

DOI:10. 3876/j. issn. 1000 - 1980. 2026. 02. 006

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

齐晟慰^{1,2}, 谷黄河^{1,2}, 王玉明³, 杨 云³, 孟 健³, 余钟波^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院; 3. 杭州市水文水资源监测中心)

摘要: 以具有较高精度的融合降水产品 CMORPH 与 CMFD 作为模型输入, 以新安江流域上游屯溪流域 2013—2018 年 18 场洪水过程为研究对象, 分析了两种融合降水产品在屯溪流域降水量的时空分布特征, 探究了两种融合降水数据驱动 WRF-hydro 模型对中小尺度流域山洪过程模拟的适用性。结果表明: 对比站点观测降水, CMORPH 融合降水数据在降水峰值、降水量方面精度更高, 而 CMFD 融合降水数据高估了流域降水量, 尤其对降水峰值高估更明显, 同时 CMORPH 融合降水数据在不同时间尺度上均有更高的精度; 基于 CMORPH 融合降水数据的模拟结果中, 仅 3 场洪水模拟结果纳什系数小于 0.8 (其中 1 场小于 0.7), 总合格率为 94%, 达到甲级精度; 基于 CMFD 融合降水数据的洪水模拟总合格率为 67%, 为丙级精度; WRF-hydro 模型对大洪水的模拟精度优于小洪水过程; 高分辨率 CMORPH 融合降水数据驱动的 WRF-Hydro 模型能够很好地适用于中小流域的山洪过程模拟。

关键词: 多源融合降水; CMORPH; CMFD; WRF-hydro 模型; 山洪模拟

Applicability of WRF-Hydro model driven by different precipitation fusion data in mountain torrent simulation of medium- and small-sized watersheds

Qi Shengwei^{1,2}, Gu Huanghe^{1,2}, Wang Yuming³, Yang Yun³, Meng Jian³, Yu Zhongbo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;
3. Hangzhou Hydrology and Water Resources Monitoring Center)

Abstract: The high-precision precipitation fusion products CMORPH and CMFD were used as model inputs, and 18 flood events of the Tunxi Watershed in the upper reaches of the Xin'an River Basin from 2013 to 2018 were taken as the research object. The temporal and spatial distribution characteristics of rainfall by the two precipitation fusion products in the Tunxi Watershed were analyzed, and the applicability of the WRF-Hydro model driven by two types of precipitation fusion data to the simulation of mountain torrent processes in medium- and small-sized watersheds was explored. The results show that compared with the measured precipitation at the site, the CMORPH precipitation product has higher accuracy in terms of peak precipitation values and precipitation amount, while the CMFD product generally overestimates the precipitation amount, especially the peak precipitation values. At the same time, CMORPH precipitation product has higher accuracy on different time scales. In the simulation results based on CMORPH precipitation fusion data, only the Nash coefficient of three flood simulation results is less than 0.8 (one of which is less than 0.7), and the total qualified rate is 94%, reaching the grade A accuracy. The total qualified rate of flood simulation based on CMFD precipitation fusion data is 67%, which is grade C accuracy. Moreover, the model's simulation accuracy for large floods is better than that of small flood processes. In general, the WRF-Hydro model driven by high-resolution CMORPH precipitation fusion product can be well applied to mountain torrent process simulation in medium- and small-sized watersheds.

Key words: multi-source precipitation fusion; CMORPH; CMFD; WRF-Hydro model; mountain torrent simulation

传统洪水预报模型以观测降水数据为输入开展预报计算, 其预见期由流域汇流时长决定, 普遍存在预见期偏短的问题^[1]。陆气耦合模型是当前流域洪水预报领域中, 实现预见期延长与预报精度提升的核心技术手段^[2]。WRF-Hydro(weather research and forecasting-Hydro)模型为基于物理机制的网格化分布式陆气耦合

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271020, U25A20752); 浙江省水利科技计划项目(RA2401)
作者简介: 齐晟慰(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1779923900@qq.com
通信作者: 谷黄河(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: gh0001@hhu.edu.cn

模型,由美国国家大气研究中心(NCAR)于2013年研发,2016年正式在美国国家水资源中心(NWC)投入业务化运行^[3],可广泛应用于流域洪水预报、气候变化影响分析及流域水资源综合管理等诸多领域。我国中小流域山洪灾害具有洪水历时短、致灾速度快的显著特征,是防汛抗洪工作中的重点、难点和薄弱环节;水文模型作为山洪灾害预测预警的核心技术工具,其模拟精度直接决定山洪预警的有效性与可靠性^[4]。由此,新一代陆气耦合模型在我国中小流域山洪灾害的监测预警与防控治理中,具备十分广阔的应用前景与实践价值^[5-6]。

