

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221561

CMORPH 卫星站点融合降水的沂河流域 径流模拟适用性评估

张国锐^a, 杨传国^{a,b}, 卢书梅^a, 陈羽^a

(河海大学 a. 水文水资源学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为验证卫星地面融合降水在北方半湿润地区径流模拟中的适用性, 对比了 2008~2012 年沂河流域汛期的 CMORPH 融合降水和实测网格降水时空分布, 并分别驱动 HEC-HMS 模型进行日径流模拟、洪水模拟, 进而评估利用卫星地面融合降水进行洪水预报的可行性。结果表明, 在沂河流域, CMORPH 卫星站点融合降水与实测网格降水具有较高的相关性, 其洪水模拟精度与实测网格降水相当, 径流深和洪峰的预报能力更优, 在研究区洪水预报中具有很好的适用性。

关键词: CMORPH 融合降水; 径流模拟; HEC-HMS 模型; 沂河流域

中图分类号: TV121⁺.1; TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0006-04

1 引言

沂河位于山东省南部与江苏省北部相接处, 源自山东省沂源县, 南流进入江苏省后向东汇入黄海。流域地形特征为西北高、向东南部平原倾斜, 山丘占 70%, 平原占 30%, 属温带季风半湿润气候区^[1]。临沂站以上集水面积为 10 032 km², 大、中型水库等工程主要位于上游流域边界处, 中下游受人类活动影响程度小, 流域边界与天然径流规律未受破坏^[1]。流域受黄淮气旋、台风和南北切变等天气系统影响, 暴雨集中、雨强大, 由于上游地形比降大, 易形成峰高流急、陡涨陡落的洪水灾害。“2020. 8. 14”暴雨最大 3 h 雨量 189.5 mm, 临沂站洪峰流量高达 10 900 m³/s^[2], 因此评估降水在沂河流域的预测精度对该流域的防汛具有重要意义。获取可靠的降水数据是洪水预报的难点之一^[3], 我国水文站和气象站的实测数据具有精度高、序列完整的特点, 但代表的空间范围有限, 且各地区站网铺设密度不同, 导致一些站点稀疏地区资料代表性差。而卫星降水产品虽然仍存在一定的误差, 但具有覆盖范围大、时空分辨率高的特点, 可作为降水的重要来源和补充。将卫星降水和地面实测降水进行融合, 用于水文研究

已成为新的趋势^[4,5]。沈艳等^[6]研发了中国自动气象站与 CMORPH 卫星融合的逐时降水量网格数据集, 并应用于区域大尺度降水监测评估、日月尺度径流模拟等^[7,8], 但在中小流域的洪水模拟预报方面应用较少。因此本文以沂河流域为例, 评估了 CMORPH 融合降水精度, 建立了基于卫星站点融合降雨的水文模拟方案, 探讨了融合降水在沂河流域逐日径流和次洪模拟的适用性和可行性。

2 数据与方法

2.1 数据来源

(1) 卫星站点融合降水。采用中国气象自动站与 CMORPH 卫星融合的逐时降水量网格数据集, 该数据集将美国环境预测中心的气候预测中心开发的实时卫星反演 CMORPH 降水产品与全国 3 万多自动气象观测站的地面观测逐时降水量进行融合, 得到空间分辨率为 0.1°、时间步长为 1 h 的网格降水数据。

(2) DEM 及土地利用数据。数字高程数据来源于中国科学院地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为 3"。土壤类型数据、土地利用数据均来源于中国科学院地理科学与资

收稿日期: 2022-07-29, 修回日期: 2022-08-22

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021049); 国家重点研发计划(2016YFC0402706)

作者简介: 张国锐(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文模拟预报, E-mail: zgr9707@163.com

通讯作者: 杨传国(1981-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水文水资源, E-mail: cgyang@hhu.edu.cn

