

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.004

基于多源融合降水的 WRF-Hydro 模型在中小河流径流模拟的适用性评估

李振鑫¹, 姚成^{1,2}, 杨丰源³, 侯爱中⁴, 孙元元⁵, 李京兵⁶, 龚俊超¹

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室; 3. 河北省水文勘测研究中心;
4. 水利部信息中心(水文水资源监测预报中心); 5. 湖北长江中星科技有限公司; 6. 安徽省水文局)

摘要: 为了满足水文模型对高精度降水数据的需要,以湿润的屯溪流域与半湿润的紫荆关流域为研究区域,构建了基于外部漂移克里金法的多源降水融合算法,融合雨量站实测数据与 IMERG 卫星降水数据,生成高精度、高时空分辨率的融合降水数据,并以该融合降水数据驱动 WRF-Hydro 水文模型,对研究区域进行径流模拟,评估其在中小河流洪水预报中的适用性。结果表明:以雨量站实测数据为基准,卫星降水数据在紫荆关流域存在严重低估降水强度现象,融合降水数据的各评价指标优于原始 IMERG 卫星降水数据;融合降水数据驱动 WRF-Hydro 模型比 IMERG 卫星降水数据能更好地模拟洪水过程,且模型在湿润流域的适用性强于半湿润流域。

关键词: 多源融合降水; 卫星降水; WRF-Hydro 模型; 中小河流; 径流模拟; 紫荆关流域; 屯溪流域

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2026)05-0029-10

Applicability evaluation of WRF-Hydro model based on multi-source merged precipitation for runoff simulation in small and medium-sized rivers

Li Zhenxin¹, Yao Cheng^{1,2}, Yang Fengyuan³, Hou Aizhong⁴, Sun Yuanyuan⁵, Li Jingbing⁶, Gong Junchao¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

2. Key Laboratory of Hydro-Meteorology China Meteorological Administration;

3. Hydrological Survey and Research Center of Hebei Province;

4. Information Center, Ministry of Water Resources (Hydrology Monitor and Forecast Center);

5. Hubei Yangtze River Zhongxing Technology Co., Ltd.; 6. Anhui Provincial Bureau of Hydrology)

Abstract: To meet the needs of hydrological models for high-precision precipitation data, with the humid Tunxi Basin and the semi-humid Zijingguan Basin as the study areas, a multi-source precipitation merging algorithm based on external drift kriging was constructed to merge the measured precipitation data at stations and the IMERG satellite precipitation data, generating merged precipitation data with high precision and high spatiotemporal resolution. The WRF-Hydro hydrological model was driven by the merged precipitation data to conduct runoff simulations in the study areas, and its applicability in flood forecasting for small and medium-sized rivers was evaluated. The results show that taking the measured precipitation data at stations as the benchmark, the satellite precipitation data exhibits a serious underestimation of precipitation intensity in the Zijingguan Basin, and the evaluation indicators of the merged precipitation data are better than those of the original IMERG satellite precipitation data. Furthermore, the WRF-Hydro model driven by the merged precipitation data can better simulate the flood process than that driven by the IMERG satellite precipitation data, and the model shows stronger applicability in the humid basin than in the semi-humid basin.

Key words: multi-source merged precipitation; satellite precipitation; WRF-Hydro model; small and medium-sized river; runoff simulation; the Zijingguan Basin; the Tunxi Basin

随着气候变暖加剧,局地极端天气事件频发,中小河流洪水灾害已成为我国洪灾的主要类型,其预报工作亟待重点攻关^[1]。中小河流下垫面空间异质性强、产汇流时间短,其独特的水文响应特征使得洪水预报难度大,精度往往难以满足实际需求^[2]。水文模型是进行洪水预报的重要工具,很大程度上决定了洪水预

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3211400);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240203007);水利部重大科技项目(SKS-2022136);河北省省级水利科技计划项目(2025-18)

作者简介: 李振鑫(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:lxz190322@163.com

通信作者: 姚成(1982—),男,教授,博士,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn

报精度,分布式水文模型能够考虑水文参数过程和流域下垫面的空间异质性,适用于中小河流洪水预报^[3]。由美国国家大气研究中心(NCAR)研发的 WRF-Hydro 模型,是新一代分布式水文模型,径流模拟精度较高,在中小河流域预报中具有潜在优势^[4]。

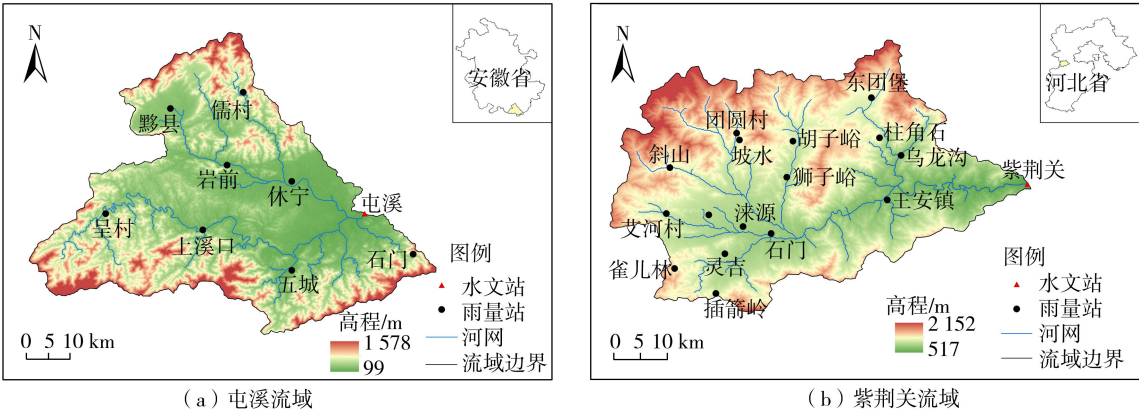
降水是水文模型的最重要输入变量,其精度与时效性间接决定了径流模拟结果的精度与时效性^[5]。获取降水数据的主要途径包括雨量站观测、气象雷达反演和卫星遥感反演^[6]。雨量站实测数据精度高,但空间分布稀疏且不均匀^[7];气象雷达与卫星遥感反演数据时空连续性强,但误差较大^[8-9]。降水融合技术通过多源协同,整合不同来源降水数据的优势,可生成对真实地表降水场更为准确、空间连续的估计^[10],如随机森林法^[11]、外部漂移克里金(Kriging with external drift, KED)法^[12]、地理加权回归法^[13]等,其中 KED 法通过严谨的空间相关性建模,充分利用了多源数据的空间分布特征,可显著提升降水估计的精度与可靠性^[14]。Jewell 等^[15]采用多种插值方案融合雷达降水与雨量站实测降水,发现 KED 法在所有测试方案中精度最高、鲁棒性最强。因此,降水融合技术被广泛应用于构建高精度降水融合产品,以驱动水文模型,提升径流模拟精度。闫鑫等^[16]采用随机森林降尺度与协同克里金融合方法,融合 GPM 卫星降水数据与雨量站实测数据并驱动水文模型,发现该融合产品精度显著提升,进一步提升了水文模型的径流模拟效果。晁丽君等^[17]将 CMORPH 卫星降水数据与雨量站实测数据融合,并驱动 WRF-Hydro 模型对子午河流域进行径流模拟,发现融合降水在中小河流洪水模拟中明显优于原始卫星数据。但现有研究大多针对特定区域进行多源融合降水评估,由于卫星、雷达反演降水数据在不同气候区误差特征不同,融合降水数据在不同气候类型的中小河流的径流模拟中的适用性亟待验证和评估。

