

# 国家级降水融合产品在山洪模拟中的适用性研究

旷兰<sup>1</sup> 田茂举<sup>1</sup> 康俊<sup>2</sup> 李奇临<sup>3</sup> 刘祥<sup>4</sup> 李深智<sup>4</sup>

(1 重庆市綦江区气象局, 重庆 401420; 2 重庆市气候中心, 重庆 401147;

3 重庆市气象信息与技术保障中心, 重庆 401147; 4 重庆市气象服务中心, 重庆 401147)

**摘要:** 利用SRTM数字高程DEM模型、土地利用数据, 以ArcGIS为平台, 以綦江流域为研究对象, 基于自动气象站降水数据、多源降水融合产品等5种不同降水数据, 采用泰森多边形法计算其逐小时流域面雨量, 驱动FloodArea水动力模型, 对2021年8月8日16时—9日10时綦江流域出现的一次山洪过程进行山洪淹没模拟, 对得到的模拟水深与实测水位进行效果检验。结果表明: 1) 5种降水数据模拟的淹没水深在5个水文站的相关系数均较高, 96%的相关系数达到了0.93, 其中AWS、RT和NRT降水数据模拟的淹没深度效果都较好, 相关系数最高可达0.9857; 2) 整体上模拟水位与实测水位的过程变化基本一致, 但在峰值上, 模拟水位具有1~2 h的滞后性, 模拟的洪峰水位略微偏低; 3) 5种降水数据模拟的山洪过程拟合度较高, 确定性系数均达到了0.8715以上, 96%的比例达到了0.9215, 其中最高为0.9831; 4) 5种降水数据模拟的山洪可信度较高, 纳什效率系数均达到了0.8687以上, 96%的比例达到了0.9202, 其中最高为0.9817。

**关键词:** CMPAS, FloodArea, 山洪模拟, 泰森多边形

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.01.007

## Applicability of National Precipitation Fusion Products in Mountain Flood Simulation

Kuang Lan<sup>1</sup>, Tian Maoju<sup>1</sup>, Kang Jun<sup>2</sup>, Li Qilin<sup>3</sup>, Liu Xiang<sup>4</sup>, Li Shen zhi<sup>4</sup>

(1 Chongqing Qijiang District Meteorological Bureau, Chongqing 401420 2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147 3 Chongqing meteorological information and technology support center, Chongqing 401147 4 Chongqing meteorological service center, Chongqing 401147)

**Abstract:** By using SRTM digital elevation DEM model and land use data, we took ArcGIS as the platform and Qijiang River Basin as the research object, and adopted five different types of precipitation data such as automatic weather station precipitation data and multi-source precipitation fusion products to calculate the hourly basin area rainfall with Tyson polygon method. The FloodArea hydrodynamic model was driven to simulate the water depth of a mountain flood process in Qijiang River Basin from 16:00 8 August to 10:00 9 August 2021. And then the simulated water depth and the measured water level were compared and analyzed. The study shows that 1) the correlation coefficients between the simulated depth and the measured depth from five types of precipitation data all reach a relatively high level, with 96% as high as 0.93. The highest correlation coefficient of 0.9857 can be found in AWS, RT and NRT data; 2) On the whole, the simulated water level is basically consistent with the measured water level, but on the peak, the simulated water level has a lag of 1-2 hours, with slightly lower peak level from the simulated data; 3) The mountain torrent processes simulated by five types of precipitation data exhibit high fitting degree, and all of the certainty coefficients are equal to or higher than 0.8715, with 96% as high as 0.9215 and 0.9831 as the highest; 4) The mountain torrents simulated by five types of precipitation data have high reliability, and the Nash efficiency coefficients exceed 0.8687, with 96% as high as 0.9202 and 0.9817 as the highest.

**Keywords:** CMPAS, FloodArea model, mountain torrent simulation, Tyson polygon

### 0 引言

山洪是指山区中小河流中突发的暴涨性洪水, 具有突发性、流量集中、流速大、冲击力强、破坏性大等特点, 常常造成局地性洪灾, 一般分为暴雨、融

雪、冰川山洪等, 在綦江流域地区最常见的是暴雨山洪。那么如何利用降水数据驱动水文模型进行山洪模拟的效果, 其中最关键的一项就是降水数据质量的好坏, 降水数据质量越高, 那么山洪模拟效果越好, 对防洪调度、防汛抗洪决策等能提供更好的依据。目前, 降水数据一般包括国家气象站与区域自动气象站的降水数据、雷达反演的降水数据、卫星反演的降水数据以及多源融合降水数据等。由于綦江流域地形复杂, 受天气气候等外界因素较大, 站点空间分布极不