源研究所资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 网格分辨率 1 km。

(3) 水文气象数据。实测降雨数据为国家气象科学数据中心提供的 0.25° 实测网格小时降水数据, 临沂水文站日平均流量、8 场实测流量数据摘录自水利部出版的水文年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 HEC-HMS 水文模型

HEC-HMS 模型^[9]可模拟自然或人工状态下降雨—径流及洪水演进过程, 模型适用性强^[10], 包括地表产流、坡面汇流、基流、河道演算等部分^[11]。基于沂河流域高分辨率数字高程数据划分子流域, 采用泰森多边形计算各子流域降雨权重。产流采用 CN 曲线法计算, 地表汇流采用 Snyder 单位线计算, 基流部分采用指数衰退法计算, 河道汇流选择马斯京根法作为计算方法。模型首先以实测降水作为输入率定 HEC-HMS 模型, 得到适用于沂河流域的模型参数, 再以 CMORPH 融合降水驱动 HEC-HMS 模型开展逐日径流及次洪模拟。

2.2.2 精度评估指标

卫星站点融合降水与实测网格降水的时空分布差异评估指标采用皮尔逊相关系数(R_{cc})、均方根误差(R_{RMSE})、相对偏差(B_{Bias})。洪水模拟的精度评价指标采用《水文情报预报规范》^[12]推荐的确定性系数(D_c)、径流深相对误差(R_B)、洪峰流量相对误差(Q_B)。

3 结果与分析

3.1 CMORPH 融合降水精度评价

(1) 相关性分析。为验证 CMORPH 融合降雨在时间尺度上的偏离程度及年际稳定性, 采用泰森多边形法分别计算 2008~2012 年 6~9 月期间步长为 1 h 流域平均面雨量、日平均面雨量, 进行线性拟合并绘制散点图见图 1。由图 1 可知, 两种时间尺度上的相关系数 R_{cc} 分别为 0.651、0.757, 均方根误差 R_{RMSE} 分别为 0.41、4.36, 相

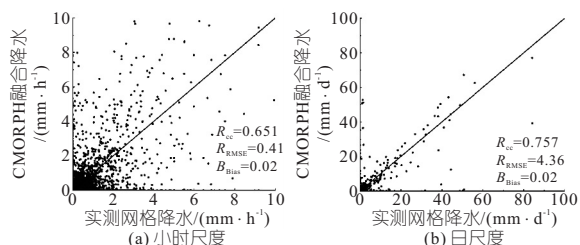


图 1 CMORPH 融合降水与实测降水对比

Fig. 1 Comparison of CMORPH merged and observed grid precipitations

对误差 B_{Bias} 整体上均为 0.02, 表明融合降雨与实测降雨具有较好的相关性; 两种时间尺度下, 散点较为均匀地分布在 1:1 线附近, 表明卫星融合降水在时间尺度上的分布规律与实测降水相同且误差较小, 降雨量较高时 CMORPH 卫星站点融合降水比实测网格降水量整体上偏大。

(2) 降水空间分布。由于两组降水空间网格分辨率的差异, 采用反距离平方法对实测网格降水进行插值得到与卫星融合降水相同的网格分辨率。求得 CMORPH 融合降水与实测网格降水 8 场洪水期内的小时降雨分布和汛期日降雨分布, 绘制洪水期小时降水空间分布与 2009~2012 年日均降水分布见图 2。由图 2 可知, 洪水时段实测小时降水分布在 $0.33 \sim 1.31$ mm, CMORPH 小时降水分布在 $0.37 \sim 1.21$ mm, 实测日平均降水分布在 $1.73 \sim 2.25$ mm, CMORPH 日平均降水分布在 $1.52 \sim 2.30$ mm。融合降水在小时尺度下的分布仅在流域东南部存在一定的高估, 而日降水在东北部存在一定的误差, 其原因可能是 CMORPH 融合降水对强降雨的捕捉能力较强而对较小降雨量可能存在误差, 导致日降雨累积误差。因此, CMORPH 融合降水能较好地反映沂河流域的空间分布, 除了卫星降水本身监测误差外, 可能与两组降水数据采用的实测雨量站点的密度和分布差异有关。综上所述, CMORPH 融合降水与实测降水具有较强的时空相关性, 相对误差较低, 将其用于流域洪水模拟预报具有可行性。

