

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.002

湘江流域多源降水与气温产品组合的 径流极值模拟精度评价

贾玉雪^{1,2}, 张 奇^{1,3}, 曾冰茹^{1,2}, 徐铖宇^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探究卫星遥感、再分析产品等多源数据组合径流极值模拟的精度, 选取湘江流域 TRMM、PERSIANN-CDR、CFSR 以及实测数据的 8 种降水与气温组合, 利用水文模型探究不同组合在各径流极值序列中的模拟精度。结果表明: 在无实测数据的组合中, TRMM 降水与 CFSR 气温、PERSIANN-CDR 降水与 CFSR 气温 2 种组合的模拟结果分别最接近径流极高值与径流极低值实测值; 除基准组合(实测降水、实测气温), 实测降水与 CFSR 气温、TRMM 降水与实测气温分别是径流极高值、径流极低值模拟精度最高的组合; 在各径流极值序列中, CFSR 降水与 CFSR 气温、CFSR 降水与实测气温 2 种组合皆严重高估径流极值, 最大高估可达 651%, 表现出模拟误差随径流值减小而增大的特征, 其余组合皆低估径流, 最大低估可达 67.48%, 且呈现出误差随径流值减小而减小的特点; 降水产品在不同的径流极值序列中表现出的极端降水特征不同, 径流极高值序列中 TRMM 较其他 2 种降水产品更能反映极端降水的发生频率以及无雨历时等特征, 径流极低值序列中 PERSIANN-CDR 降水对极端降水强度、总量以及连续湿日特征的体现最好。

关键词: 降水产品; 气温产品; 遥感数据; SWAT 模型; 径流极值模拟; 湘江流域

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0008-09

Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin

JIA Yuxue^{1,2}, ZHANG Qi^{1,3}, ZENG Bingru^{1,2}, XU Chengyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To evaluate the accuracy of extreme runoff simulation by combining the satellite remote sensing and the reanalysis data, the precipitation and temperature data of TRMM, PERSIANN-CDR, and CFSR, and measured data were selected to obtain eight combination schemes of precipitation and temperature. Hydrological models were utilized to evaluate the accuracy of different combinations in each extreme flow sequence. The results show that: among the combinations of remote sensing data without measured data, TRMM precipitation & CFSR air temperature and PERSIANN-CDR precipitation & CFSR air temperature are the best combinations for simulating the extreme high and low runoff, respectively; in addition to the reference combination (actually measured precipitation & measured temperature), measured precipitation & CFSR temperature and TRMM precipitation & measured temperature are the combinations with the highest simulation accuracy of the high and low runoff simulation, respectively; among the extreme flow series, CFSR precipitation & CFSR air temperature and CFSR precipitation & measured temperature seriously overestimate the extreme flow with the maximum overestimation reaching 651%, and the simulation error increases with the decrease of discharge. The other

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0409002); 国家自然科学基金(41877166)

作者简介: 贾玉雪(1996—), 女, 博士研究生, 主要从事湖泊流域气象水文过程与极端水文事件研究。E-mail: jiayx6427@163.com

通信作者: 张奇(1966—), 男, 研究员, 博士, 主要从事湖泊流域水文学研究。E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

引用本文: 贾玉雪, 张奇, 曾冰茹, 等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 8-16.

JIA Yuxue, ZHANG Qi, ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 8-16.

schemes underestimate the runoff with the maximum underestimation reaching 67.48%, and the error decreases with the decrease of runoff; The characteristics of extreme precipitation vary in different extreme value series. Compared with the other two precipitation products, TRMM can better reflect the frequency of extreme precipitation and the duration of no rain in the high flow series, while the precipitation of PERSIANN-CDR in the low flow series can best reflect the intensity, total amount, and characteristics of consecutive wet days.