本文选取屯溪流域与紫荆关流域为研究区域,以 IMERG(Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)卫星降水数据与雨量站观测数据为数据源,采用 KED 法生成多源融合降水,评估基于多源融合降水数据的 WRF-Hydro 模型在湿润流域与半湿润流域的中小河流径流模拟效果,以期和数据融合技术与 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的应用提供科学依据与参考建议。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

屯溪流域位于新安江上游,经纬度范围为 29.5°N~30.0°N、117.6°E~118.5°E,流域面积为 2 670 km²。屯溪流域地形周高中低,呈西高东低走势,极易形成洪水,且河道纵比降大,洪水陡涨陡落。屯溪流域属于北亚热带湿润性季风气候,年平均气温为 15~17℃,多年平均降水量约为 1 600 mm,是典型的湿润中小流域。紫荆关流域位于大清河流域北支拒马河上游,经纬度范围为 39.2°N~39.7°N、114.5°E~115.2°E,流域面积为 1 760 km²,主河道长 81.5 km,河道纵坡 5.5‰,多山区,洪水主要产自汛期暴雨,暴涨暴落,断面冲淤变化较大,水位流量关系不稳定。紫荆关流域属于中温带半湿润性季风气候,年平均气温约为 13.8℃,多年平均降水量约 682 mm,是半湿润半干旱的中小流域。研究区域内雨量站和水文站分布如图 1 所示。



(a) 屯溪流域

(b) 紫荆关流域

图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study areas

1.2 研究数据

IMERG 数据是全球降水测量计划 GPM 的最新一代多卫星集成降水数据产品,现已更新至 V07B 版本^[18-19]。IMERG 数据产品空间分辨率为 0.1°,最小时间分辨率为 0.5 h,空间覆盖全球。根据数据校准处理流程与发布时间分类,IMERG 数据可分为近实时产品 IMERG-Early、IMERG-Late 以及后处理产品 IMERG-Final。IMERG-Early 在观测后 4 h 发布,IMERG-Late 在观测后 14 h 发布,两者都是未经任何地面数据校正的纯卫星近实时降水产品;IMERG-Final 在观测后 4 月发布,经月尺度地面观测数据校正,是卫星-雨量计融合降水产品^[20]。通常来说,IMERG-Final 产品精度相对最优,IMERG-Late 产品次之,IMERG-Early 产品相对最差。综合考虑精度、时效性与研究内容,本文采用 IMERG-Late 产品作为卫星数据源。

WRF-Hydro 模型主要输入数据为地理静态数据与气象强迫数据。地理静态数据主要有地形数据、土地利用、土壤类型、植被类型、叶面积指数等,地形数据来源于基于航天飞机雷达的多尺度水文数据和地图 (HydroSHEDS),由 WRF-Hydro ArcGIS Pre-processor 前处理工具处理生成,主要包括高程、河网、流向等数据;其余地理静态数据来源于 WRF (weather research and forecasting model) 模式前处理系统 WPS (WRF preprocessing system) 的地理静态数据库,由 WPS 前处理系统生成。气象强迫数据主要包括入射长短波辐射、比湿、气温、地表气压、近地表风速、降水,其中降水数据采用 IMERG 卫星降水与雨量站实测降水融合生成的融合降水数据,时空分辨率为 1 h、1 km;其余气象强迫数据由 GLDAS (global land data assimilation system) 数据在空间上双线性插值、时间上线性插值得到,最终形成时空分辨率为 1 h、1 km 的气象强迫数据。研究涉及的观测资料为屯溪流域与紫荆关流域的实测降雨与出口断面的实测流量,选自水文年鉴。

2 研究方法

2.1 WRF-Hydro 模型

WRF-Hydro 模型是由美国国家大气研究中心研发,最初是用以改进 WRF 模型的陆地水文过程描述,促进陆地水文模式与大气模式的耦合^[21]。随着模型发展,WRF-Hydro 模型已经成为具有物理基础、高时空分辨率、可以与大气模式耦合或离线运行的分布式水文模型^[22]。WRF-Hydro 模型主要包括陆面模式和汇流模块,汇流模块又分壤中流模块、坡面流模块、地下水模块、河道水库模块^[23-24]。WRF-Hydro 模型首先通过陆面模式计算能量(感热通量、潜热通量、净辐射)与水量(冠层截留、下渗、超渗)的垂直通量和土壤温湿度,将计算结果降尺度至汇流模块,汇流模块先计算侧向壤中流,再计算地表径流、地下径流,得到汇流网格的地表水头、地下水头与土壤湿度,将结果返回陆地表面模型进行下一时刻的计算^[25]。WRF-Hydro 模型的物理过程有多种方案配置,本文的陆面模式为 Noah-MP (noah multi-parameterization) 模式,河道汇流采用扩散波,地下径流采用概念水箱模型。模型的陆面模式网格分辨率设置为 1 km,计算时间步长为 60 s,汇流模块网格分辨率设置为 250 m,计算时间步长为 15 s,模型输入输出时间步长为 1 h。

2.2 融合方法

KED 法是一种地质统计学方法,是广义克里金法的一种特例^[26]。该方法将一个或多个空间连续的、与目标变量空间趋势高度相关的协变量作为背景信息对目标变量进行插值。在通过 KED 法进行卫星降水、降水融合时,卫星降水是唯一的协变量,站点实测降水为目标变量。

未知点 x_0 处的融合降水值计算如下:

$$P_{m,x_0} = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} P_{g,x_{\alpha}} \tag{1}$$

式中: P_{m,x_0} 为 x_0 处的融合降水值; w_{α} 为雨量站 α 对应的克里金权重; $P_{g,x_{\alpha}}$ 为雨量站 α 的实测降水值; x_{α} 为雨量站 α 的位置坐标; n 为雨量站数量。