降水作为流域水循环过程的核心构成要素,其数据的可用性与质量直接关乎水文模型径流预报的精度与可靠性^[7-8]。随着卫星遥感技术的持续发展,不受地形条件限制、兼具高时空分辨率的融合降水产品日益丰富,为陆气耦合模型的水文模拟提供了更优质的数据支撑^[9-10]。已有学者围绕融合降水产品与WRF-Hydro模型的结合应用开展相关研究:王维等^[11]分别采用高分辨率融合降水数据与雨量站插值降水数据驱动WRF-Hydro模型开展模拟试验,结果表明以高分辨率融合降水数据作为模型驱动源,能够更精准地率定模型关键产汇流参数,有效提升模型实际应用适配性;付奥林^[12]选取3h分辨率的CMFD、GLDAS降水数据及WRF预报降水数据,驱动WRF-Hydro模型对沂河子流域进行径流模拟,研究证实CMFD融合降水产品在中小尺度流域的水文模拟中具备较高的应用价值与推广潜力;胡文韬等^[13]针对IMERG-Final融合降水产品与站点观测降水在长江上游流域的适用性展开对比分析,结果显示IMERG-Final融合降水产品具备更优的误差控制能力,而站点观测降水对降水事件发生的识别精度更优;聂童等^[14]采用1h分辨率的CMPAS、Gauge降水数据及3h分辨率的CRA降水数据,分别驱动WRF-Hydro模型对清江流域进行径流模拟,发现1h高分辨率的CMPAS与Gauge降水数据对径流过程的模拟效果显著优于3h分辨率的CRA降水数据;栗运等^[15]基于CLDAS-Precp与IMERG-Final两种1h分辨率多源融合降水产品,探究WRF-Hydro模型在綦江流域的水文模拟效用,证实同等1h分辨率条件下,质量更优的CLDAS-Precp融合降水产品更适用于中小尺度流域的水文模拟;肖渝等^[16]选用4种不同降水数据驱动SWAT模型,在抚河(湿润流域)与黑河(干旱流域)开展日流量模拟,结果表明CMORPH融合降水产品在两类气候区流域均展现出良好的适用性。

然而,当前针对不同融合降水产品在小时尺度中小流域山洪过程中的模拟能力对比研究仍较为薄弱,相关成果难以满足中小流域山洪精准模拟与防控的实际需求。为此,本文选取1h分辨率CMORPH融合降水产品与3h分辨率CMFD融合降水产品为研究对象,系统探讨两种不同分辨率、不同类型融合降水产品在中小流域山洪过程模拟中的应用潜力,以期为基于陆气耦合模型的中小流域山洪灾害模拟、预警及防御工作提供参考。

1 研究区概况

新安江属于钱塘江水系干流上游段,河长373 km,流域面积1.18万 km²。屯溪流域(新安江屯溪以上流域)位于新安江上游,流域内有率水、横江两条河流(图1),南支率水为新安江正源,发源于安徽省休宁县西南五股尖北麓,至屯溪与北支横江汇合后流入新安江^[17]。流域出口附近设有屯溪水文站,该站控制流域面积2 670 km²。屯溪流域属亚热带湿润季风气候,年平均气温15.4~16.8℃,年降水量1 295~1 702 mm,年蒸发量约1 400 mm,相对湿度约78%,为典型的中小湿润流域。流域内植被覆盖良好,主要植被包括常绿针叶林、落叶阔叶林、混合林、灌木林、牧草地与耕地,土壤类型主要为壤土、砂质黏壤土、砂壤土和壤砂土。流域地势西高东低,最大落差达1 018 m,受盆地地形影响,河流由四周向中央平原汇集,再于东侧屯溪水文站处汇入新安江,极易形成洪水^[18]。

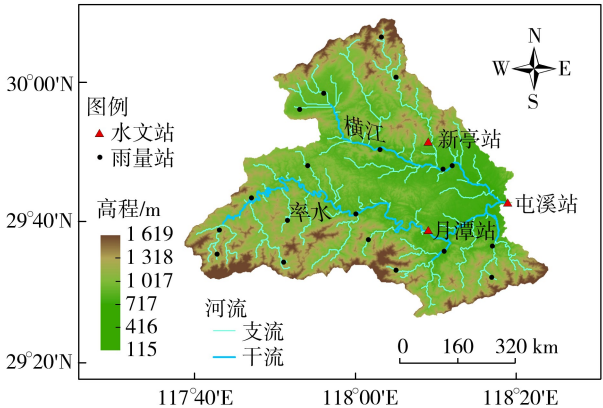


图1 屯溪流域概况

Fig. 1 Overview of Tunxi Watershed

2 研究方法

2.1 模型设置

本文采用不同融合降水数据驱动 WRF-Hydro 模型,以评估降水产品在中小流域山洪过程模拟中的适用性。WRF-Hydro 模型以陆面模型为基础,嵌入高分辨率汇流模块开展水文过程模拟;该模型的汇流模块针对不同物理过程设置了差异化参数方案,同时纳入水平方向的水分交换过程,有效改进了土壤水侧向流的模拟精度,进而提升了中小型流域水文过程的模拟能力^[19]。本文陆面模型选择 Noah-MP,坡面汇流采用最陡下降法,河道演算采用扩散波,基流采用概念性指数桶模型。WRF-Hydro 模型所需的气象驱动数据包括地表降水、气温、气压、湿度、风速、辐射量等;地理网格数据由 WRF 前处理系统(WPS)生成,WPS 设置为 3 层嵌套^[20],网格分辨率分别为 9、3、1 km,其中最内层区域作为 WRF-Hydro 的模拟区域;汇流模块网格分辨率为 200 m,积分时间步长为 10 s。