收稿日期: 2021年12月6日; 修回日期: 2022年2月16日

第一作者: 旷兰(1987—), Email: 616032331@qq.com

通信作者: 田茂举(1985—), Email: 147758044@qq.com

资助信息: 重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202110, YWJSGG-202128, YWJSGG-202012)

均匀,难以代表整个流域的实际空间分布。雷达反演的降水数据虽然时空分辨率较高,但受复杂地形影响,常常存在监测盲区,不能全覆盖;而卫星反演的降水数据在空间分辨率上又存在一定的限制,所以亟需一种集地面—雷达—卫星多源融合的高时空分辨率的降水产品。其中CMPAS产品是基于全国质量控制后的逐小时地面站点观测数据、中国气象局气象探测中心研发的逐小时全国雷达定量估测降水产品以及国家卫星气象中心研发的FY2卫星反演降水产品的中国逐小时降水融合实况分析产品,其中FAST为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 二源快速融合产品,FRT为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 三源实时融合产品,RT为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 三源实时融合产品,NRT为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 三源近实时融合产品。此产品首先利用概率密度函数匹配法<sup>[1]</sup>在 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 订正雷达和卫星降水的系统偏差;之后利用贝叶斯模型平均法<sup>[2]</sup>生成中国区域全覆盖的雷达和卫星联合降水场;最后利用最优插值算法<sup>[3-4]</sup>实现 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 和 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 两种空间分辨率的雷达—卫星联合背景场与观测场的有效结合,生成 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 和 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 两种空间分辨率的地面—卫星—雷达三源降水融合产品<sup>[5-9]</sup>。

为了研究上述降水数据在山洪模拟中的适用性,本文首先对比分析各种降水数据空间分布的差异性,然后通过泰森多边形法将不同降水数据生成不同的流域面雨量驱动FloodArea水动力模型<sup>①</sup>运行,分析对比不同降水数据在此次山洪过程中的模拟效果,以期为不同降水数据在山洪预警应用方面提供一定参考。

## 1 研究区域与数据来源

本文的研究区域是綦江流域,采用的数据是2021年8月8日16时—9日10时的逐小时各类降水数据以及SRTM DEM数据。

### 1.1 研究区域

据《綦江年鉴(2020)》记载,綦江区境内的河流属于长江流域河流,而綦江是綦江区境内的最大河流,系长江一级支流,全长为234.7 km,流域面积为7140 km<sup>2</sup>,总落差为1535 m,年平均流量为125.8 m<sup>3</sup>/s。本文利用SRTM数字高程DEM模型,结合ARCGIS水文分析模块,对嵌入河网的DEM进行分析,通过填洼理、汇流等处理,再给定出水口位置,利用流域生成功能,生成綦江流域的水系分布及其流域边界<sup>[17-18]</sup>,如图1。

### 1.2 降水数据

AWS自动气象站逐小时降水数据(以下简称AWS

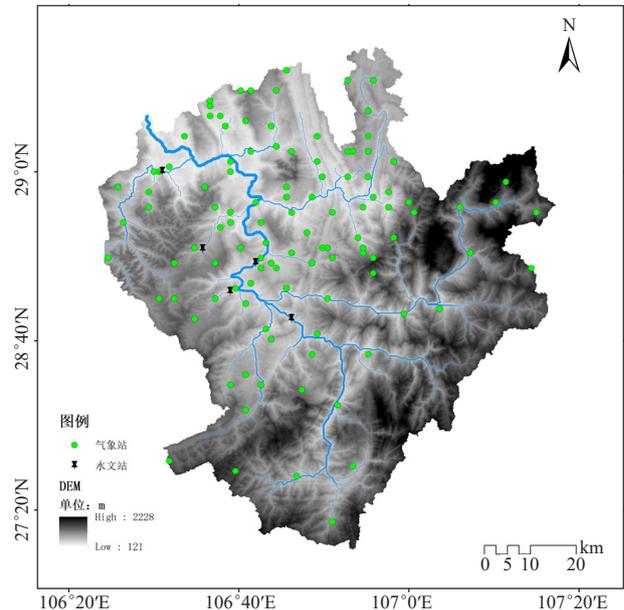


图1 綦江流域地形、水系、自动气象站、水文站分布  
Fig. 1 Distribution of topography, water system, automatic weather stations and hydrological stations in Qijiang River Basin