由式(1)可知,KED 融合的关键是求取雨量站的克里金权重。克里金权重由 3 个约束确定:

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1 \tag{2}$$

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} P_{s,x_{\alpha}} = P_{s,x_0} \tag{3}$$

$$\sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} \gamma_{x_{\alpha}-x_{\beta}} + \mu_1 + \mu_2 P_{s,x_{\alpha}} = \gamma_{x_{\alpha}-x_0} \quad (\alpha = 1, 2, \cdots, n) \tag{4}$$

式中: P_{s,x_α} 为雨量站 α 位置的卫星降水值; P_{s,x_0} 为未知点 x_0 处的卫星降水值; $\gamma_{x_\alpha-x_\beta}$ 为雨量站 α 位置与雨量站 β 位置 x_β 之间的半方差; $\gamma_{x_\alpha-x_0}$ 为位置 x_α 与 x_0 之间的半方差; μ_1, μ_2 为拉格朗日乘子。

由于 IMERG 卫星数据时间分辨率为 0.5 h,空间分辨率为 0.1°,与模型气象强迫数据时空分辨率不匹配,因此先将 0.5 h 的 IMERG 原始卫星数据累加到 1 h,通过双线性插值降尺度至模型网格,得到时空分辨率为 1 h、1 km 的降尺度 IMERG 卫星数据。将降尺度卫星数据作为空间协变量,结合实测降水目标变量,应用 KED 法进行多源数据融合,最终生成时空分辨率为 1 h、1 km 的高精度融合降水产品。

2.3 模拟方案

鉴于 WRF-Hydro 模型所需数据量大、运行时间长,考虑计算成本问题,本文在屯溪流域选取 2016—2017 年作为率定期,2019—2020 年作为验证期,其中 2018 年部分雨量站资料缺失,故舍去;对于紫荆关流域,受限于雨洪资料较少,选取 2012—2023 年作为率定期,2024 年作为验证期。率定期与验证期划分大致按照 70%率定期、30%验证期划分,其中屯溪流域由于 2018 年部分资料缺失,以 2018 年为界划分率定期与验证期。选取的洪水事件涵盖多种量级(表 1),包括屯溪 2020 年洪水和紫荆关“23·7”大洪水,具有合理性与代表性。先基于各洪水场次内的站点实测降水数据,验证卫星降水数据与融合降水数据的精度;然后分别以卫星降水数据与融合降水数据驱动 WRF-Hydro 模型,对率定期各场次洪水进行径流模拟,并以水文站实测流量为基准,独立进行模型参数率定,获得与各降水数据相适应的优选参数集;最后分别以卫星降水数据与融合降水数据及相应的优选参数集驱动水文模型,对验证期各洪水场次进行径流模拟,以实测流量评估两种降水数据的径流模拟。

表 1 主要洪水事件统计
Table 1 Statistics of major flood events

流域	洪水事件	开始时间	结束时间	洪峰流量/(m ³ /s)	洪水量级	次降水量/mm
屯溪	20160618	2016-06-18T09:00	2016-06-25T08:00	4 280	中	246.52
	20160702	2016-07-02T09:00	2016-07-10T08:00	1 980	小	152.08
	20160715	2016-07-15T09:00	2016-07-20T08:00	1 220	小	86.91
	20170611	2017-06-11T09:00	2017-06-17T08:00	1 730	小	150.00
	20170623	2017-06-23T09:00	2017-06-29T08:00	4 210	中	217.50
	20190618	2019-06-18T09:00	2019-06-26T08:00	2 960	小	217.37
	20190702	2019-07-02T09:00	2019-07-09T08:00	1 900	小	160.45
	20190712	2019-07-12T09:00	2019-07-16T08:00	4 270	中	181.60
	20200618	2020-06-18T09:00	2020-06-24T08:00	2 010	小	201.49
	20200702	2020-07-02T09:00	2020-07-11T08:00	5 040	中	523.42
紫荆关	20120720	2012-07-20T09:00	2012-07-26T08:00	2 130	特大	171.37
	20200717	2020-07-17T09:00	2020-07-23T08:00	161	小	79.57
	20230730	2023-07-30T09:00	2023-08-03T08:00	1 980	大	328.57
	20240825	2024-08-25T09:00	2024-08-30T08:00	330	中	102.20

2.4 评价指标

采用相关系数(R)、相对偏差(RB)、均方根误差($RMSE$)3 个指标从不同维度定量评估融合降水数据的精度,其中 R 表征融合降水数据与站点实测降水数据的一致性, RB 表征融合降水数据相对于站点实测降水数据的总体偏差程度, $RMSE$ 表征融合降水数据与站点实测降水数据之间的误差。

采用洪峰相对误差(E_p)、洪量相对误差(E_Q)、纳什效率系数(NSE)、峰现时间误差(ET)4 个指标评估径流模拟效果^[27]。当某场洪水模拟结果的洪峰相对误差小于 20%时,则洪峰模拟合格;洪量相对误差小于 20%时,则洪量模拟合格;峰现时间误差小于 3 h 时,则峰现时间模拟合格^[28]。当某场洪水模拟结果的 NSE 大于 0.50 时,则认为模拟洪水过程的拟合效果是可接受的; NSE 大于 0.70 时,则认为模拟洪水过程拟合效果较好。一次径流模拟的洪峰、洪量、峰现时间均模拟合格,则为合格模拟。合格模拟次数与模拟总次数之比的百分数为合格率(QR),表示多次模拟的总体精度水平。

3 结果与分析

3.1 融合结果分析

由表 2 可知,屯溪流域主要洪水事件的 IMERG 卫星降水数据的 R 范围为 0.51~0.78,平均为 0.63; RB

范围为-19.1%~30.9%,绝对值平均为 12.7%;RMSE 范围为 2.24~4.43 mm/h,平均为 2.93 mm/h。融合降水数据的 R 范围为 0.88~0.97,平均为 0.93;RB 范围为 0.0%~0.8%,绝对值平均为 0.35%;RMSE 范围为 0.94~2.50 mm/h,平均为 1.47 mm/h。10 场洪水中,融合降水数据的 R 与 RMSE 均优于卫星降水数据;除 20190702、20200702 两场洪水外,其余 8 场洪水融合降水 RB 绝对值均小于卫星降水。