2.2 研究数据

CMFD 融合降水数据是以 Princeton 再分析资料、GLDAS 同化数据、GEWEX-SRB 辐射资料、TRMM 卫星降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象站点观测数据制作而成的首个专门用于研究陆面过程的高时空分辨率格点化近地表气象数据集^[21],数据开始于 1979 年 1 月,目前截至 2018 年 12 月,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.1°。CMFD 融合降水数据提供了 7 个近地面气象要素,包括 2 m 气温、地面气压、比湿、10 m 风速、向下短波辐射、向下长波辐射和降水率^[22]。

CMORPH 融合降水数据是使用概率密度匹配+最优插值(PDF+OI)方法将原始 CMORPH 降水产品与全国 3 万多个自动气象观测站的地面(包括国家级自动站和区域自动站)观测逐时降水数据进行融合得到的高时空分辨率数据集,空间分辨率为 0.1°、时间分辨率为 1 h,起止时间为 2008 年 1 月至今^[23],是当前时间分辨率最高的降水产品之一^[24]。

WRF-Hydro 模型运行所需的气象驱动数据中的降水数据分别来自 2013—2018 年的 CMFD 和 CMORPH 融合降水数据集,其他气象驱动要素来自 CMFD 融合降水数据。为了更好地比较两种融合降水数据的分布特征,将原始分辨率的融合降水数据与流域内站点观测逐小时数据进行比较。由于流域内站点较少,补充 CN05.1 格点化数据集^[25]比较分析降水产品空间分布特征,该数据集由 2 400 余个中国地面气象台站的观测资料插值获得,分辨率为 0.25°,在中国东部观测台站密集地区精度较高。在比较不同降水数据的时序变化特征时,面雨量是由区域内各个格点的总降水空间平均后得到的。汇流模块所需的高分辨率地形数据来自地理空间数据云,观测洪水资料来自水文年鉴。

2.3 模拟方案与评价指标

选取屯溪流域 2013—2015 年的 10 场洪水作为率定期,2016—2018 年 8 场洪水作为验证期,18 场洪水测详细资料见表 1。首先分析屯溪流域各场次洪水期间两种融合降水的空间分布与时序变化特征,然后分别利用两种融合降水数据驱动 WRF-hydro 模型进行径流模拟,分析和评估两种降水数据的模拟效果。采用站点观测降水和 CMFD 融合降水数据的其他气象要素驱动模型,以站点观测流量为基准对模型进行参数率定,将率定得到的最优参数作为适用于研究区域的模型参数,之后在其他气象数据保持不变的条件下,分别利用 CMORPH 与 CMFD 融合降水数据驱动 WRF-hydro 模型,以率定期参数对验证期的洪水进行模拟。

本文采用纳什效率系数(NSE)、峰现时差(ΔT)、洪峰相对误差(R_p)与洪量相对误差(R_m)对径流模拟效果进行评估^[26]。NSE 的取值范围为 $-\infty \sim 1$,越接近 1,模型的模拟性能越好,指标大于 0.7 时表明模型具有较高的预测精度;洪峰相对误差与洪量相对误差的绝对值在 20%以内表明洪峰与总洪量预报合格^[27]。

3 结果与分析

3.1 融合降水的空间分布特征

使用两种融合降水数据和站点观测数据分析屯溪流域研究期内 18 场洪水事件的累计降水量空间分布。图 2 为 6 场典型洪水(年内洪峰流量最大的洪水)的累计降水量分布。由图 2 可知,屯溪流域洪水期间降水空间分布具有显著不均匀性,各场次洪水之间的降水分布也具有显著差异。CMFD 与 CMORPH 融合降水数据都能很好地反映降水的空间分布,细节上 CMORPH 融合降水对峰值及其位置的体现较为精确,与站点观

表 1 洪水事件详细资料

Table 1 Detailed information on flood events

洪水事件	开始时间	结束时间	洪峰流量/(m ³ /s)	累计面雨量/mm
20130429	2013-04-29T08:00	2013-05-07T03:00	2 229	118.2
20130606	2013-06-06T09:47	2013-06-14T08:38	3 610	176.0
20130624	2013-06-24T18:00	2013-07-09T08:00	4 213	233.3
20140513	2014-05-13T20:30	2014-05-16T10:36	2 010	139.7
20140619	2014-06-19T23:00	2014-06-23T09:00	2 380	254.1
20140712	2014-07-12T19:54	2014-07-22T20:00	3 640	210.2
20150402	2015-04-02T18:36	2015-04-10T14:00	1 895	193.5
20150510	2015-05-10T20:36	2015-05-13T18:00	1 360	110.4
20150607	2015-06-07T07:30	2015-06-14T20:00	3 010	324.2
20150809	2015-08-09T08:00	2015-08-14T00:00	1 060	141.8
20160420	2016-04-20T01:00	2016-04-25T14:00	2 350	283.5
20160618	2016-06-18T17:00	2016-06-24T21:00	4 280	212.3
20160702	2016-07-02T11:00	2016-07-03T10:30	1 660	334.2
20170319	2017-03-19T23:00	2017-03-27T23:00	525	99.8
20170408	2017-04-08T20:00	2017-04-14T17:00	849	154.3
20170611	2017-06-11T08:00	2017-06-18T00:00	1 730	143.2
20180423	2018-04-23T07:06	2018-04-28T02:00	1 630	129.9
20180629	2018-06-29T02:06	2018-07-10T23:54	2 290	275.9