数据)是包含綦江、万盛、南川南部、桐梓北部、习水东北部在内的共计179个自动气象站点。SURF\_CMPA\_FAST\_5KM(简称FAST产品)是集地面—卫星二源融合的“CMPAS中国 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 逐小时降水快速融合实况分析产品”。SURF\_CMPA\_FRT\_5KM(简称FRT产品)是集地面—卫星—雷达三源融合的“CMPAS中国 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 逐小时降水实时融合实况分析产品”。NAFP\_NMIC\_ART\_CMPAS\_0P01\_CHN\_HN\_1KM\_RT(简称RT产品)是集地面—卫星—雷达三源融合的“CMPAS中国 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 逐小时降水实时融合实况分析产品”。NAFP\_NMIC\_ART\_CMPAS\_0P01\_CHN\_HOR\_PRE\_NRT(简称NRT产品)是集地面—卫星—雷达三源融合的“CMPAS中国 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 逐小时降水近实时融合实况分析产品”,详见表1。

### 1.3 水位数据

选取綦江流域5个水文站监测点(即,永新·富家、东溪·东丁路、篆塘·盖石场、赶水·岔滩场、郭扶·伍星)2021年8月8日16时—9日10时的逐小时水位数据。

### 1.4 数字高程模型

SRTM DEM是美国航天航空局、美国国家地理空间情报局以及德国航空太空中心的合作项目,它在测绘、水文、气象等领域有着广泛应用,特别是在防洪减灾方面,DEM可以进行汇流分析、降水分析、淹

① Geomer. 2003. Floodarea-Arcview extension for calculating flooded areas(User manual Version 2.4). Heidelberg.

表1 降水数据的时空分辨率

Table 1 Temporal and spatial resolutions of precipitation data

降水数据	空间分辨率	时间分辨率/h	说明
AWS	不均匀	1	国家级自动气象站与区域自动气象站逐小时实况降水数据
FAST	0.05°×0.05°	1	CMPAS中国0.05°×0.05°逐小时降水快速融合实况分析产品
FRT	0.05°×0.05°	1	CMPAS中国0.05°×0.05°逐小时降水实时融合实况分析产品
NRT	0.01°×0.01°	1	CMPAS中国0.01°×0.01°逐小时降水近实时融合实况分析产品
RT	0.01°×0.01°	1	CMPAS中国0.01°×0.01°逐小时降水实时融合实况分析产品

没分析等，由于此次的研究区域——綦江流域面积较小，为尽量确保获取与实际一致的边界，所以本研究采用的是最高数字高程精度（30 m）。

## 2 研究方法

### 2.1 FloodArea水动力模型

FloodArea由德国Geomer公司开发，是一个完全集成在ArcGIS中用于计算洪水区域的2D非恒定流水动力模型，支持淹没深度和淹没区域的流体动力学建模。在基于水动力方法的计算基础上同时考虑了一个栅格周围的八个单元，并对相邻单元的泄入量通过Manning-Stricker公式来计算，再计算每个单元格<sup>[19]</sup>。模型中的相邻单元流量长度被认为是相等的，而位于对角线的单元通过不同的长度算法来实现<sup>[20]</sup>。水流的淹没深度为淹没水位高程和地面高程之差，计算由式（1）表示。淹没时的水流方向由地形坡向决定，而坡向是指地表面一点的切平面的法线矢量在水平面上的投影以及和过该点的正北方向之间的夹角。对于地面上任意一点，坡向表征了该点高程值改变量最大的变化方向，计算由式（2）表示，式中 $\alpha$ 为地形坡度。

$$\text{flow\_depth} = \text{water\_level} - \text{elevation}_a, \quad (1)$$

$$\text{aspect} = 270 - \frac{180}{\delta} \alpha \tan 2 \left[ \frac{\partial Z}{\partial Y} + \frac{\partial Z}{\partial X} \right]^\circ \quad (2)$$

FloodArea模型包括暴雨、溃口、漫顶三种淹没情景，结合实际，本研究模拟暴雨淹没情景。根据降水资料、DEM数据输入模型进行淹没模拟，根据实地考察中的暴雨淹没水深和模拟水深的差异对地表水力糙度<sup>[21]</sup>、地表产流系数<sup>[22]</sup>进行精细率定，计算得到适合綦江流域的模型参数和山洪淹没进程。

