

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221280

多源降雨数据在重庆市中小流域短期水文预报中的应用

孙 健^{1,2}, 黄鹏程^{1,2}, 赵军伟^{1,2}, 陈 钰^{1,2}

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;
2. 贵州省建筑信息模型(BIM)工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 以山地城市(重庆市)境内四条中小流域为例, 引入 GPM-IMERG 遥感降水数据作为卫星降水数据来源, 分别采用平均偏差校正法、线性回归模型和改进地理加权回归法实现其与地面站点实测数据融合, 采用留一验证法进行融合降水数据的精度评估, 并将各类降水数据输入 SWAT 模型模拟实际流域径流。结果表明, 改进地理加权回归法对降雨数据的融合效果最佳, 流域地形对 IMERG-early 数据及融合方法精度影响较大, 在地势较低且地形起伏变化小的区域, 融合方法精度较高, 而在山丘区精度相对较低; 不同降水数据驱动 SWAT 模型得到的径流计算值均与实测值吻合较好, 且经改进地理加权法融合后的降水数据模拟径流最准确。结果可为 IMERG-early 卫星降水数据在类似中小流域水文预报的应用提供借鉴。

关键词: 重庆市中小流域; 短期水文预报; IMERG-early 降水数据; 数据融合

中图分类号: TV121⁺.1; TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0009-04

1 引言

山地城市具有地形落差大、气象条件复杂等特点, 在持续性降雨过程中易引发洪涝灾害。为减少不利影响, 提高水资源调度、配置和利用效率, 实现水资源利用可持续发展, 开展流域水文预报工作十分关键^[1]。在使用水文模型进行径流预报时, 降雨资料是最重要的信息之一, 降雨的时空变化严重影响径流量和径流峰值等关键水文信息。对于山地丘陵地带的中小流域, 降雨通常表现的空间分布不均匀, 地面雨量站数据代表的区域非常有限, 很难反映降雨的空间分布。随着地理信息技术的发展及其与模型的结合应用, 大量研究表明卫星降水数据能取得不错的水文模拟效果^[2]。然而, 目前大部分研究均是卫星降水数据单一的与地面雨量站实测降雨进行对比分析和精度评价^[3-6], 在径流预报中直接分析多种降雨数据模拟效果的准确性的较少。冉勇^[7]针对多种降雨数据融合的方法融合降水数据, 但该过程中仍存在精度不足的情况, 且未考虑地形对数据的影响。重庆市水资源和植被覆盖种类丰富, 多年平均降雨量为 1 000~1 350 mm, 多年平均气温 16~18 °C, 多年平均蒸发量为 920~1 570 mm。作为长

江上游地区经济中心、中西部综合交通枢纽等重要区域, 开展重庆市预防洪涝灾害工作具有重要的现实意义。因此, 针对山地城市水文预报存在的降水数据精度不够、无法为模型提供率定参数的实测数据等问题, 本文以重庆市为例, 通过采用 IMERG-early 卫星降水数据融合地面站点实测降雨数据的方法, 提高了降水数据的精确性, 并将融合后的降雨数据输入 SWAT, 以期对缺资料地区水文预报研究提供参考。

2 研究资料

根据流域内水文站分布情况将重庆市境内四个典型流域(鱼溪河、花溪河、五布河、一品河流域)视为研究区域(流域指标参数见表 1)并进行划分, 见图 1。

表 1 研究流域参数

Tab. 1 Parameters of studied watershed

流域名称	流域面积/km ²	河流长度/km
鱼溪河	128	34.2
花溪河	196	63.6
五布河	872	84.4
一品河	350	59.8

为探讨卫星降水数据与地面站点实测降水数据的融合效果及其在短期水文预报中的应用前

收稿日期: 2022-06-20, 修回日期: 2022-08-14

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2019]5301号)