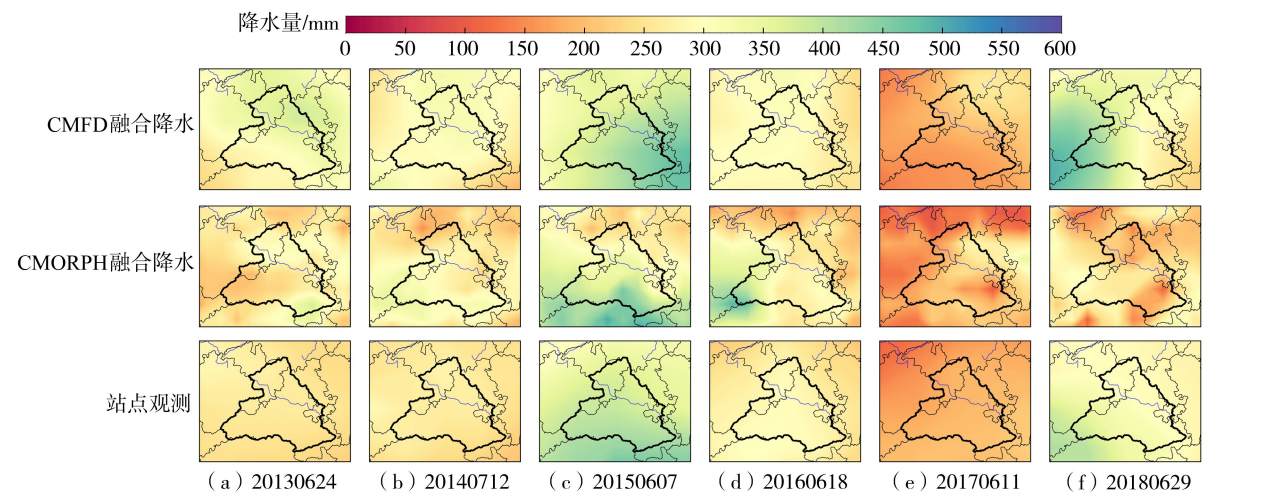


图 2 屯溪流域研究期内 6 场典型洪水事件对应时段的累计降水量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of cumulative precipitation amount in time intervals corresponding to six typical flood events in Tunxi Watershed during study period

测降水吻合,CMFD 融合降水的峰值则偏大,部分区域高估了降水,同时 CMFD 融合降水的空间变化较为平缓,CMORPH 融合降水则在部分场次洪水中存在区域降水量的“突变”,主要发生在 20170611、20180629 洪水期间。在降水量上,CMORPH 降水量与观测降水非常接近,而 CMFD 的降水量整体偏大,尤其是峰值。

3.2 融合降水的时间分布特征

由图 3 可知,年内降水整体呈现先增大后减小的变化特征,并且降水在年末略有增加,6 月降水量最大,为 385.3 mm,10 月降水量最小,仅 66.6 mm。两种融合降水产品中,CMORPH 融合降水能很好地捕捉降水的年内变化特征,变化趋势与站点观测降水接近,而 CMFD 融合降水虽然变化趋势与站点观测相吻合,但在降水较多的 5—9 月明显高估了流域内的降水量。对于降水年际变化,CMORPH 融合降水与站点观测降水过程线基本一致,年平均降水量分别为 1 813.85、1 958.5 mm,CMFD 融合降水在较大程度上高估了流域降水,年平均降水量为 2 348.8 mm。CMORPH 融合降水在累计降水量空间分布上比 CMFD 融合降水刻画出了更多的细节,峰值范围与降水量也更精确。

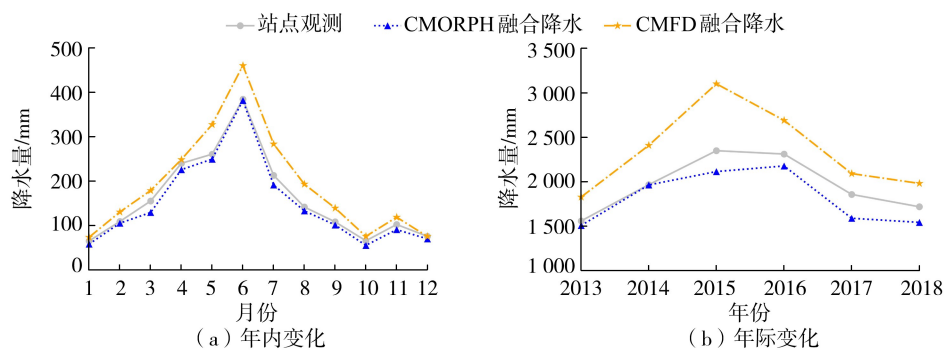


图 3 2013—2018 屯溪流域降水量时间分布

Fig. 3 Temporal distribution of precipitation amount in Tunxi Watershed from 2013 to 2018