表 2 主要洪水事件卫星降水与融合降水评价指标

Table 2 Evaluation indicators of satellite precipitation and merged precipitation for major flood events							
流域	洪水事件	R		RB/%		RMSE/(mm/h)	
		卫星降水	融合降水	卫星降水	融合降水	卫星降水	融合降水
屯溪	20160618	0.66	0.92	16.1	0.5	3.37	1.82
	20160702	0.57	0.92	20.7	0.4	2.39	1.11
	20160715	0.60	0.93	3.5	0.1	2.27	1.03
	20170611	0.62	0.94	30.9	0.0	2.24	0.94
	20170623	0.78	0.97	25.4	0.2	3.00	1.24
	20190618	0.72	0.93	-5.9	0.8	2.96	1.61
	20190702	0.51	0.88	0.1	0.3	3.16	1.79
	20190712	0.77	0.94	-19.1	0.3	2.76	1.53
	20200618	0.55	0.94	-5.2	0.4	2.73	1.13
	20200702	0.56	0.89	0.3	0.5	4.43	2.50
紫荆关	20120720	0.72	0.92	-58.8	0.7	4.25	2.12
	20200717	0.76	0.93	-73.2	-0.3	2.18	0.94
	20230730	0.46	0.91	-8.8	0.4	5.85	2.51
	20240825	0.85	0.98	-2.4	0.0	1.29	0.42

紫荆关流域主要洪水事件的 IMERG 卫星降水数据 R 范围为 0.46~0.85,平均为 0.70;RB 范围为 -73.2%~-2.4%,绝对值平均为 35.8%;RMSE 范围为 1.29~5.85 mm/h,平均为 3.39 mm/h。融合降水数据的 R 范围为 0.91~0.98,平均为 0.94;RB 范围为-0.3%~0.7%,绝对值平均为 0.35%;RMSE 范围为 0.42~2.51 mm/h,平均为 1.50 mm/h。4 场洪水中,融合降水数据的 R 、RB 与 RMSE 均显著优于卫星降水。

IMERG 卫星降水数据在屯溪流域和紫荆关流域与站点实测降水数据都有较良好的相关性;IMERG 卫星降水数据在屯溪流域系统偏差较小,RB 绝对平均值为 12.7%,但在紫荆关流域出现严重的系统偏差,RB 绝对平均值达 35.8%,其中 20120720 场次洪水期间 RB 高达-58.8%,20200717 场次洪水期间 RB 高达-73.2%,严重低估降水强度。这一现象与现有研究结论相悖,现有研究普遍认为 IMERG 卫星降水数据倾向于高估实际降水,特别是在半湿润区^[29]。这可能与流域地形有关,IMERG 卫星降水数据在平坦地形中倾向于高估降水量,在复杂地形条件下则表现出较大的随机性^[30],而紫荆关流域较多复杂山地,故 IMERG 卫星降水数据在紫荆关流域出现较大负偏差。

通过 R 、RB、RMSE 的对比可知,相较于 IMERG 卫星降水数据,融合降水数据在屯溪流域和紫荆关流域精度都有较大提升。

3.2 WRF-Hydro 模型关键参数率定

考虑到站点实测降水数据为点状数据,与 WRF-Hydro 模型所需的网格化气象强迫数据不匹配,网格化插值会引入较大误差、降低精度。后续仅分析卫星降水数据与融合降水数据在研究流域的径流模拟效果。从融合结果分析可知,卫星降水数据偏差较大,与融合降水数据的误差特征不一致。参照过往研究^[31],本文对卫星降水数据与融合降水数据分别进行 WRF-Hydro 模型参数率定,并对比两者的径流模拟效果。

WRF-Hydro 模型参数众多,考虑参数物理意义与过往研究,选取主要敏感参数进行率定。根据李致家等^[32]的研究,WRF-Hydro 模型主要敏感参数如下:土层厚度乘子、土层渗透系数、河道糙率乘子为高敏感参数;水箱模型指数为敏感参数,地表糙率乘子为中等敏感参数。考虑到计算成本,采用手动逐步逼近法对主要敏感参数进行率定^[33]。按照敏感性顺序依次选取参数,在合理的取值范围内以适当步长修改参数并驱动模型,以 NSE 与洪峰相对误差为评价指标,确定参数最优值。分别将卫星降水数据与融合降水数据作为 WRF-Hydro 模型的输入数据,率定关键参数,结果见表 3。

3.3 径流模拟结果分析

屯溪流域主要洪水事件的模拟结果见表 4,图 2 为典型洪水的逐小时洪水流量模拟过程。从整体上看,

表 3 WRF-Hydro 模型主要参数及率定结果

Table 3 Main parameters and calibration results of WRF-Hydro model

流域	数据	土层厚度乘子	土层渗透系数	河道糙率乘子	水箱模型指数	地表糙率乘子
屯溪流域	卫星降水	1.0	2.0	2.0	5	0.9
	融合降水	1.0	2.0	1.6	4	0.8
紫荆关流域	卫星降水	0.5	3.0	1.8	4	0.9
	融合降水	0.5	1.2	1.2	5	0.9

表 4 屯溪流域径流模拟评价指标

Table 4 Evaluation indicators for runoff simulation in Tunxi Basin

洪水事件	卫星降水				融合降水			
	E_p /%	E_Q /%	NSE	ET/h	E_p /%	E_Q /%	NSE	ET/h
20160618	15.3	33.1	0.86	3.0	3.7	6.9	0.98	-5.0
20160702	9.2	29.9	0.68	2.0	-9.1	9.4	0.96	1.0
20160715	9.4	23.0	0.65	5.0	25.8	24.0	0.83	2.0
20170611	58.2	24.6	0.34	2.0	0.5	-3.2	0.94	1.0
20170623	13.4	35.8	0.83	1.0	-4.3	-0.2	0.98	0.0
20190618	-0.4	45.5	0.66	-3.0	11.1	2.2	0.89	0.0
20190702	4.0	21.7	0.76	8.0	3.8	14.9	0.85	-3.0
20190712	-29.8	-17.6	0.85	1.0	-5.1	-1.0	0.98	0.0
20200618	-29.1	-0.6	0.19	42.0	3.6	13.5	0.88	-2.0
20200702	1.1	7.7	0.69	8.0	6.0	5.3	0.93	-1.0
场次平均	17.0	23.95	0.65	7.5	7.3	8.1	0.92	1.5
合格率	0%				80%			