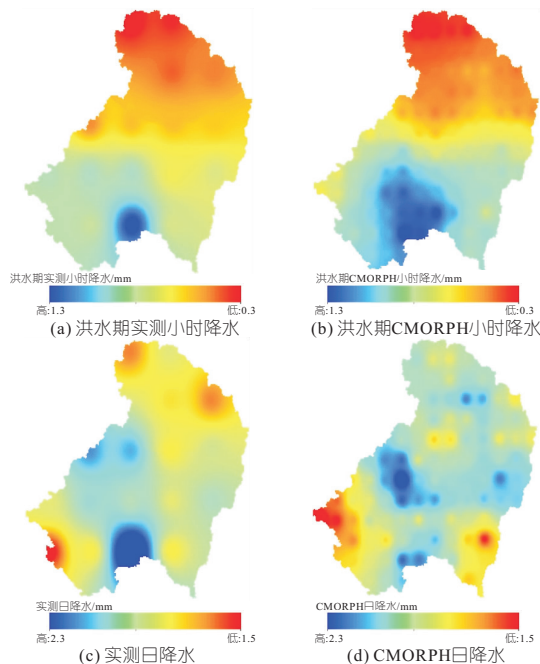


图 2 CMORPH 融合降水与实测降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation between CMORPH merged precipitation and observed gridded values

3.2 径流模拟精度评估

3.2.1 逐日径流模拟

以 2008~2011 年汛期 6~9 月为率定期,将实测网格降水作为模型降雨输入进行参数自动率定,获得模型最优参数,评价指标见表 1。由表 1 可知,实测降水率定期模拟平均确定性系数为 0.714、径流深相对误差为 13.73%,验证期确定性系数为 0.744、径流深误差为 14.2%,达到径流模拟精度要求,表明率定后的模型适用于研究区域的日径流模拟。

表 1 逐日径流模拟结果评估

Tab. 1 Daily streamflow simulation results

年份	实测		CMORPH	
	D_C	$R_B/\%$	D_C	$R_B/\%$
2008	0.745	13.41	0.680	13.21
2009	0.669	7.40	0.679	14.27
2011	0.729	20.37	0.612	6.94
2012	0.744	14.20	0.766	22.03

直接将 CMORPH 融合降水作为率定模型的输入进行径流模拟。相较于实测降水,融合降水模拟精度略有下降,2008~2012 年径流模拟平均确定性系数为 0.709、相对误差为 14.41%。在洪峰模拟方面,CMORPH 降水模拟结果整体优于实测网格降水,但两者模拟结果均低于实测流量。总得来说,CMORPH 融合降水在沂河流域逐日径流模拟具有良好的适用性。

3.2.2 次洪过程模拟

为更详细地评估融合降水的径流模拟能力,采用 HEC-HMS 水文模型模拟 2008~2012 年的 8 场洪水。以实测网格降水量为驱动,根据土地利用及土壤类型计算次洪参数初值,然后采用梯度下降优化方法进行参数率定^[13,14]。利用率定后的参数,各场洪水平均确定性系数达 0.838,径流深误差绝对值平均为 7.29%,对洪峰的模拟偏低,洪峰相对误差绝对值平均为 17.87%,径流深误差和洪峰误差均满足 20% 的许可误差范围,整体达到乙级预报精度水平,表明模型适用于沂河流域的次洪过程模拟。

获得的洪水模拟精度见表 2。由表 2 可知,各场洪水的确定性系数 D_C 与实测网格降水模拟结果基本相当,而 CMORPH 融合降水模拟结果的径流深误差 R_B 和洪峰相对误差 Q_B 均有了显著提高。表明卫星监测降水在融合了地面自动气象站资料后,具有高分辨率的时空分布,适用于研究区的洪水模拟,洪峰预报精度和合格率均有改进。