作者简介: 孙健(1983-), 男, 硕士、正高级工程师, 研究方向为水处理及水环境, E-mail: sjian686@163.com

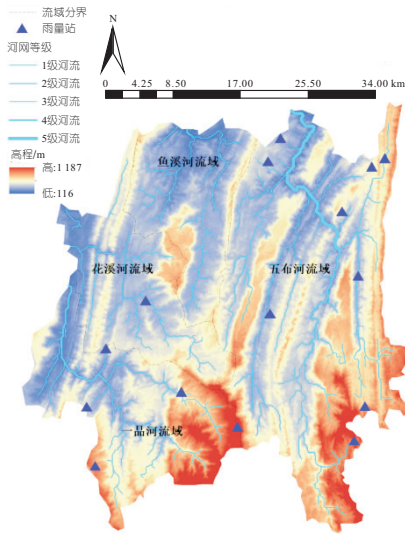


图 1 研究流域

Fig. 1 Study basin

景,以重庆市巴南区水利局提供的四个典型流域共计 15 个雨量站的实测日降水数据为基础资料,时间跨度为 2017 年 6 月 30 日~2020 年 11 月 30 日。

3 研究数据与方法

3.1 GPM 卫星降水数据

卫星降水数据时效性强、覆盖面广,可有效弥补地面雨量站和地基雷达的不足。相较于其他卫星降水,全球降雨观测计划(GPM)卫星降水因其测量设备和反演算法先进,其数据在时空分辨率上更具优势。针对卫星降水数据优选最佳融合方法,并探讨其在中小流域短期水文预报中的应用效果,故选择 Early-Run 数据进行融合分析。根据研究流域的位置和边界,确定卫星数据的空间范围为 105.3° W、28.15° S、110.13° E、32.13° N,时间跨度为 2017~2020 年,时间间隔为 0.5 h,空间精度为 0.1°。

3.2 卫星与地面站点降水数据融合

3.2.1 平均偏差校正法

平均偏差校正法(MBC)假设在整个流域范围内卫星降水数据与地面实测降水数据具有一定的偏差,利用该总体平均偏差来校正卫星降水数据,校正因子 K 计算式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n P_{gi}}{\sum_{i=1}^n P_{si}} \quad (1)$$

式中, n 为地面雨量站的数量; P_{gi} 为各雨量站实测日降水值; P_{si} 为对应雨量站位置的 IMERG-early 卫星降水数据。

MBC 方法的优点是原理简单、易操作,针对某些特定流域和情况使用效果好,该方法本质属

于全局校正,忽略了降水的时空异质性。

3.2.2 线性回归模型

线性回归模型(LRM)是将地面站点观测降水与对应网格的 IMERG-early 降水作相关性分析。假设 IMERG-early 卫星降水数据与地面站点实测降水数据间的线性回归方程为:

$$P_g = AP_s + B \quad (2)$$

式中, P_g 、 P_s 分别为地面站点实测降水数据、对应网格的 IMERG-early 卫星降水数据; A 、 B 均为回归参数。

通过最小二乘法推求线性回归方程为:

$$P_g - \bar{P}_g = r(P_s - \bar{P}_s)\sigma_{P_g} / \sigma_{P_s} \quad (3)$$

式中, r 为相关系数; \bar{P}_g 、 \bar{P}_s 分别为地面站点实测降水数据、IMERG-early 卫星降水数据的均值; σ_{P_g} 、 σ_{P_s} 分别为地面站点实测降水数据 P_g 、IMERG-early 卫星降水数据 P_s 的均方差。

通过显著性检验后,将线性回归方程应用到流域 IMERG-early 卫星降水数据,即可得到线性回归模型的融合降水值。

3.2.3 改进地理加权回归法

地理加权回归(GWR)是将数据的空间特征融合进模型中,可度量区域内降水误差的空间分布。模型构建过程包括空间权重函数与带宽的选择及基于地理加权回归法的降雨模型构建两大部分。回归模型数学表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \epsilon_i \quad (4)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

式中, y_i 为对应 i 点处的降水量; $\beta_0(u_i, v_i)$ 、 $\beta_k(u_i, v_i)$ 分别为 i 点处的常数项回归参数、第 k 个变量在 i 处的回归参数; (u_i, v_i) 为第 i 个观测点的空间位置坐标; X_{ik} 为观测点 i 处 y 的第 k 个自变量; ϵ_i 为服从独立同分布的第 i 个观测点的残差。