### 2.2 泰森多边形法

泰森多边形法是根据离散分布不均的自动气象站降雨数据来计算区域平均降雨量，即，将所有相邻的气象站连成三角形，画每个三角形每条边上的垂直平分线，这样，每个气象站周围的垂直平分线又重新组

成一个新的多边形，此时用这个多边形围城的唯一一个气象站点的降雨量来代表这个多边形范围内的降雨量，同时，称这个多边形为泰森多边形<sup>[23]</sup>，如图2。根据泰森多边形法计算的此次山洪过程中的綦江流域逐小时面雨量，如图3，从变化趋势和极值来看，相较于0.05°×0.05°的产品FAST和FRT，0.01°×0.01°的产品RT和NRT与站点数据AWS相当接近。

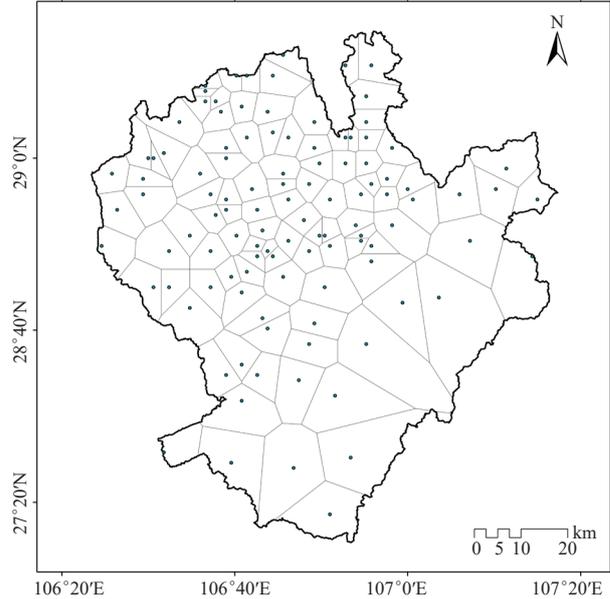


图2 綦江流域的泰森多边形视图

Fig. 2 Tyson polygon view of Qijiang River Basin

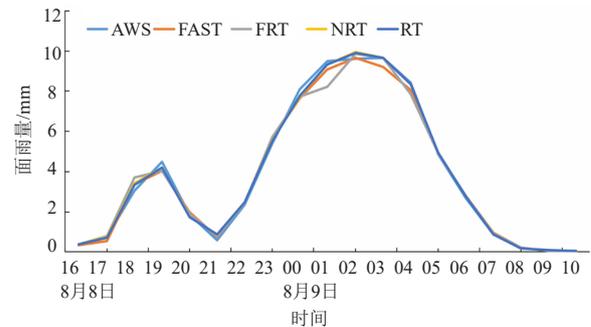


图3 綦江流域降水数据的逐小时面雨量

Fig. 3 Hourly area rainfall of precipitation data in Qijiang River Basin

### 2.3 评估指标

结合《水文情报预报规范》，利用水文站点的实测水位及其对应的模拟淹没深度，选取确定性系数（DC）、纳什效率系数（Nash-Sutcliffe efficiency coefficient，简称NSE）作为评价模拟结果的好坏。其中，DC是指洪水模拟过程与实测过程之间的吻合程度，它更侧重于洪水过程线的拟合，以提高洪水整体的拟合程度<sup>[24]</sup>，越接近1时，模拟结果越好；越接近0时，模

拟结果越差。NSE的取值范围为 $-\infty \sim 1$ ，越接近1时，模拟结果越好，可信度也越高；越接近0时，模拟结果接近实测值平均水平，也就是说总体可信，但过程模拟误差大。

$$DC = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}. \quad (4)$$

式中， $X_i$ 和 $\bar{X}$ 分别为水文站点的实测水深序列及其平均值， $Y_i$ 和 $\bar{Y}$ 分别为对应实测点所模拟的淹没深度序列及其平均值， $N$ 为序列总样本数。

### 3 结果与分析

在此次山洪淹没模拟过程中，对CMPAS的4种多源降水融合实况产品以及自动气象站降水数据进行山洪淹没模拟得到模拟水深，再分别与各水文站点的逐小时实测水位进行评估检验。