两种融合降水与站点观测降水都有良好的相关性,但 CMORPH 融合降水与站点观测降水的一致性更好,相关系数为 0.78,CMFD 融合降水与站点观测降水的相关系数为 0.73。CMFD 融合降水的相对偏差较大,为 16.77%,高估了实际降水量,CMORPH 融合降水的相对偏差为-8.48%,略微低估了实际降水量。两种融合降水产品都能很好地反映流域降水量年际变化趋势,但 CMORPH 融合降水在降水量以及变化趋势上更接近站点观测降水,CFMD 融合降水对不同时间尺度降水量的刻画都偏大。

3.3 WRF-Hydro 模型参数率定

选取不同类型的参数进行敏感性分析,根据敏感性分析结果选出主要敏感参数进行率定^[19,28-29]。敏感性分析时,依次选取单个参数,每次运行模型时以固定步长(取值范围的 10%)修改该参数取值,以 NSE 作为单目标函数,将各参数取值范围标准化后采用 Morris 筛选法^[30]对结果进行评价以确定敏感性。分析得到的敏感参数依次为饱和土壤导水率、深层有效产流系数、饱和土壤含水率、曼宁粗糙系数、入渗系数与地表糙率,其余不敏感参数的取值选取敏感性分析时该参数的最优值。

率定过程采用手动逐步逼近法,按照敏感性顺序每次仅改变一个参数的取值进行率定,直至所有参数取到最优值。率定时,以 NSE 和 R_m 作为主要评价指标,并同时考虑两个评价指标对参数的影响,参数率定结果见表 2。屯溪流域土壤主要为壤土和砂土,地形落差大,因此入渗系数大进而对饱和土壤导水率与深层有效产流系数更敏感;流域内植被覆盖高、截流能力强,导致地表糙率较大,流域特征与参数率定结果相符合。

表 2 WRF-Hydro 模型参数率定结果

Table 2 WRF-Hydro model parameter calibration results

值域	饱和土壤 导水率 [*] /(m/s)	深层有效 产流系数	饱和土壤 含水率 [*] /(m ³ /m ³)	曼宁粗糙 系数/(s/m ^{1/3})	入渗系数	地表糙 率 [*] /(s/m ^{1/3})
取值范围	0.2~10	0~1	0.8~1.2	0.1~1	0.1~4	0.1~1
最优取值	0.8	0.05	0.83	0.14	0.35	1

注: * 表示该参数是对其系数进行率定,实际取值为默认值乘以最优系数。

3.4 径流模拟结果分析

使用率定后的模型对研究期内 18 场洪水进行模拟。图 4 为 6 场典型洪水逐小时径流量模拟结果,表 3 为相应的评价指标。整体上看,基于 CMORPH 融合降水数据的模拟结果更好,仅 3 场洪水模拟结果 NSE 小于 0.8(其中 1 场小于 0.7);洪量与洪峰相对误差均保持在 20%以内;峰现时间误差在 3 h 以内,模拟结果与观测序列吻合程度好,相关度较高,模拟结果达到甲级精度。基于 CMFD 融合降水数据的径流模拟,共 12 场洪水表现较好,其余场次模拟结果不理想(NSE 低于 0.7),模拟结果为丙级精度。从典型洪水事件来看,CMFD 融合降水在 20160618 与 20180629 洪水中高估了降水量,导致洪峰流量模拟偏高;而在其他洪水中低估了降水量,导致洪峰流量模拟偏低,而在 20180629 洪水模拟中洪峰流量甚至偏高 36.33%。

根据表 3 中的评价指标,CMFD、CMORPH 融合降水数据驱动模型的模拟结果合格率分别为 67%与 94%,其中 CMORPH 融合降水数据驱动的模拟结果仅有 1 场洪水模拟不合格,且总洪量偏差正负分布较为均匀。总体上,经参数率定后的基于 CMORPH 融合降水数据的 WRF-Hydro 模型能够较好地模拟屯溪流域洪水过程。