Key words: precipitation products; temperature products; remote sensing data; SWAT model; runoff extremum simulation; Xiangjiang River Basin

全球气候变暖与人为活动加剧导致的区域性增雨与减雨效应越来越突出^[1-2],2003—2013 年,全球极端降水事件比预测多了 7%^[3]。降水会影响径流、陆地水储量等^[4],因此极端降水的发生往往伴随着一系列洪涝、干旱灾害。据统计,洪水灾害在 2007—2017 年中每年造成的经济损失超过 300 亿美元^[5],2022 年极端少雨导致长江流域尤其是两湖地区的特大干旱事件历史罕见^[6]。有研究^[7]指出,极端低流量引发的生态风险明显高于极端高流量引发的生态风险,同时极端低流量还会引发人类生产、生活用水与生态系统耗水之间的矛盾。因此在全球气候变化与人类活动加剧的背景下,加强径流极值的研究对防灾减灾、资源调配以及维持水生态系统健康具有重要意义。

目前径流极值的模拟与预测主要依靠水文模型,而模型的气象输入往往依赖地面气象站点实测数据^[8]。受自然因素与社会经济条件等影响,全球气象站点分布密度较低、空间分布不均,过去的无资料区径流模拟研究中发展了多种气象数据插值方法以替代缺失的气象数据^[9]。其中,空间插值方法虽然一定程度上解决了无资料区水文研究的受限问题,但存在径流峰值模拟能力差、径流模拟过度平滑等缺点^[10];高时空分辨率的卫星遥感数据解决了水文模拟输入资料缺乏的问题,大量的遥感产品被应用于水文模型数据库的构建或模型的校准^[11]。

降水与气温作为大部分水文模型的必要输入数据得到众多学者的关注,由于径流对降水最为敏感^[12],针对降水产品如 GPM、TRMM、CHIRPS、PERSIANN-CDN、CMORPH 等开展精度验证、误差评价及其在径流模拟、水文预报中适用性的研究较多,大部分降水产品径流的模拟精度受研究区时空特征的影响^[13-18],如 TRMM 在南方平原丘陵地区的精度较高^[16]。再分析产品 CFSR 与 ERA5 的降水数据也被广泛应用于水文模拟,二者在长江中下游地区的适用性评估表明,空间上 ERA5 与实测降水数据的多年平均降水量偏差较大,部分区域降水偏差超过 100%,而 CFSR 再分析降水资料和实测降水数据的多年平均降水量的偏差相对较小,降水偏差百分比在-25.34%~82.92%之间^[19]。相比于降水产品,气温产品的数量以及评价明显偏少,目前的研究中 GLDAS、ERA5 以及 CFSR、CMADS 等一些再分析产品中的气温数据得到广泛的应用。GLDAS 存在空间分辨率低且不同时段数据质量差异大的劣势^[20],CMADS 数据仅覆盖东亚地区因此在全球适应性研究受限^[21],CFSR 与 ERA5 的平均值都能够满足建模要求,但对于逐日最高气温与最低气温在水文模型中的表现,CFSR 的结果好于 ERA5^[22]。

降水、气温数据的获取完全依赖遥感手段在水文模拟精度方面是否能够得到保障是当前面临的一个重要问题,已有部分研究通过组合不同来源的降水与气温数据进行径流模拟探讨过该问题,如在湄公河流域的研究发现使用格网降水数据集如 TRMMv7、APHRODITE 与 CFSR 温度数据的组合能够很好地支持季风驱动的亚洲大型河流流域的模拟工作^[23],中国干旱与半干旱地区石羊河流域的研究表明 CHIRPS 降水与 CFSR 温度的组合在径流与蒸散发模拟中表现最好^[23],这表明受气候、地形等条件的影响不同的研究区域径流模拟的最佳替代组合存在一定的差异,除此之外,类似的研究仅限于对不同组合产品径流模拟总体精度的评价及组合优选,很少关注不同组合对径流极值的模拟精度。

洞庭湖水量受三峡大坝蓄泄、长江-洞庭湖河湖水文效应、湘资沅澧来水的多重影响,丰水季节遭遇全流域强降水时容易发生洪涝灾害,湘江流域对洞庭湖流域水量贡献较大,因此湘江流域径流极值研究对洞庭湖流域水量调控、控灾减灾具有重要意义。目前卫星降水数据精度评估以及径流模拟精度评价方面的研究在湘江流域已经取得一系列的研究进展^[13,24-26],有学者评价了 TRMM、PERSIANN-CDR 以及 NCEP-CFSR 降水产品应用于湘江流域径流模拟的精度,发现 3 种降水产品模拟的径流极值皆存在较大偏差^[27],因此将降水产品与气温产品进行组合作为模型输入是否会改进水文极值的模拟效果需要进一步深入探究。