注： E_p 、 E_Q 、ET 的场次平均为绝对值的平均，下同。

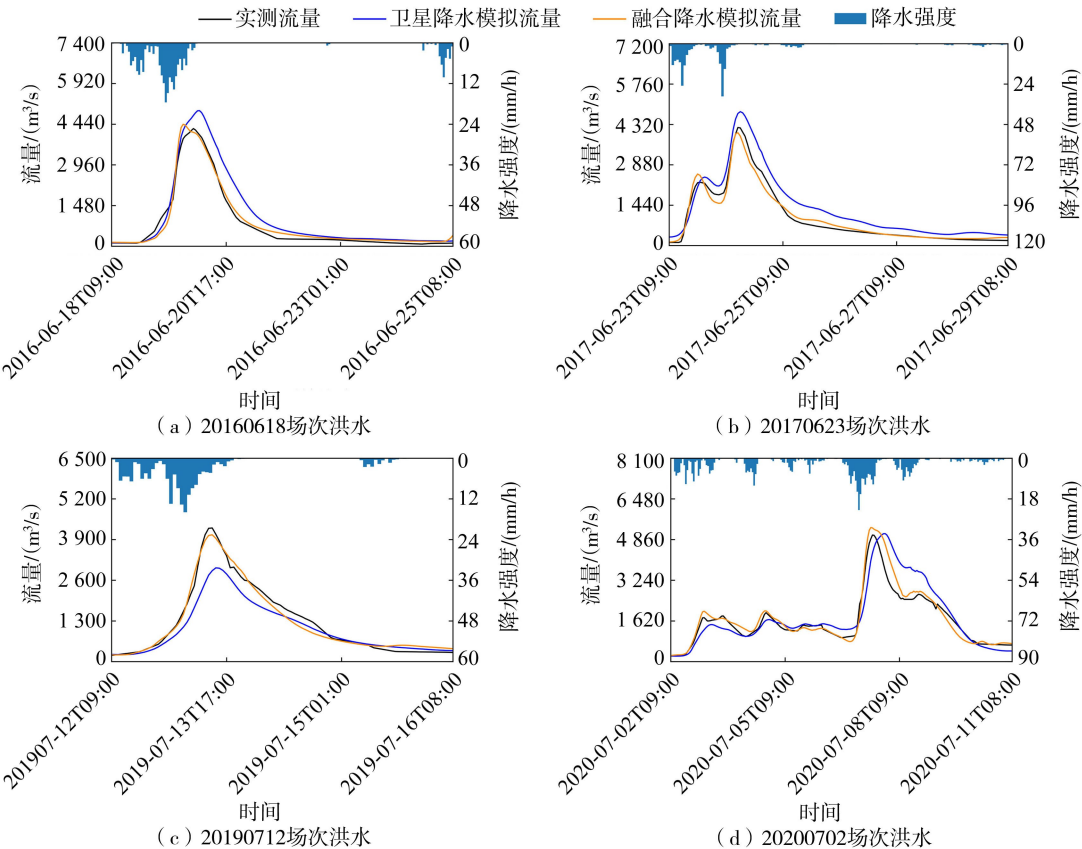


图 2 屯溪流域典型场次洪水流量过程线

Fig. 2 Discharge hydrographs of typical flood events in Tunxi Basin

基于卫星降水数据的径流模拟效果欠佳, E_p 绝对值平均为 17.0%,其中 20170611、20190712、20200618 场次洪峰相对误差不合格; E_Q 绝对值平均达 23.95%,仅 20190712、20200618、20200702 场次洪量相对误差合格;

NSE 平均值为 0.65,模型拟合效果可接受,但 20170611、20200618 场次的 NSE 分别为 0.34、0.19,拟合效果很差;ET 绝对值平均为 7.5 h,其中 20200618 场次误差达 42.0 h,预报误差较大。基于融合降水数据的模拟效果较卫星降水数据有很大提升, E_p 绝对值平均降至 7.3%; E_Q 绝对值平均降至 8.1%;各场次洪水 NSE 均大于 0.80,NSE 平均值提升至 0.92,流量过程拟合精度达到高度可靠水平;ET 绝对值平均降至 1.5 h。从典型洪水来看,卫星降水数据在 20160618 与 20170623 场次洪水高估降水强度,导致洪峰流量与洪量偏高,而在 20190712 场次洪水低估了降水强度,导致洪峰流量与洪量偏低;4 场洪水基于卫星降水数据的径流模拟退水段模拟均较差,而融合降水数据在 4 场典型洪水中精度较高,径流模拟的洪峰、洪量与拟合程度都十分优秀。

紫荆关流域主要洪水的模拟结果见表 5,图 3 为典型洪水的逐小时洪水流量模拟过程。基于卫星降水数据的径流模拟结果较差, E_p 对值平均达 52.8%, E_Q 绝对值平均达 64.6%,其中 20120720、20200717 场次洪水模拟完全失效, E_p 与 E_Q 都接近 100.0%,这主要归因于卫星降水数据的严重低估,20120720、20200717 场次洪水期间卫星降水数据 RB 分别为-58.8%、-73.2%。基于融合降水数据的径流模拟结果显著优于卫星降水数据, E_p 绝对值平均为 12.6%, E_Q 绝对值平均为 27.3%;对于 4 场洪水的径流模拟,融合降水数据在

表 5 紫荆关流域径流模拟评价指标

洪水事件	卫星降水				融合降水			
	E_p /%	E_Q /%	NSE	ET/h	E_p /%	E_Q /%	NSE	ET/h
20120720	-100.0	-100.0	-0.18	-36.0	3.8	-21.2	0.70	-1.0
20200717	-98.4	-96.8	-1.24	-21.0	24.1	-54.2	0.15	2.0
20230730	4.7	11.8	0.64	6.0	18.0	9.5	0.73	2.0
20240825	-7.9	49.7	-0.03	8.0	-4.6	-24.4	0.58	7.0
场次平均	52.8	64.6	0.20	17.8	12.6	27.3	0.54	3.0
合格率	0%				25%			