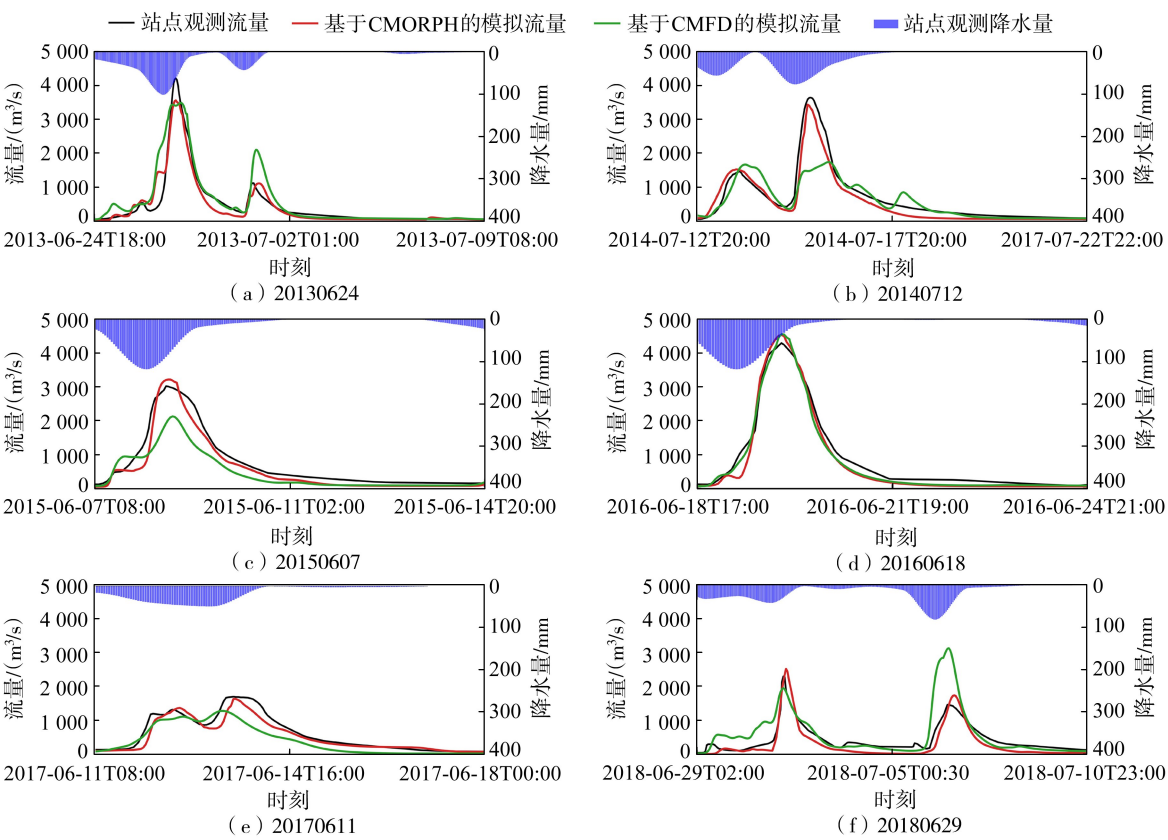


图 4 屯溪流域典型洪水期间模拟与观测径流量时序变化

Fig. 4 Time series changes in simulated and measured runoff during typical flood events in Tunxi Watershed

表 3 研究期洪水径流模拟评价指标

Table 3 Flood runoff simulation evaluation indicators during study period

洪水事件	基于 CMFD 的洪水径流模拟				基于 CMORPH 的洪水径流模拟			
	NSE	$\Delta T/h$	$R_p/\%$	$R_m/\%$	NSE	$\Delta T/h$	$R_p/\%$	$R_m/\%$
20130429	0.96	0	-0.09	-17.63	0.93	0	6.43	4.60
20130606	0.90	-3	-17.38	-14.47	0.89	0	0.61	-4.91
20130624	0.80	5	-17.31	18.82	0.93	0	-15.49	-7.87
20140513	0.83	6	-13.42	-18.31	0.82	1	11.36	4.33
20140619	0.71	-3	9.11	19.31	0.88	1	5.12	16.12
20140712	0.73	6	-12.16	-13.24	0.92	-2	-5.63	-17.03
20150402	-0.75	5	-19.40	-23.65	0.84	2	-18.91	-17.01
20150510	-1.30	14	-45.25	-33.20	0.93	-1	6.34	-6.10
20150607	0.71	3	-19.58	-18.23	0.94	1	6.49	-10.66
20150809	0.78	-4	15.57	16.30	0.85	3	7.87	-6.57
20160420	0.82	0	11.83	6.03	0.94	2	-0.44	-15.60
20160618	0.98	-3	6.09	-10.46	0.97	0	5.55	-12.76
20160702	0.13	17	39.94	7.40	0.68	2	3.75	1.94
20170319	0.78	1	5.35	-17.91	0.77	3	15.63	2.10
20170408	0.09	4	33.61	-8.46	0.80	1	7.70	2.20
20170611	0.70	-5	-10.23	-18.58	0.90	1	-3.81	-12.24
20180423	0.44	-8	1.92	-20.70	0.84	0	13.70	10.41
20180629	-0.25	-6	36.33	34.66	0.75	2	9.72	-15.81

在研究期的洪水事件中,洪峰流量小于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水事件有 8 次,洪峰流量大于 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的有 5 次,将前 8 次与后 5 次分别称为小洪水事件与大洪水事件。由表 4 可见,CMORPH、CMFD 融合降水数据作为模型输入,大洪水事件的平均纳什系数均大于小洪水事件,峰现时间、洪峰相对误差也小于小洪水事件,表明两种融合降水对大洪水事件的模拟优于小洪水事件。而在洪量相对误差指标上,CMORPH 融合降水数据的模拟结果是小洪水事件较优,与实际洪量差距较小,说明模型对大洪水事件的过程模拟较好,但对大洪水

过程的流量模拟误差也更大,反之虽然模型对小洪水事件的过程模拟效果不如大洪水事件,但洪量的误差相对较小。

表 4 大、小洪水事件径流模拟平均评价指标

Table 4 Average evaluation indicators for runoff simulation of large and small flood events