月尺度的径流极值研究对分析年代际的气候水文演变具有重要意义,例如在长期径流预报方面具有明显优势的大气环流因子与月尺度以及滑动月尺度上的径流极值具有较强的相关性^[28]。此外在长时间序列

数据的支撑下,月尺度径流极值的研究可以从总体上刻画不同产品在丰水、枯水月份的表现能力。为探究多源气象数据组合对月尺度上水文模拟精度的影响,本文以实测气象数据输入为基准情景,选取 TRMM、PERSIANN-CDR 以及再分析 CFSR 产品,在典型亚热带气候区——湘江流域设置不同的降水、气温组合开展水文过程模拟,进行不同产品组合的径流极值模拟精度分析。

1 研究区概况

湘江是洞庭湖“四水”中流域面积最大的支流,水系发达,占洞庭湖“三口四水”多年平均入湖洪量的 20.5%^[29],受地势南高北低的影响,其自南往北注入洞庭湖,来水经洞庭湖调蓄后最终汇入长江。研究区地理空间范围为北纬 24°37′~28°、东经 110°58′~114°7′。湘潭水文站为研究区的水文控制站,集水区总面积为 64 428 km²。地形以平原为主,平均高程为 345 m。研究区气候类型为亚热带季风性湿润气候,年均气温 16.5~17.3℃,年蒸发量 1 162~1 502 mm^[30],多年平均降水为 1 503.9 mm 且降水年内分布不均,3—6 月暴雨频繁,4—8 月发生的洪水约占全年的 87%^[31]。研究区内径流主要由降水补给,降水对径流增加的贡献率高达 57%^[32]。主要土壤类型为红壤与水稻土,主要的土地利用类型为耕地与林地,占研究区总面积的 94.3%,植被类型为常绿阔叶林与针阔混交林。研究区现有 10 个国家级气象站,区内涵盖的气象、水文站点的空间分布情况详见图 1。

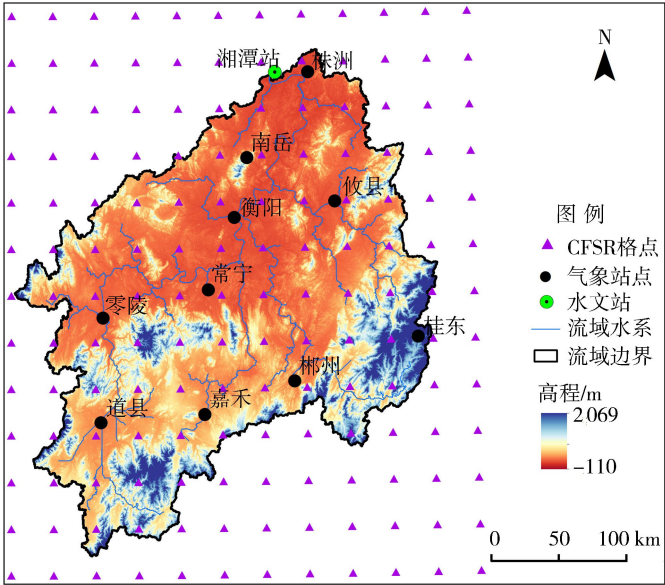


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

湘江流域是亚热带季风湿润气候区流域的典型代表,当遇上长江流域的同步旱涝气候效应,便会对洞庭湖区的生产、生活、生态造成巨大的威胁,同时流域内分布着湖南省重要城市湘潭、株洲、衡阳,人口密集、经济体量大,水文灾害一旦发生将带来巨大的经济损失,因此通过比较不同降水、气温产品组合的径流极值模拟精度不但可以进一步认识不同产品的优势与缺陷,更能为该流域径流极值模拟预测提供合适的气象输入资料,提高极端水文事件的预警能力。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及处理

研究数据包括逐日降水与气温,根据获取来源可以分为实测数据、卫星遥感数据、再分析产品。研究区涵盖的 10 个国家级气象站数据来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)中国地面气候资料日值数据集 V3.0,包括逐日降水量、逐日最高气温与最低气温。