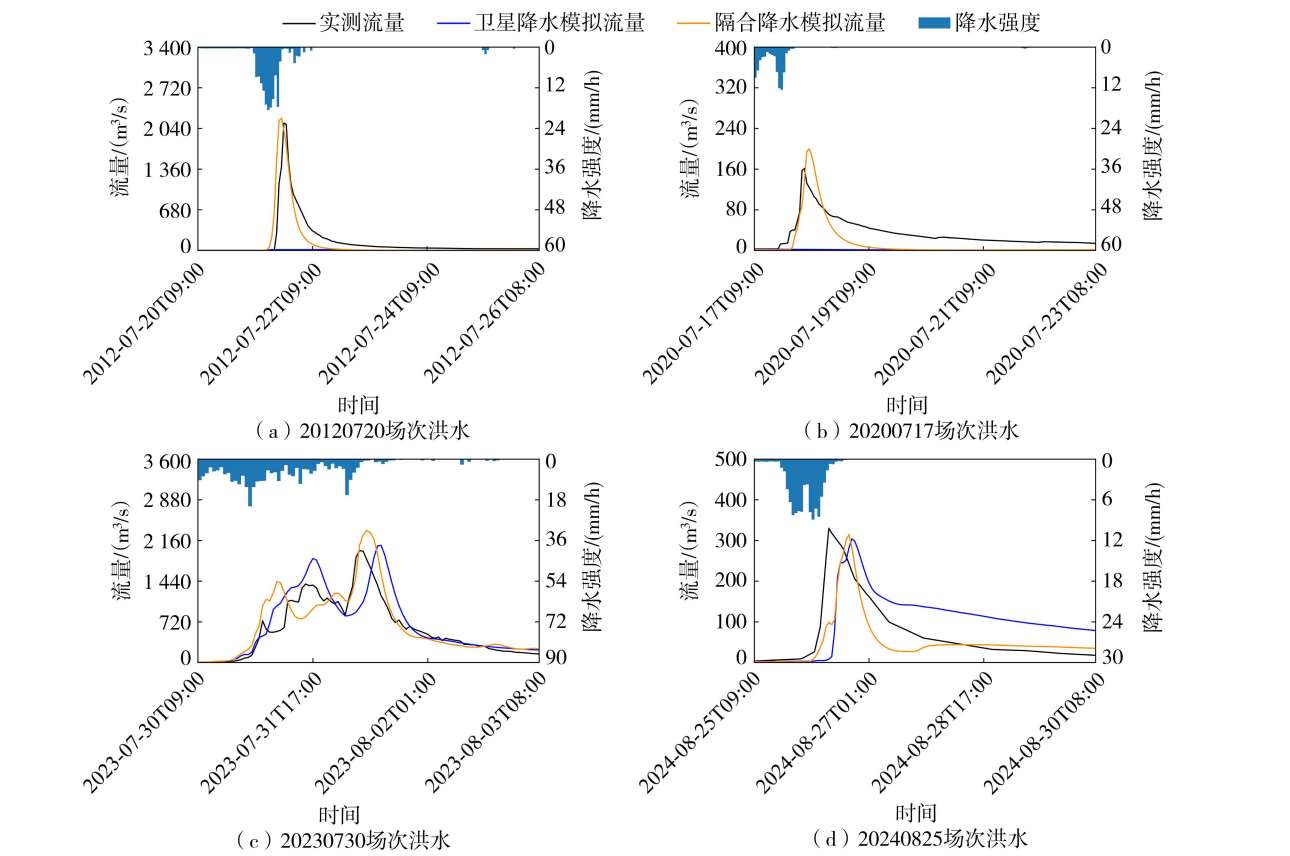


图 3 紫荆关流域典型场次洪水流量过程线

Fig. 3 Discharge hydrographs of typical flood events in Zijingguan Basin

各项评价指标上整体优于卫星降水数据,仅 20230730 场次洪水的 E_p 指标劣于卫星降水数据。对于 20230730 场次多峰洪水,基于卫星降水数据的模拟过程对第一个洪峰模拟较好,起涨段较为贴合,仅洪峰流量偏大,但第二个洪峰出现较大偏差,峰现时间明显滞后;基于融合降水数据的模拟过程对第一个洪峰模拟较差,峰现时间提前,第二个洪峰起涨段模拟较好且峰现时间较准确,但洪峰流量偏大。

图 4 为屯溪流域与紫荆关流域的径流模拟评价指标箱线图。从降水输入源方面比较,相较于卫星降水数据,融合降水数据在两个流域都表现出更优的性能,其径流模拟的 E_p 、 E_Q 和 ET 3 个评价指标的中位数更接近于零,且离散程度显著较低,NSE 更趋近于 1,说明融合降水数据在模拟水文过程方面具有更高的精度与稳定性。从流域方面比较,屯溪流域的基于卫星降水数据与融合降水数据的径流模拟的各项评价指标普遍优于紫荆关流域,表现为误差分布更低且集中、NSE 整体偏高,反映出该流域的水文响应与模型结构之间具有更好的适应性。