融合降 水产品	NSE		$ \overline{\Delta T} /\text{h}$		$ \overline{R_p} /\%$		$ \overline{R_m} /\%$	
	大洪水事件	小洪水事件	大洪水事件	小洪水事件	大洪水事件	小洪水事件	大洪水事件	小洪水事件
CMORPH	0.93	0.83	0.6	1.6	6.75	9.71	10.65	7.32
CMFD	0.85	0.11	4.0	6.3	14.50	21.41	15.04	18.28

注: $|\overline{\Delta T}|$ 、 $|\overline{R_p}|$ 与 $|\overline{R_m}|$ 计算时先取绝对值再平均。

4 结 论

a. 屯河流域降水分布具有显著的不均匀性。两种融合降水产品都能较好地刻画研究区降水空间分布特征,CMORPH 融合降水产品在降水峰值与降水量方面均有较高精度,而 CMFD 融合降水产品对降水量存在一定的高估,尤其降水峰值偏大明显。在降水的时间分布特征方面,CMORPH 融合降水产品在不同时间尺度上也均具有较高的精度,降水年内年际变化与站点观测基本一致。而 CMFD 融合降水产品虽然降水过程线变化趋势与站点观测相吻合,但在降水较多的 5—9 月明显高估了流域内的降水量。整体上,CMORPH 融合降水产品具有更高的精度。

b. 最敏感的参数为饱和土壤导水率,其次是深层有效产流系数,最不敏感参数为入渗系数与地表糙率,这与流域特点相吻合。流域土壤主要为壤土和砂土且地形落差大,因此入渗系数大,模拟结果对饱和土壤导水率与深层有效产流系数更敏感;流域内植被覆盖高、截流能力强,导致地表糙率较大。

c. 基于 CMORPH 融合降水产品的径流模拟要优于 CMFD 融合降水产品,模拟合格率为 94%,比 CMFD 模拟结果高 27%,可以很好地模拟洪水过程线、洪峰流量与峰现时间。同时,模型对大洪水事件的过程模拟优于小洪水事件。总的来说,基于 CMORPH 融合降水产品的 WRF-Hydro 模型能够很好地应用于中小流域的山洪过程模拟。

参考文献:

[1] 余豪,袁晶瑄,卢迪,等. 基于 GFS 降水预报信息的洪水预报方法研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5):13-19. (Yu Hao, Yuan Jingxuan, Lu Di, et al. Study on flood forecasting method based on GFS precipitation forecasting information[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 13-19. (in Chinese))

[2] 徐宗学,初祁,王昊,等. 基于陆气耦合的城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(3):434-446. (Xu Zongxue, Chu Qi, Wang Hao, et al. Research progress of urban stormwater simulation technology based on land-atmosphere coupling[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science) ,2022,58(3):434-446. (in Chinese))

[3] 顾天威,陈耀登,高玉芳,等. 基于 WRF-Hydro 模式的清江流域洪水模拟研究[J]. 水文,2021,41(3):63-68. (Gu Tianwei, Chen Yaodeng, Gao Yufang, et al. Flood simulation of Qingjiang River Basin based on WRF-Hydro model[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(3): 63-68. (in Chinese))

[4] 黄武斌,伏晶,郭润霞,等. 多源降水数据在夏河县果宁村山洪模拟中的精度评估[J]. 高原气象,2025,44(1):110-121. (Huang Wubin, Fu Jing, Guo Runxia, et al. Accuracy evaluation of multi-source precipitation data in mountain flood simulation in Guoning Village, Xiahe County[J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(1): 110-121. (in Chinese))

[5] 王国庆,张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护,2024,40(2):1-8. (Wang Guoqing, Zhang Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))

[6] 何秉顺,路江鑫,李昌志,等. 山洪灾害防御的一些认识和概念的发展[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(6):30-33. (He Bingshun, Lu Jiangxin, Li Changzhi, et al. Some understandings and concepts on flash flood disaster prevention[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(6): 30-33. (in Chinese))

[7] 沈嘉聚,杨汉波,刘志武,等. 长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):119-126. (Shen Jiaju, Yang Hanbo, Liu Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 119-126. (in Chinese))

[8] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究:以东江和北江为例[J]. 水科学进展,

2017,28(2):174-182. (Wang Zhaoli, Zhong Ruida, Lai Chengguang, et al. Study on the applicability of TRMM satellite precipitation inversion data in the Pearl River Basin:taking Dongjiang River and Beijiang River as an example[J]. Advances in Water Science,2017,28(2):174-182. (in Chinese))

[9] 杜飞,胡庆芳,王银堂,等. MSWEP 对江苏省太湖流域日降水量和极值降水量的表征能力解析[J]. 水资源保护,2023,39(4):167-175. (Du Fei, Hu Qingfang, Wang Yintang, et al. Validation of MSWEP daily and extreme precipitation of the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):167-175. (in Chinese))

[10] 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.

[11] 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))

[12] 付奥林. 沂河流域不同降水驱动下的 WRF-Hydro 模式径流模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2024.