### 3.1 模拟的淹没深度与水位的关系

根据5种降水数据，分别利用泰森多边形法计算此次过程的綦江流域逐小时面雨量，并对FloodArea模型输入除面雨量以外的其他参数，如綦江流域的DEM高程、地表产流系数、地表水力糙率等，应用水动力模型对此次过程进行模拟，步长选取1 h，得到逐小时的綦江流域淹没情况。根据流域5个水文站监测点的经纬度，提取其对应的淹没深度。建立各水文监测点模拟的逐小时淹没深度与实测水位的线性相关关系图(图4)，结果发现，5种降水数据在5个水文站的相关系数均较高，96%的比例相关系数达到了0.93，其中AWS、RT和NRT降水数据模拟的淹没深度效果都较好，相关系数最高可达0.9857。

### 3.2 各降水数据模拟水位分析

为进一步讨论面雨量对綦江流域水位<sup>①</sup>的影响<sup>[25]</sup>，根据各监测水文站点模拟的淹没深度与实测水位的相关关系，计算对应的逐小时模拟水位，得到5种降水数据的模拟水位与实测水位的变化曲线，如图5，整体上模拟水位与实测水位的过程变化趋势基本保持一

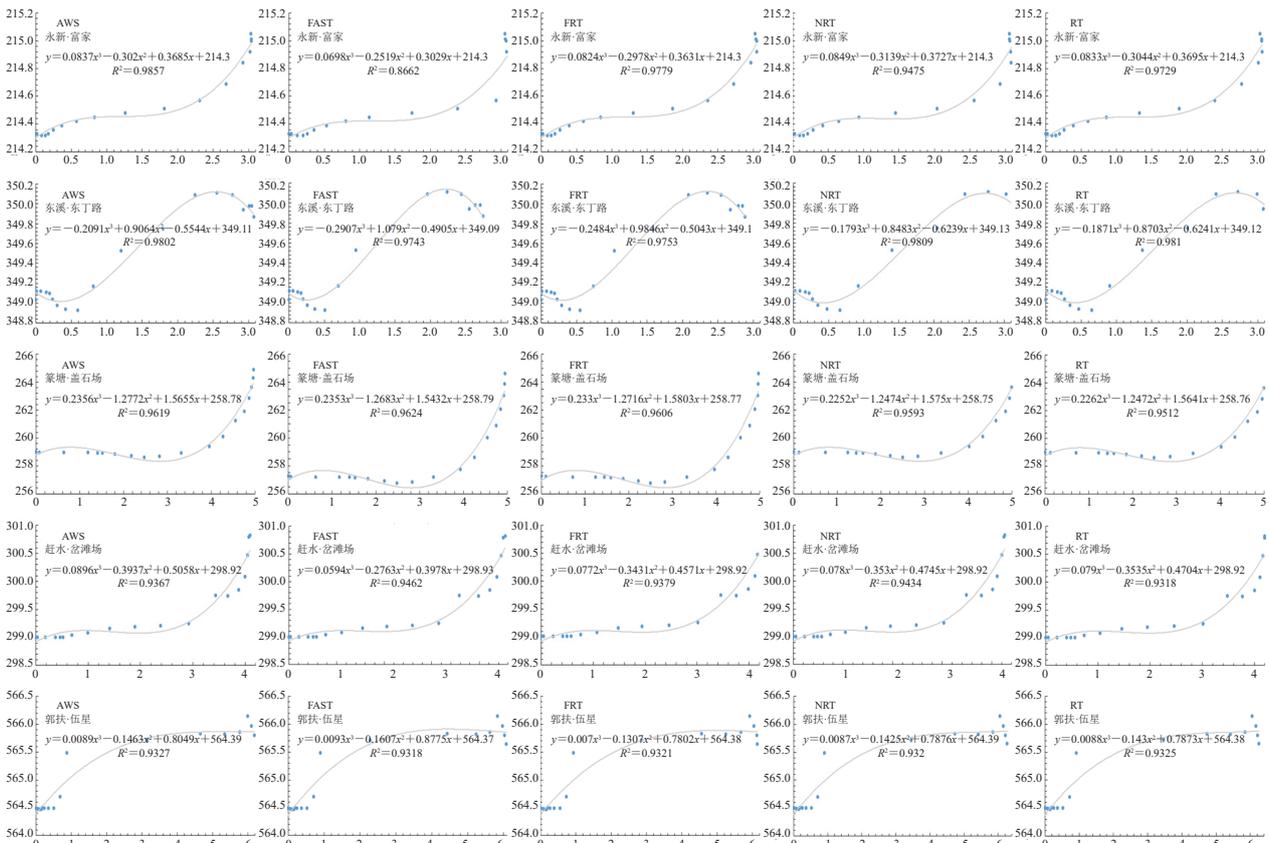


图4 降水数据模拟的淹没深度(单位: m)与实况水位(单位: m)的相关关系

Fig. 4 Correlation between simulated inundation depth of precipitation data (unit: m) and actual water level (unit: m)

① 水文情报预报规范[GB/T22482-2008].