计算各地面实测降水值与 IMERG-early 卫星降水数据的差值,以此为基础利用 GWR 法估计研究区内卫星降水网格中心坐标处的降水误差。选用改进的高斯模型来拟合克里金法中的变异函数。将回归残差插值后的结果与降水背景场叠加得到融合降水数据。

在 R 语言环境下,基于 GWmodel 程序包,选用 Gauss 函数作为空间权重函数,采用 AIC 信息准则法对自适应带宽进行优选。

3.3 预报模型

采用 SWAT 模型对四个流域水文情况进行分析。以流域高程数据及预处理得到的水系矢量

资料为基础,通过调整子流域集雨面积阈值,可得到划分的子流域。选择水文站实测径流资料作为模型率定和验证数据。

4 结果与讨论

4.1 融合降水数据验证

研究区域内共有 15 个雨量站可提供实测降雨数据,相对样本数量较少,故采用留一验证法评价融合降水数据。将每个雨量站的实测降雨数据(2017 年 6 月 30 日~2020 年 11 月 30 日)为单元划分为 15 个子样本。融合降水估计值计算方法为:①选取 15 个子样本中的 14 个数据作为训练数据;②将雨量站实测降水数据与 IMERG-early 卫星降水数据分别采用 MBC、LRM、GWR 构建降水数据融合模型;③将剩余 1 个数据代入构建的降水数据融合模型中获得该雨量站的融合降水估计值;④重复前三步至得到所有站点的融合降水估计值。采用相关系数、平均绝对误差、均方根误差为评价指标,对得到的融合降水数据与地面站点实测降水进行精度评价,将每次评价结果平均后作为度量融合方法准确性的指标。各融合模型精度评价结果见表 2。

表 2 不同融合模型降水数据精度评价结果

Tab. 2 Evaluation results of precipitation data for different fusion models

降水数据	相关系数	平均绝对误差/mm	均方根误差/mm
IMERG-early	0.532	4.64	7.93
GPM_MBC	0.691	2.37	7.82
GPM_LRM	0.722	2.49	6.86
GPM_GWR	0.789	2.23	5.43

由表 2 可知,IMERG-early 卫星降水数据与地面站点实测降水数据间具有一定的相关性,同时数据序列间绝对误差、均方根误差在可接受范围内,在缺少雨量站实测数据的情况下,可使用 IMERG-early 卫星降水数据作为补充,进行相关研究与应用。另一方面,通过三种方法融合后的降水数据,其指标均较 IMERG-early 卫星降水数据得到较大提升。其中 GWR 融合后的降水数据提升度最高,与 IMERG-early 卫星降水数据相比,GPM_GWR 相关系数提高了 0.257,平均绝对误差、均方根误差分别减少了 2.41、2.50 mm。

各降水数据日平均降雨量分布见图 2。由图 2 可知,与地面站点实测数据相比,IMERG-early 卫星降水数据对降雨数值估值较高,且强降雨中心分布更广。其强降雨中心主要集中在整个流域的东南部 and 南部,该区域地貌以山丘为主,地形复杂,卫星降水数据精度较低,而流域东北部 IMERG-early 降水与观测不一致可能是由于该区域雨量站数量过少,观测值偏低。平均偏差法和线性回归模型融合后的降水数据强降雨分布中心较相似,但相较于地面实测数据有较明显误差,降雨中心面积均有所削减,且仍存在降雨数值高估现象。改进地理加权回归法融合降水数据从强降雨分布和降水强度上相较于平均偏差法、线性回归模型、IMERG-early 卫星降水数据与地面站点实测数据更匹配。

图 3 进一步给出了 2018、2019 年 IMERG-early 卫星降水数据、改进地理加权回归法融合降水数据分别与对应观测降水的差值分布。由图 3 可知,差值均主要分布在流域南部山丘区域。相