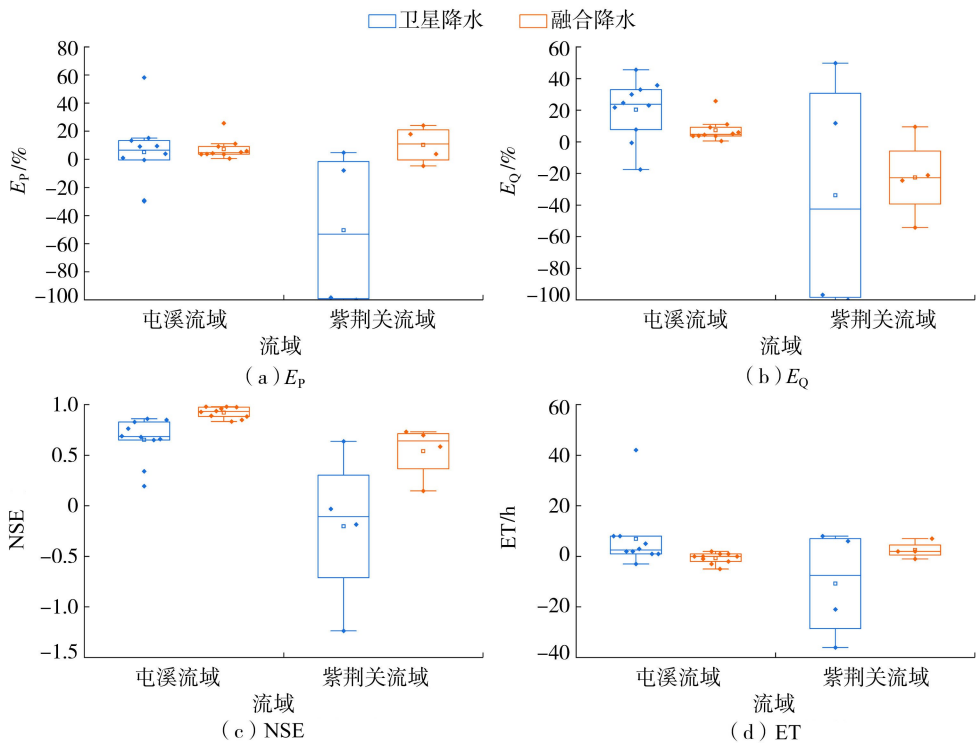


图 4 径流模拟评价指标箱线图

Fig. 4 Box plot of evaluation indicators for runoff simulation

具体而言,在屯溪流域,基于卫星降水数据的径流模拟结果合格率为 0%,而基于融合降水数据的径流模拟结果合格率为 80%;在紫荆关流域,基于卫星降水数据的径流模拟出现预报失效,而基于融合降水数据的径流模拟基本符合洪水过程。湿润流域和半湿润流域的融合降水数据的径流模拟效果均优于卫星降水数据,间接证明了融合方法能有效提高降水数据的精度。最后,进一步比较基于卫星降水数据与融合降水数据的 WRF-Hydro 模型在湿润流域和半湿润流域的径流模拟结果。在卫星降水数据的驱动下,屯溪流域的洪峰相对误差绝对值平均值比紫荆关流域低 67.8%,洪量相对误差绝对值平均值比紫荆关流域低 63.0%。屯溪流域纳什效率系数均值为 0.65,紫荆关流域 NSE 均值为-0.20。在融合降水数据的驱动下,屯溪流域的平均洪峰相对误差绝对值比紫荆关流域低 42.1%,平均洪量相对误差绝对值比紫荆关流域低 70.3%;屯溪流域径流模拟结果合格率为 80%,而紫荆关流域径流模拟结果合格率为 25%。这些结果表明,无论采用卫星降水数据还是融合降水数据作为驱动数据,WRF-Hydro 模型在湿润流域的适用性均优于半湿润流域。分析其原因主要有两点:其一,虽然 WRF-Hydro 模型综合考虑了蓄满产流与超渗产流,但其超渗径流计算机制仍不完善,还是在以蓄满产流为主的湿润流域应用效果较好。其二,IMERG 卫星降水数据在紫荆关流域精度较差,出现严重低估现象,同时也影响了融合降水数据精度,这导致模型在紫荆关流域模拟较差。

4 结 论

- a. IMERG 卫星降水数据在屯溪流域与紫荆关流域都与站点实测降水数据有较好的相关性,但在紫荆关流域出现严重低估情况,这可能与紫荆关流域复杂地形有关。每场洪水对应的融合降水数据精度较卫星降水数据都有较大提升,体现了 KED 多源降水融合技术的稳健性,并且证明数据融合能有效提高降水数据的精度。
- b. 在湿润的屯溪流域,卫星降水数据驱动模型能较好拟合洪水过程,而融合降水数据驱动模型则表现出更高的模拟精度;在半湿润的紫荆关流域,卫星降水驱动模型效果不稳定甚至出现预报完全失效,而融合降水驱动模型能较好模拟洪水过程。总体而言,无论湿润流域还是半湿润流域,基于融合降水的模型模拟结果均优于基于卫星降水的模型模拟结果,凸显了多源降水融合技术在提升洪水模拟效果方面的适用性与可靠性。
- c. 无论是采用卫星降水数据,还是融合降水数据,WRF-Hydro 模型在湿润流域的应用效果都要优于半湿润流域。这可能是因为模型超渗径流计算机制不完善,不能很好模拟半湿润流域的“降雨-径流”的非线性关系。

参考文献:

[1] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong,Yang Kai,Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[2] 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 early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1): 1-6. (in Chinese))

[3] 李致家,李安琪,姚成,等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):10-17. (Li Zhijia,Li Anqi,Yao Cheng,et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):10-17. (in Chinese))

[4] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):125-134. (Wang Wei,Liu Jia,Li Chuanzhe,et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):125-134. (in Chinese))

[5] Chao Lijun,Zhang Ke,Li Zhijia,et al. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation[J]. Journal of Hydrology,2018,558:275-289.

[6] 郭建茂,吴登国,韩金龙,等. 基于雷达和遥感卫星的新疆区域降水反演[J]. 干旱区研究,2025,42(6):957-969. (Guo Jianmao,Wu Dengguo,Han Jinlong,et al. Precipitation retrieval for Xinjiang region based on radar and remote sensing satellites [J]. Arid Zone Research,2025,42(6):957-969. (in Chinese))

[7] 秦鼎超,张行南,张自航,等. 基于多源融合降水数据的雨量站网适用性评估方法[J]. 人民长江,2025,56(3):106-115. (Qin Dingchao,Zhang Xingnan,Zhang Zihang,et al. Applicability evaluation method for rainfall gauge networks based on multi-source integrated rainfall data[J]. Yangtze River,2025,56(3):106-115. (in Chinese))

[8] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):15-24. (Hu Wentao,Yu Zhongbo,Chen Songfeng,et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):15-24. (in Chinese))

[9] 胡保健,李伟,陈传法,等. 利用空间随机森林方法提升 GPM 卫星遥感降水质量[J]. 遥感学报,2024,28(2):414-425. (Hu Baojian,Li Wei,Chen Chuanfa,et al. Improving the quality of remotely sensed precipitation product from GPM satellites by using a spatial random forest[J]. National Remote Sensing Bulletin,2024,28(2):414-425. (in Chinese))

[10] 宋蕾玥,张珂,晁丽君,等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):125-132. (Song Lei Yue,Zhang Ke,Chao Lijun,et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):125-132. (in Chinese))

[11] Chen Chuanfa,Hu Baojian,Li Yanyan. Easy-to-use spatial random-forest-based downscaling-calibration method for producing