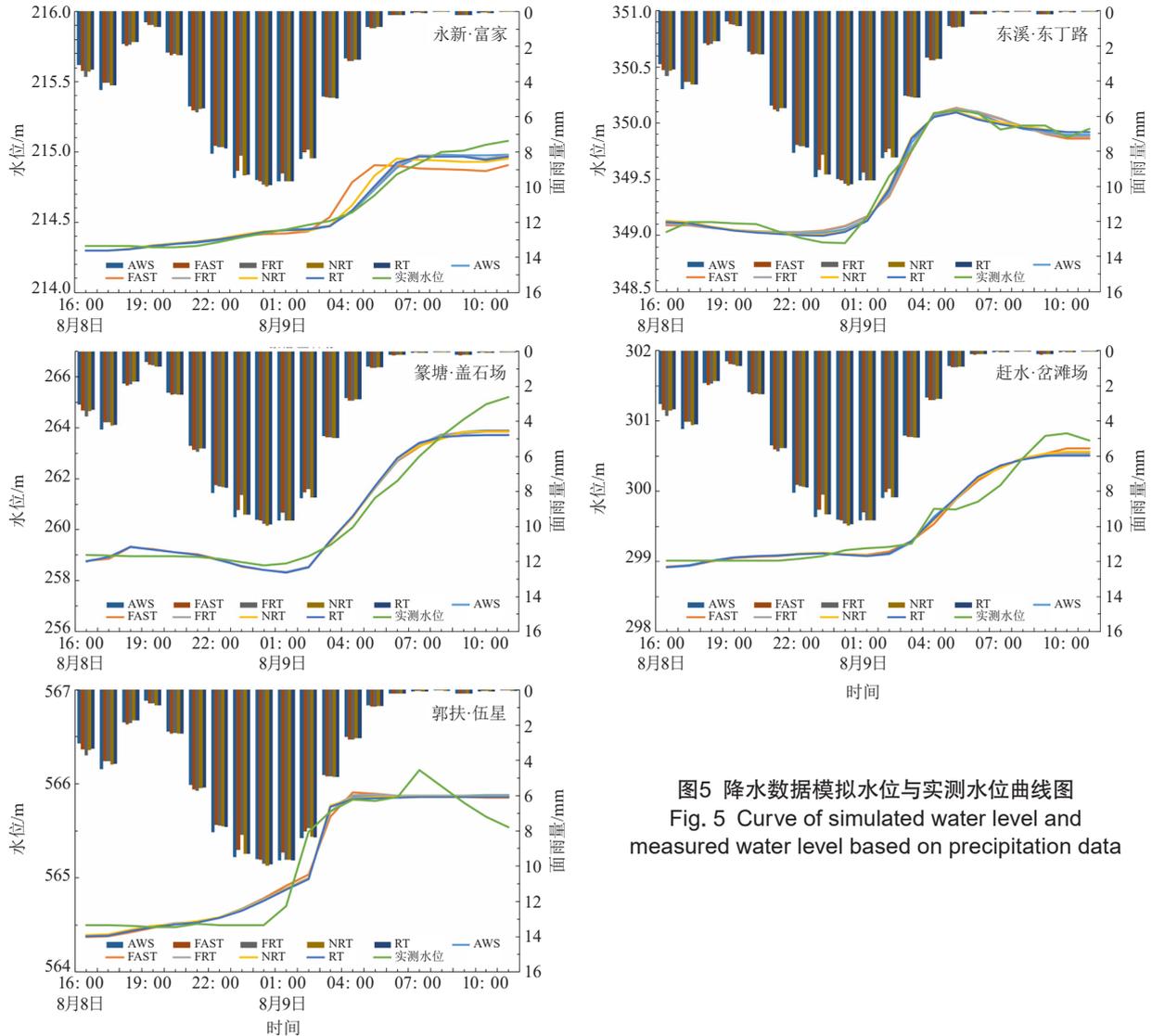


图5 降水数据模拟水位与实测水位曲线图  
Fig. 5 Curve of simulated water level and measured water level based on precipitation data