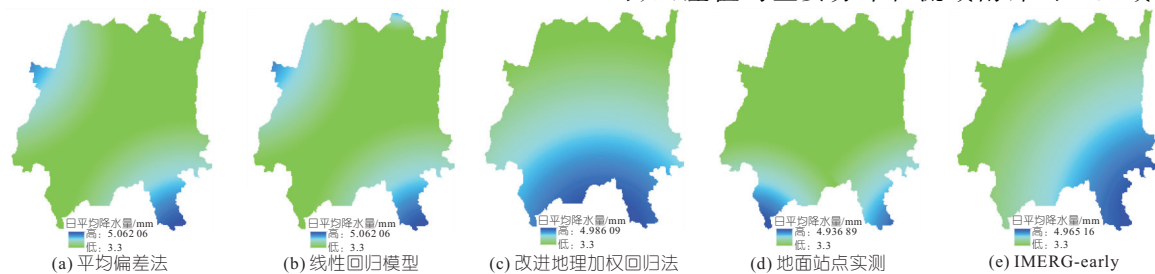


图 2 研究区不同降水数据日平均降雨量分布(2017~2020 年)

Fig. 2 Daily average rainfall distribution of different precipitation data from 2017 to 2020

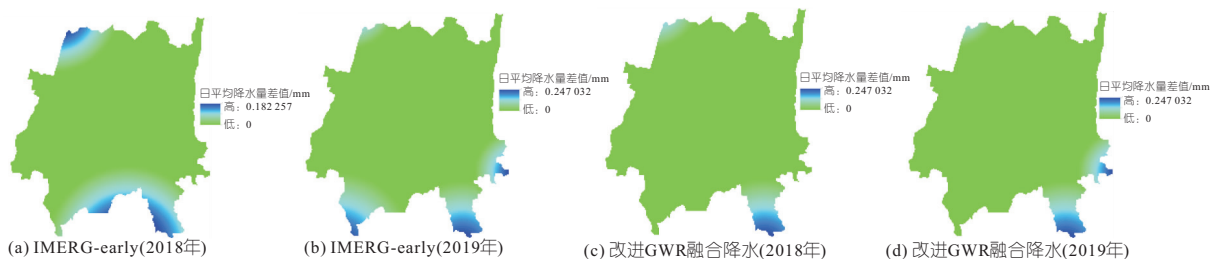


图 3 研究区不同来源降水数据与实测降水差值分布

Fig. 3 Distribution of error between precipitation data from different sources and measured precipitation in study area

较于原始的 IMERG-early 卫星降水数据,经改进地理加权回归法融合后其精度有明显提升。因此,尽管在山丘等地势变化大的地带精度有所降低,改进地理加权回归法仍可作为缺资料平原或山丘区提升卫星降水数据精度的融合校正方法。

4.2 基于 SWAT 的径流模拟分析

为了探究融合降水数据在研究区实际径流水文预报中的适用性,对研究区四个流域进行了基于 SWAT 模型的径流预报结果分析。采用相关性系数(R^2)和纳什系数(N_{NSE})评价不同降水数据径流模拟精度,结果见表 3。由表 3 可知,所提出的三种降水数据融合方法在四个流域径流模拟中均表现良好,各融合模型率定期和验证期的 R^2

分别在 0.75、0.70 以上,验证期均在 0.65 以上, N_{NSE} 分别在 0.70、0.65 以上,整体模拟效果较好,表明采用融合降水数据驱动 SWAT 模型研究流域的水文预报具有良好的应用前景。另外,与其他两种融合方法相比,改进地理加权回归法校正的降水数据在四个流域径流模拟中均表现最优。通过横向比较四个流域径流模拟结果,不同降水数据模拟径流的准确性均与该流域地形地貌有一定的相关度。流域径流模拟精度高低排序为鱼溪河流域>花溪河流域>五布河流域>一品河流域。鱼溪河流域地势相对较低且坡度平缓,而一品河和五布河流域有较多山丘,地形复杂、地势高差起伏较大,对卫星降水产品的精度有不利影响。