[13] 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))

[14] 聂童,高玉芳,彭涛,等. WRF-Hydro 模式结合不同降水产品模拟清江流域径流的效果分析[J]. 暴雨灾害,2023,42(4):395-405. (Nie Tong, Gao Yufang, Peng Tao, et al. Effect analysis of WRF-Hydro model combined with different precipitation products to simulate runoff in the Qingjiang River Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,2023,42(4):395-405. (in Chinese))

[15] 栗运,师春香,毛文书,等. 基于 CLDAS-Prep 多源融合降水产品的 WRF-Hydro 模式在綦江流域的水文效用[J]. 高原气象,2022,41(3):617-629. (Li Yun, Shi Chunxiang, Mao Wenshu, et al. Hydrological utility of CLDAS-Prep multi-source fusion precipitation products in Qijiang River Basin-Taking WRF-Hydro model as an example[J]. Plateau Meteorology,2022,41(3):617-629. (in Chinese))

[16] 肖渝,孙若辰,王倩,等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):43-52. (Xiao Yu, Sun Ruochen, Wang Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):43-52. (in Chinese))

[17] 罗玉玲,秦洪亮,姚成,等. 基于网格水滴的汇流模拟计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):9-17. (Luo Yuling, Qin Hongliang, Yao Cheng, et al. Confluence calculation method based on grid water drop[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):9-17. (in Chinese))

[18] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):197-203. (Bao Hongjun, Cao Yong, Cao Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):197-203. (in Chinese))

[19] 李振洁,孟宪红,舒乐乐,等. WRF-Hydro 大气-陆面-水文耦合模式应用研究综述[J]. 高原气象,2024,43(4):1-17. (Li Zhenjie, Meng Xianhong, Shu Lele, et al. A Comprehensive Review of the Application Research of the WRF-Hydro Fully Coupled Atmosphere-Land-Hydrology Model[J]. Plateau Meteorology,2024,43(4):1-17. (in Chinese))

[20] 石卓,史东华,姚成,等. 基于径流模数的 LSTM 模型在无资料嵌套流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):51-57. (Shi Zhuo, Shi Donghua, Yao Cheng, et al. Application of runoff modulus-based LSTM in ungauged watersheds[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):51-57. (in Chinese))

[21] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data,2020,7(1):s41597.

[22] 陈亚玲,文军,杨传国,等. 不同降水产品及 WRF-Hydro 模式在黄河源区的适用性分析[J]. 大气科学,2024,48(3):923-937. (Chen Yaling, Wen Jun, Yang Chuanguo, et al. Applicability of Different Precipitation Products and the WRF-Hydro Model over the Source Region of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2024,48(3):923-937. (in Chinese))

[23] Shen Yan, Zhao Ping, Pan Yang, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,2014,119(6):3063-3075.

Tanggula area on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(2):376-386. (in Chinese))

[41] Chen Xuegao,Yu Zhongbo,Lin Hui,et al. Hydrological responses to permafrost degradation on Tibetan Plateau under changing climate[J]. Water Science and Engineering,2024,17(3):209-216.

[42] Jin Xiaoying,Jin Huijun,Luo Dongliang,et al. Impacts of permafrost degradation on hydrology and vegetation in the source area of the Yellow River on Northeastern Qinghai-Tibet Plateau, Southwest China[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:845824.

[43] Song Lei,Wang Lei,Luo Dongliang,et al. Assessing hydrothermal changes in the upper Yellow River Basin amidst permafrost degradation[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science,2024,7(1):57.

[44] 李万志,马海玲,庞昕玮,等. 气候变暖背景下青海三江源区季节冻土冻融特征研究[J]. 冰川冻土,2023,45(4):1233-1241. (Li Wanzhi, Ma Hailing, Pang Xinwei, et al. Study on the characteristics of freezing and thawing of the seasonally frozen ground in the Three-River Source Region of Qinghai under warming climate[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2023,45(4):1233-1241. (in Chinese))

[45] Duan Jianping,Li Lun,Chen Liang,et al. Time-dependent warming amplification over the Tibetan Plateau during the past few decades[J]. Atmospheric Science Letters,2020,21(10):e998.

[46] Qin Yue,Lei Huimin,Yang Dawen,et al. Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains,northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology,2016,542:204-221.

[47] Fang Jinzhu,Yi Peng,Stockinger M,et al. Investigation of factors controlling the runoff generation mechanism using isotope tracing in large-scale nested basins[J]. Journal of Hydrology,2022,615:128728.

[48] Luo Dongliang,Jin Huijun,Lyu Lanzhi,et al. Spatiotemporal characteristics of freezing and thawing of the active layer in the source areas of the Yellow River (SAYR)[J]. Chinese Science Bulletin,2014,59(24):3034-3045.

(收稿日期:2024-11-13 编辑:刘晓艳)

(上接第52页)

[24] Joyce R J,Janowiak J E,Arkin P A,et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology,2004,5(3):487-503.

[25] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1102-1111. (Wu Jia,Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(4):1102-1111. (in Chinese))

[26] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护,2023,39(2):17-24. (Feng Ping,Zhang Libin,Li Jianzhu,et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):17-24. (in Chinese))

[27] 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,2008.

[28] 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))

[29] 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))

[30] 刘松,余敦先,张利平,等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1296-1303. (Liu Song,She Dunxian,Zhang Liping,et al. Sensitivity analysis of hydrological model parameters based on Morris and Sobol[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(6):1296-1303. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-06 编辑:刘晓艳)