致，模拟效果较好，但是在峰值上，模拟水位具有1~2 h的滞后性，模拟的洪峰水位也略微偏低。由于綦江流域地形复杂，多山地，降水数据受地形影响较大，FAST产品在此次山洪过程中特别是永新·富家站点体现出了一定的不稳定性，再加上DEM分辨率最高仅仅为30 m，不足以完全准确地模拟真实的山洪沟，这可能是造成此次过程FAST产品的模拟水位不稳定的主要原因之一。

### 3.3 逐小时淹没深度模拟结果的评估

利用不同降水数据驱动模型得到淹没水深和水位高度，并与实测结果进行对比分析，结果发现，如表2、图6a，5种降水数据的确定性系数均达到了0.8715以上，96%的比例达到了0.9215，其中最高达到了0.9831，这充分说明了5种降水数据在山洪淹没深度模拟过程与实测过程的拟合程度较高，模拟效果较好，有自动气象站点在极端降水极值的模拟上体现得

更加充分，所以整体效果来看，自动气象站降水数据AWS更具优势，除了FAST在永新·富家站点处体现出了一定的不稳定性，其他3种CMPAS降水融合产品的拟合也达到了很好的效果，所以在地形复杂、气候条件恶劣的地理条件下，可以采用其他FRT、NRT、RT三种产品代替自动气象站降水数据。

表2 降水数据的确定性系数 (DC) 评估结果  
Table 2 Evaluation results of DC of precipitation products

监测点	AWS	FAST	FRT	NRT	RT
永新·富家	0.9831	0.8715	0.9758	0.9467	0.9707
东溪·东丁路	0.9807	0.9739	0.9753	0.9817	0.9818
篆塘·盖石场	0.9566	0.9567	0.9546	0.9538	0.9443
赶水·岔滩场	0.9441	0.9539	0.9450	0.9505	0.9389
郭扶·伍星	0.9222	0.9225	0.9223	0.9215	0.9219

同理，如表3、图6b，发现5种降水数据的纳什效率系数均达到了0.8687以上，96%的比例达到了0.9202，其中最高达到了0.9817，这充分说明了5种

表3 降水数据的纳什效率系数 (NSE) 评估结果

Table 3 Evaluation results of NSE of precipitation products

监测点	AWS	FAST	FRT	NRT	RT
永新·富家	0.9816	0.8687	0.9744	0.9454	0.9692
东溪·东丁路	0.9806	0.9737	0.9753	0.9816	0.9817
篆塘·盖石场	0.9539	0.9536	0.9515	0.9508	0.9409
赶水·岔滩场	0.9431	0.9536	0.9441	0.9500	0.9379
郭扶·伍星	0.9204	0.9213	0.9209	0.9202	0.9212

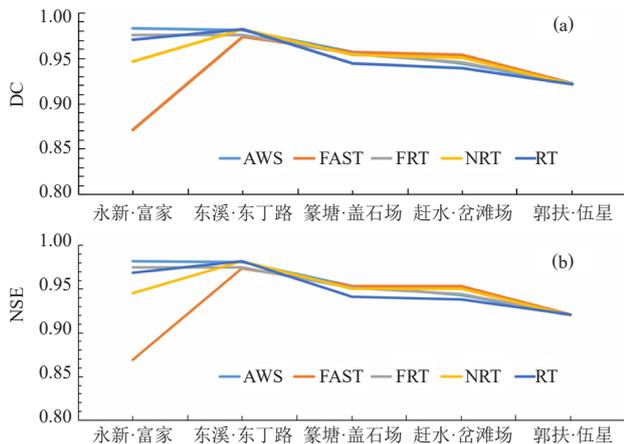


图6 降水数据的确定性系数 (DC, a) 和纳什效率系数 (NSE, b) 在各监测点的分布

Fig. 6 Distribution of DC (a) and NSE (b) of precipitation data at each monitoring point

降水数据的山洪淹没深度模拟结果较好, 可信度也较高。

## 4 结论与讨论

本文利用SRTM DEM、土地利用数据, 以ArcGIS为平台, 以綦江流域为研究对象, 基于自动气象站降水数据、多源降水融合产品等5种不同降水数据, 采用泰森多边形法计算其逐小时流域面雨量, 驱动FloodArea水动力模型, 对2021年8月8日16时—9日10时綦江流域出现的一次山洪过程进行山洪淹没模拟得到的模拟结果与实测结果进行效果检验, 得出以下结论:

