 三种数值模式对四川省汛期降水预报性能的检验 [J]. 高原山地气象研究, 40(4): 1–9. Tu Nini, He Guangbi, Heng Zhiwei et al. 2020. The precipitation verification of three models during rainy season in Sichuan Province [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 40(4): 1–9. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2020.04.001
- 吴国芳, 张世炜, 何立群. 2023. 面雨量的不确定性对洪水期间径流模拟的影响 [J]. 水利水电技术 (中英文), 54(S2): 141–151. Wu Guofang, Zhang Shiwei, He Liqun. 2023. The influence of the uncertainty of area rainfall on the runoff simulation during flood [J]. Water Resources and Hydropower Engineering (in Chinese), 54(S2): 141–151. doi:10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.024
- 吴娟, 林荷娟, 刘敏, 等. 2017. 太湖流域汛期面雨量多模式预报检验评估 [J]. 水利水电快报, 38(10): 22–24, 27. Wu Juan, Lin Hejuan, Liu Min, et al. 2017. Verification and evaluation of multi model forecast of area rainfall in flood season in the Taihu Lake basin [J]. Express Water Resources & Hydropower Information (in Chinese), 38(10): 22–24, 27. doi:10.15974/j.cnki.slsdkb.2017.10.007
- 杨寅, 林建, 包红军. 2022. 基于集合降水预报的长江流域面雨量预报与应用 [J]. 暴雨灾害, 41(5): 571–579. Yang Yan, Lin Jian, Bao Hongjun. 2022. Prediction and application of area rainfall in the Yangtze River basin based on ensemble precipitation forecasting [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 41(5): 571–579. doi:10.12406/byzh.2022-029
- 周国兵. 2005. 三峡库区流域面雨量预报模糊检验 [J]. 气象科技, 33(2): 120–123. Zhou Guobin. 2005. Fuzzy assessment of area rainfall forecast in three gorges reservoir valley [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33(2): 120–123. doi:10.19517/j.1671-6345.2005.02.005
- 朱红芳, 王东勇, 朱鹏飞, 等. 2007. GRAPES 模式在淮河流域面雨量预报中的应用 [J]. 气象, 33(3): 76–82. Zhu Hongfang, Wang Dongyong, Zhu Penfei, et al. 2007. Application of GRAPES model to area-rainfall forecast in the Huaihe River basin [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(3): 76–82. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.03.011
- 朱占云, 潘娅英, 骆月珍, 等. 2017. 浙江省水库流域面雨量的多模式预报效果分析与检验 [J]. 气象与环境科学, 40(3): 93–100. Zhu Zhanyun, Pan Yaying, Luo Yuezhen, et al. 2017. Analysis and test on multi-model prediction of reservoir basin area rainfall in Zhejiang Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 40(3): 93–100. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.03.015
- 庄园煌, 陈宏, 余文韬, 等. 2024. 多源融合降水实况分析产品在海河流域的适用性评估 [J]. 气候与环境研究, 29(1): 25–35. Zhuang Yuanhuang, Chen Hong, Yu Wentao, et al. 2024. Assessing the applicability of national multisource precipitation analysis product in the Haihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 29(1): 25–35. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22140
- 庄园煌, 张井勇, 梁健. 2021. 1.5°C 与 2°C 温升目标下 “一带一路” 主要陆域气温和降水变化的 CMIP6 多模式预估 [J]. 气候与环境研究, 26(4): 374–390. Zhuang Yuanhuang, Zhang Jingyong, Liang Jian. 2021. Projected temperature and precipitation changes over major land regions of the Belt and Road Initiative under the 1.5°C and 2°C climate targets by the CMIP6 multi-model ensemble [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26(4): 374–390. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20153