- precipitation data with high resolution and high accuracy[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(11): 5667-5682.
- [12] Chen Fengrui, Gao Yongqi, Wang Yiguo, et al. A downscaling-merging method for high-resolution daily precipitation estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124414.
- [13] Wehbe Y, Temimi M, Adler R F. Enhancing precipitation estimates through the fusion of weather radar, satellite retrievals, and surface parameters[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1342.
- [14] 张婷, 李怡, 李建柱, 等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(1): 15-28. (Zhang Ting, Li Yi, Li Jianzhu, et al. Research progress on multi-source rainfall data fusion and their hydrological application[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(1): 15-28. (in Chinese))
- [15] Jewell S A, Gaussiat N. An assessment of kriging-based rain-gauge-radar merging techniques[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2300-2313.
- [16] 闫鑫, 陈华, 尚志宏, 等. 星地数据融合的日降水产品及其径流模拟研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(6): 36-46. (Yan Xin, Chen Hua, Shang Zhihong, et al. Daily precipitation estimates merging ground-based observations with satellite-derived data and its runoff simulated performance[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(6): 36-46. (in Chinese))
- [17] 晁丽君, 张珂, 陈新宇, 等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 55-64. (Chao Lijun, Zhang Ke, Chen Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 55-64. (in Chinese))
- [18] 沈哲辉, 韩静妍, 桂敬聪, 等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 50-61. (Shen Zhehui, Han Jingyan, Gui Jingcong, et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(1): 50-61. (in Chinese))
- [19] Jiang Shanhu, Wei Linyong, Ren Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: Spatiotemporal patterns and extremes[J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(1): 45-56.
- [20] 陈汉清, 鹿德凯, 周泽慧, 等. GPM 降水产品评估研究综述[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 27-34. (Chen Hanqing, Lu Dekai, Zhou Zehui, et al. An overview of assessments on global precipitation measurement (GPM) precipitation products[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 27-34. (in Chinese))
- [21] Cho K, Kim Y. Improving streamflow prediction in the WRF-Hydro model with LSTM networks[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127297.
- [22] Chao Lijun, Zhang Ke, Wang Sheng, et al. Assimilation of surface soil moisture jointly retrieved by multiple microwave satellites into the WRF-Hydro model in ungauged regions: towards a robust flood simulation and forecasting[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2022, 154: 105421.
- [23] 孙明坤, 李致家, 刘志雨, 等. WRF-Hydro 模型与新安江模型在陈河流域的应用对比[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 850-864. (Sun Mingkun, Li Zhijia, Liu Zhiyu, et al. Application of WRF-Hydro modeling system in Chenhe Basin and comparison with Xin'anjiang model[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3): 850-864. (in Chinese))
- [24] 郭晨煜, 吕海深, 朱永华, 等. WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(6): 120-127. (Guo Chenyu, Lyu Haishen, Zhu Yonghua, et al. Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(6): 120-127. (in Chinese))
- [25] Gochis D J, Barlage M, Cabell R, et al. The WRF-Hydro[®] modeling system technical description, (version 5. 1. 1). NCAR technical note[R]. Boulder: NCAR, 2020.
- [26] Huang Yufen, Tsang Y, Nugent A D. Deriving gridded hourly rainfall on O'ahu by combining gauge and radar rainfall[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2023, 24(12): 2239-2257.
- [27] 李致家, 张心愿, 白云鹏, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(5): 13-19. (Li Zhijia, Zhang Xinyuan, Bai Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))
- [28] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S].
- [29] 张茹, 雍斌, 曾岁康. GPM 卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J]. *人民长江*, 2021, 52(5): 50-59. (Zhang Ru, Yong Bin, Zeng Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over China's mainland[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(5): 50-59. (in Chinese))

planning[J]. Western China Communications Science & Technology,2019(6):175-205. (in Chinese))

[27] 何泽慧,彭士涛. AERMOD-EIA 模型参数在港口粉尘污染预测中的敏感性分析[J]. 水道港口,2012,33(4):342-347. (He Zehui,Peng Shitao. AERMOD-EIA model parameters sensitivity analysis of port dust pollution prediction[J]. Port & Waterway Engineering,2012,33(4):342-347. (in Chinese))

[28] 刘建昌,李兴华,徐洪磊,等. 内河多点分散码头大气污染叠加影响特征[J]. 环境科学,2013,34(5):2044-2050. (Liu Jianchang,Li Xinghua, Xu Honglei, et al. Superposition impact character of air pollution from decentralization docks in a freshwater port[J]. Environmental Science,2013,34(5):2044-2050. (in Chinese))

[29] 张玮,郭胜利,申付振,等. 南京地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分布特征及与相关气象条件的关系[J]. 科学技术与工程,2016,16(4):124-129. (Zhang Wei,Guo Shengli,Shen Fuzhen,et al. The relationship between the distribution characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} in Nanjing area and meteorological conditions[J]. Science Technology and Engineering,2016,16(4):124-129. (in Chinese))

[30] 谷艳昌,吴云星,黄海兵,等. 基于遗传算法优化支持向量机的大坝安全性态预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):419-425. (Gu Yanchang, Wu Yunxing, Huang Haibing, et al. Prediction model of dam safety behavior based on genetic algorithm optimized support vector machine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):419-425. (in Chinese))

[31] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (Wang Hongrui, Wei Haoshan, Hu Litang, et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):488-497. (in Chinese))

[32] 柳建菲. 基于时间序列分解的 PM_{2.5} 浓度预测[D]. 兰州:兰州大学,2020.

[33] Bolmanis E,Uhlendorff S,Pein-Hackelbusch M,et al. Anomaly detection and removal strategies for in-line permittivity sensor signal used in bioprocesses[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,2025,13:1609369.

[34] 康俊锋,谭建林,方雷,等. XGBoost-LSTM 变权组合模型支持下短期 PM_{2.5} 浓度预测:以上海为例[J]. 中国环境科学,2021,41(9):4016-4025. (Kang Junfeng, Tan Jianlin, Fang Lei, et al. Short-term PM_{2.5} concentration prediction based on XGBoost and LSTM variable weight combination model: a case study of Shanghai[J]. China Environmental Science,2021,41(9):4016-4025. (in Chinese)).

[35] 吕蓬,岳莉莉,赵晓丽. 小波分解和 ARIMA 模型相结合的短期风速预测[J]. 科技信息,2011(14):401-402. (Lyu Peng, Yue Lili,Zhao Xiaoli. Short-term wind speed prediction combined with wavelet decomposition and ARIMA model[J]. Science and Technology Information,2011(14):401-402. (in Chinese))

[36] Cleveland R B,Cleveland W S,McRae J E,et al. STL:a seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS[J]. Journal of Official Statistics, 1990, 6(1): 3-73.

(收稿日期:2025-07-08 编辑:熊水斌)

(上接第 38 页)

[30] 陈爱军,陶子淳. 多样性地形条件下 IMERG 精度综合评估[J]. 科学技术与工程,2025,25(16):6608-6618. (Chen Aijun, Tao Zichun. Comprehensive assessment of IMERG accuracy under diverse topographic conditions[J]. Science Technology and Engineering,2025,25(16):6608-6618. (in Chinese))

[31] 雍斌,周振杨,陶新,等. 黄河源区多源融合降水产品综合评价及其水文效应评估[J]. 水资源保护,2025,41(2):47-57. (Yong Bin,Zhou Zhenyang,Tao Xin,et al. Comprehensive evaluation and hydrological effect evaluation of multi-source fusion precipitation product in the Yellow River source area[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):47-57. (in Chinese))

[32] 李致家,龚俊超,孙明坤. 中国半湿润流域 WRF-Hydro 模型参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):1-8. (Li Zhijia, Gong Junchao, Sun Mingkun. Parametric sensitivity analysis of WRF-Hydro model in a semi-humid watershed of China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):1-8. (in Chinese))

[33] 齐晟慰,谷黄河,王玉明,等. 不同融合降水数据驱动的 WRF-Hydro 模型对中小流域山洪模拟的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):45-52. (Qi Shengwei, Gu Huanghe, Wang Yuming, et al. Applicability of WRF-Hydro model driven by different precipitation fusion data in mountain torrent simulation of medium-and small-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(2):45-52. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-26 编辑:刘晓艳)