图 3 为两组降水的典型洪水过程模拟结果对比。由图 3 可知,各场次洪水中 CMORPH 融合

表 2 实测降水与 CMORPH 融合降水洪水模拟结果

Tab. 2 Flood results simulated with observed and CMORPH merged precipitations

洪水场次	实测网格降水结果			CMORPH 融合降水结果		
	D_C	$R_B/\%$	$Q_B/\%$	D_C	$R_B/\%$	$Q_B/\%$
20080718	0.825	-12.55	-11.85	0.806	-1.44	5.51
20080821	0.779	-11.83	-9.85	0.815	-9.39	-13.86
20090720	0.862	-5.58	-24.86	0.864	6.59	-16.70
20090817	0.761	19.69	-19.01	0.791	4.79	-11.95
20110819	0.927	-1.59	-18.02	0.929	6.19	-6.33
20110826	0.873	1.86	-5.50	0.841	-0.81	-6.80
20120705	0.864	-1.32	-29.47	0.811	12.42	-12.12
20120825	0.816	-3.93	-24.40	0.819	2.27	-19.90
绝对值平均	0.838	7.29	17.87	0.835	5.49	11.65

注:下划线标注部分表示此降水模拟结果的该指标更优。

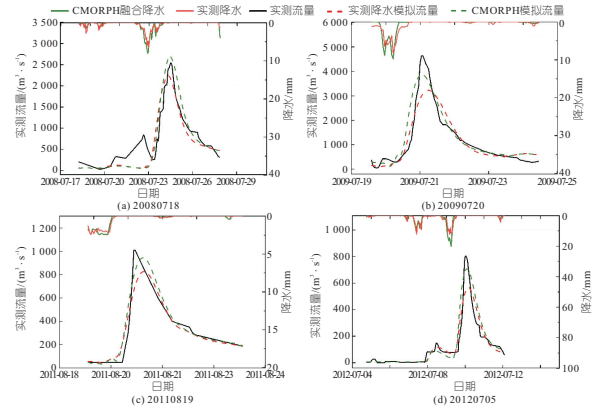


图 3 CMORPH 模拟洪水与实测降水模拟洪水对比
Fig. 3 Comparison of typical flood hydrographs simulated with observed and CMORPH merged precipitations

降水与实测网格降水过程相似,洪水模拟结果在峰现时间上接近,说明卫星地面融合降水在时间尺度上捕捉能力较强;CMORPH 融合降水经过主要参数率定后的洪水模拟结果与实测流量曲线重合程度高,在模拟精度上有了明显改进。因此,可根据模型模拟结果和卫星融合降水空间分布特点,通过校准主要模型参数提高洪水预报精度。

4 结论

a. CMORPH 卫星站点融合降水能准确反映出沂河流域降水的时空分布规律,降水相对偏差在 20% 以内的流域面积为 83.18%。由于其时空分辨率高的特点,在极端暴雨刻画方面具有优势。

b. HEC-HMS 模型在研究区的逐日径流和次洪模拟方面均具有较高的模拟精度,达到乙级预报精度水平,说明该模型适用于沂河流域的径流模拟。

c. CMORPH 融合降水具有高时空分辨率的特点,其逐日径流和次洪模拟精度与实测网格降水的模拟精度相当,次洪过程的径流深和洪峰的模拟能力优于实测网格降水,表明卫星站点融合降水在研究区径流预报中具有很好的实用性。

参考文献:

- [1] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.
- [2] 崔恩贵,郭小东,杜静,等.沂河流域“2020.8.14”暴雨洪水分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(1):43-47.
- [3] SATGÉ F, BONNET M P, GOSSET M, et al. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau[J]. Atmospheric research, 2016, 167: 1-14.
- [4] 孙桂凯,魏义熊,王亚芳,等.IMERG 卫星降水产品融合校准及其水文效用[J].水电能源科学,2021,39(11):23-26.
- [5] 黄依之,张行南,方园皓. CMORPH 卫星反演降水数据质量评估及水文过程模拟[J].水电能源科学,2020,38(9):1-4.
- [6] 沈艳,潘旸,宇婧婧,等.中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J].大气科学学报,2013,36(1):37-46.
- [7] 周璇,罗亚丽,郭学良. CMORPH 卫星—地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降水分析中的应用[J].热带气象学报,2015,31(3):333-344.
- [8] SUN R, YUAN H, LIU X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin[J]. Journal of hydrology, 2016:302-319.
- [9] 张浪,李俊,黄晓荣,等. HEC-HMS 模型在四川省清溪河流域山洪预报中的应用[J].中国农村水利水电,2020(1):130-135.
- [10] 王璐,叶磊,吴剑,等.山丘区小流域水文模型适用性研究[J].中国农村水利水电,2018(2):78-84,90.
- [11] 田竞,夏军,张艳军,等. HEC-HMS 模型在官山河流域的应用研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(1):8-14.
- [12] 中华人民共和国水利部.水文情报预报规范:GB/T 22482-2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [13] 刘畅,陈兴伟,刘传铭.晋江流域 HEC-HMS 模型关键参数的分区率定[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):40-47,96.
- [14] 程旭,马细霞,王武森,等. HEC-HMS 模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J].水文,2022,42(1):40-46,102.

Applicability Evaluation of CMORPH Merged Rainfall in Hydrologic Simulation Yihe River Basin

ZHANG Guo-rui^a, YANG Chuan-guo^{a,b}, LU Shu-mei^a, CHEN Yu^a

(a. College of Hydrology and Water Resources; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the applicability of CMORPH merged hourly gridded precipitation product in Northern China, the statistical indicators between the observed grid precipitation and CMORPH merged gridded precipitation in temporal and spatial distribution of flood season from 2008 to 2012 were evaluated in the Yihe River Basin. Using the two precipitations as the input of HEC-HMS model, the feasibility of floods forecast of the CMORPH merged precipitation was evaluated. The results show that the CMORPH merged precipitation has a high correlation with the observed grid precipitation, and the flood simulation accuracy is comparable to the result of observed grid precipitation, and performing better in the simulations both runoff volume and flood peak. The satellite merged precipitation has good applicability in flood forecasting in the study area.

Key words: CMORPH merged precipitation; hydrologic simulation; HEC-HMS model; Yihe River Basin

(上接第 99 页)

Comprehensive Geophysical Detection and Evaluation of Quality of "Stepped" Concrete Cut-off Wall of Hejiagou Reservoir Dam

ZHANG Ting-hua¹, JIANG Jing-dong^{2,3}, LI Zhuo^{2,3}, FAN Guang-ya^{2,3}, BI Chao-da^{2,3}

(1. Ningxialiapanshan Water Affairs Co., Ltd., Guyuan 756000, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of The Ministry of Water Resource, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to evaluate the quality of "stepped" concrete cut-off wall of Hejiagou reservoir dam, the ground penetrating radar was used to detect the whole cut-off wall, and the cross-hole ultrasonic method was used to detect the "steps" of the concrete cut-off wall. The detection shows that the overall quality of the cut-off wall is good. Core drilling and water pressure test were carried out in the areas where there may be abnormalities, and the quality of the cut-off wall was comprehensively evaluated in combination with the monitoring data of the osmometer in front of and behind the cut-off wall. The results show that no major quality defects are found on the cutoff wall, local abnormalities exist, and the overall working performance is normal. This comprehensive geophysical detection method can effectively reflect the actual quality of the "stepped" cutoff wall, and the comprehensive utilization of relevant technologies can provide reference for similar projects.

Key words: "stepped" concrete cut-off wall; quality evaluation; comprehensive geophysical detection method; ground penetrating radar; cross-hole ultrasonic method