1) 基于不同降水数据得到的模拟结果与实测相比, 5种降水数据在5个水文站的相关系数均较高, 96%的相关系数达到了0.93, 其中AWS、RT和NRT降水数据模拟的淹没深度效果都较好, 相关系数最高可达0.9857;

2) 整体上模拟水位与实测水位的过程变化趋势基本一致, 但在峰值上, 模拟水位具有1~2 h的滞后性, 模拟的洪峰水位略微偏低;

3) 5种降水数据模拟的山洪过程拟合度较高, 确定性系数均达到了0.8715以上, 96%的比例达到了

0.9215, 其中最高为0.9831;

4) 5种降水数据模拟的山洪可信度较高, 纳什效率系数均达到了0.8687以上, 96%的比例达到了0.9202, 其中最高为0.9817。

综上所述, CMPAS多源降水融合产品和自动气象站降水数据在FloodArea山洪模拟中过程模拟效果均较好、可信度较高, 具有很好的应用前景, 尤其是在地面雨量站分布比较稀疏或者气候条件复杂的山区, 为山洪的再现模拟提供了可行性。

## 参考文献:

- [1] 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进. 应用气象学报, 2013, 24(5): 544-553.
- [2] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合试验. 气象学报, 2015, 73(1): 177-186.
- [3] 沈艳, 潘旸, 徐宾, 等. 最优插值法在中国自动站降水量空间分析中的参数优化. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(2): 219-224.
- [4] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. 气象学报, 2012, 70(6): 1381-1389.
- [5] 潘旸, 古军霞, 徐宾, 等. 多源降水数据融合研究及应用进展. 气象科技进展, 2018, 8(1): 142-152.
- [6] 潘旸, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验. 气象学报, 2018, 76(5): 95-106.
- [7] 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. 大气科学学报, 2013, 36(1): 37-46.
- [8] 许冠宇, 李琳琳, 田刚, 等. 国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估. 暴雨灾害, 2020, 39(4): 400-408.
- [9] 史岚, 万逸波, 张狄, 等. CMPA降水资料在中国地区不同地形下的精度评价研究. 气象科学, 2018, 38(5): 616-624.
- [10] 周杰, 陈良吕, 徐彦平, 等. 重庆市清江河流域山洪致灾临界雨量研究. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 42-48.
- [11] 童星, 裴毅. 地表糙度与水力糙率间关系的试验研究. 湖南农机, 2011, 38(3): 35-37.
- [12] 陈慧忠, 汪博炜, 黄锋. 基于FloodArea淹没模型的一次暴雨过程洪涝灾害模拟. 广东气象, 2019, 41(1): 40-42.
- [13] 周杰, 刘晓冉, 康俊, 等. 基于FloodArea的三峡库区小流域山洪雨量分析. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 697-704.
- [14] 吴秀兰, 江远安, 余行杰, 等. 基于FloodArea的新疆依格孜牙河流域山洪灾害风险区划. 干旱气象, 2019, 37(4): 663-669.
- [15] 谢五三, 吴蓉, 丁小俊. 基于FloodArea模型的城市内涝灾害风险评估与预警. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2848-2855.
- [16] 谢五三, 田红, 卢燕宇. 基于FloodArea模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 384-387.
- [17] 俞雷, 刘洪斌, 武伟. 基于DEM的重庆三峡库区流域水系提取研究. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 215-218.
- [18] 康俊, 孙佳, 程炳岩. 基于ArcHydroTools的涪江流域特征自动提取分析. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(6): 83-87.
- [19] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and in frared data at high spatial and temporal resolution. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5: 487-503.
- [20] 苏布达, 姜彤, 郭业友, 等. 基于GIS栅格数据的洪水风险动态模拟模型及应用. 河海大学学报, 2005, 33(4): 370-374.
- [21] 张洪江, 北原耀, 解明曙, 等. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究. 北京林业大学学报, 1994, 16(s4): 86-91.
- [22] 甘衍军, 李兰, 杨梦斐. SCS模型在无资料地区产流计算中的应用. 人民黄河, 2010, 32(5): 30-31.
- [23] 张涛, 王祥, 杨欣玥, 等. 雨量计算方法对水文模拟的影响. 人民长江, 2017, 48(19): 42-47.
- [24] 孙娜, 周建中, 张海荣, 等. 新安江模型与水箱模型在柘溪流域适用性研究. 水文, 2018, 38(3): 37-42.
- [25] 重庆市地方志办公室. 綦江年鉴(2020). 成都: 四川民族出版社, 2020.