表 3 不同流域模拟精度评价结果

Tab. 3 Evaluation results of simulation accuracy for different basin

降雨数据	一品河流域				五布河流域				花溪河流域				鱼溪河流域			
	率定期(2017~2019年)		验证期(2020年)		率定期(2017~2019年)		验证期(2020年)		率定期(2017~2019年)		验证期(2020年)		率定期(2017~2019年)		验证期(2020年)	
	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2	N_{NSE}	R^2
雨量站	0.708	0.768	0.659	0.727	0.742	0.845	0.732	0.765	0.786	0.852	0.747	0.812	0.816	0.883	0.765	0.854
GPM_GWR	0.769	0.863	0.765	0.832	0.820	0.899	0.768	0.832	0.832	0.911	0.777	0.867	0.859	0.943	0.798	0.882
GPM_LRM	0.723	0.812	0.663	0.789	0.776	0.852	0.719	0.821	0.781	0.863	0.727	0.846	0.812	0.881	0.742	0.863
GPM_MBC	0.653	0.776	0.625	0.756	0.740	0.884	0.656	0.808	0.751	0.892	0.667	0.854	0.772	0.913	0.682	0.872
IMERG-early	0.552	0.783	0.593	0.727	0.652	0.831	0.568	0.788	0.652	0.846	0.634	0.801	0.673	0.862	0.696	0.813

5 结论

a. 为解决流域雨量站数据少、水文预报开展困难的问题,以典型中小流域为研究对象,采用三种方法融合卫星降水与地面雨量站实测数据,确定改进地理加权回归法融合降水数据较原始数据在精度上有较大提升,对径流水文预报研究有较高应用价值。

b. 建议今后进一步研究考虑不同时间尺度的遥感数据误差和降水误差对水文预测的影响。

参考文献:

[1] 杨文发,王乐,张俊. 流域多尺度水文预报应用进展及适用性探讨[J]. 人民长江,2021,52(10):84-94.
 [2] 许心怡,李建柱,冯平. 不同降水产品在滦河流域径流

模拟中的适用性[J]. 水力发电学报,2021,40(12):25-39.
 [3] 黄依之,张行南,方圆皓. 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.
 [4] 张华龙,肖柳斯,陈生,等. 基于 GPM 卫星的广东汛期降水日变化特征与评估[J]. 热带气象学报,2020,36(3):335-346.
 [5] 刘兆晨,杨梅学,王学佳,等. GPM 和 IRMM 卫星日降水数据在黄河源区的适用性分析[J]. 冰川冻土,2020,42(2):575-586.
 [6] LYU AIFENG,ZHOU LEI. A rainfall model based on a geographically weighted regression algorithm for rainfall estimations over the Arid Qaidam Basin in China[J]. Remote sensing,2016,8(4):256-278.
 [7] 冉勇. 基于 SWAT 模型重庆市无资料中小流域短期水文预报研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.

Application of Multi-source Precipitation Data in Short-term Hydrological Forecast of Small and Medium-sized Watersheds in Chongqing City

SUN Jian^{1,2}, HUANG Peng-cheng^{1,2}, ZHAO Jun-wei^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}

(1. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

2. Engineering Research Center of Building Information Model of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: Taking four small and medium-sized watersheds in the mountainous city (Chongqing) as the research objects, the application prospects of multi-source rainfall data in short-term hydrological forecasting were explored. The GPM-IMERG remote sensing precipitation data was introduced as the source of the satellite precipitation data, and the Mean Bias Correction (MBC) method, Linear Regression Model (LRM) and Geographically Weighted Regression (GWR) method were used to realize the fusion with the ground station measured data. A leave-one-out validation method was used to evaluate the accuracy of the fused precipitation data, and the SWAT model was applied to simulate the runoff of the selected basins using the precipitation data corrected by MBC, LRM, GWR, the original IMERG-early, and the measured data. The results show that the GWR was the best fused effect. The topography had great influence on the accuracy of the IMERG-early data and the fusion method. The accuracy of the fusion method was relatively high in low elevation regions, while in mountainous areas, the accuracy became low comparatively. The results showed a better agreement between the SWAT model and the measured runoff process using all kinds of precipitation data, in which the model using precipitation data corrected by GWR method was more accurate. Results can be referenced for hydrological forecast in similar small basins in the future.

Key words: small and medium-sized watersheds in Chongqing City; short-term hydrological forecast; IMERG-early precipitation data; data fusion