卫星遥感数据包括 PERSIANN-CDN、TRMM。PERSIANN-CDN 是由 International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) B1 data 数据与 GPCP version 2.2 融合后的 GridSat-B1 IR 产品数据发展而来,并经 GPCP 逐月数据进行修正得到的高时空分辨率产品,覆盖了全球 60°S~60°N 的地区,时间范围为 1983—2021 年^[33]。TRMM(<https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>)是由 NASA 与日本国家宇宙开发机构联合发射的旨在监测与研究热带与亚热带降水的系列卫星,本文使用的数据集为 TRMM 3B42V7,它是经 TMPA 算法处理得到的降水数据,且使用 GPCC 逐月数据进行了偏差纠正,产品的空间分辨率为 0.25°,覆盖 50°S~50°N 的区域,时间范围为 1998—2019 年。

CFSR(<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>)是由美国国家环境预报中心(NCEP)与国家大气研究中心(NCAR)联合发布的覆盖全球的第三代再分析产品,产品耦合大气-海洋-陆表以及海冰系统并进行了多源卫星数据同化,可提供 1979—2014 年逐日尺度上的降水、气温、相对湿度、风速、太阳辐射等资料。

本文采用的降水与温度产品的具体参数详见表 1。以上所有的遥感产品在 Google Earth Engine 云平台进行在线处理与下载,由于本文水文模型的气象输入模块需要按站点进行数据整理,因此对于遥感格网数据的处理方法为获取实测气象站点所对应的 1 km²缓冲区对应的平均值作为该站点某种产品的降水数据。

除气象数据外,本文用到的湘潭站逐月流量来自湖南省水文水资源勘测中心,时间范围为 1983 年 1 月至 2013 年 12 月,用于月尺度上水文模型的率定与验证。

2.2 研究方法

2.2.1 水文模型

由于应用范围广、界面友好、源代码公开等优点,SWAT(soil & water assessment tool)模型被广泛应用于径流模拟^[34]且已有研究证明该模型在湘江流域水量模拟的适用性较好^[35],因此本文选取 SWAT 模型作为研究工具。SWAT 模型是由美国农业部开发的半分布式水文模型,是基于物质能量平衡的物理模型,该模型以水文响应单元(HRU)为最小的空间计算单元。SWAT 模型用于径流量模拟,主要步骤包括基础数据库构建(包括地形、土地利用、土壤、气象)、参数敏感性分析以及模型校准与验证 3 个部分。用于敏感性分析与参数率定的程序为 SWAT-CUP,采用的率定方法为 SUFI-2,其中模型率定用到的评价性指标包括决定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)、相对误差(RE)。Moriasi 等^[36]认为对于流域尺度的模型,当 R^2 大于 0.6, NSE 大于 0.5, RE 小于等于 $\pm 15\%$ 可认为模型精度令人满意。

2.2.2 径流极值序列选取

极值理论中常利用年最大值序列法(annual maximum, AM)与超门限峰值序列法(peak over threshold, POT)选取径流极值序列。但 2 种方法要么所选取的数据偏少要么选取方法复杂。FDC(flow duration curve)曲线刻画了径流极高值到径流极低值所对应的累积超出百分比。为了保证本文月尺度径流量数据极值选取的高效、合理,借鉴 Liersch 等^[37]的方法,利用径流历时曲线结合分位数划分径流极值范围。将径流量从高到低排序后,划分径流极低值(EL)、径流极高值(EH)以及非径流极值(NE),其中 5% 分位数(Q_5)、10% 分位数(Q_{10})代表径流极高值序列,90% 分位数(Q_{90})、95% 分位数(Q_{95})代表径流极低值序列, $Q_{10} \sim Q_{90}$ 之间的范围定义为非径流极值。为对不同类型降水、气温产品组合径流极值模拟进行精确地评估,选取均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)作为评价指标进行评价。

2.2.3 极端气候指数选取

从世界气象组织推荐的 27 个极端气候指标中选取了常用的 8 个的极端降水指标(R_{x1} 、 R_{x5} 、 $SDII$ 、 R_{10} 、 R_{20} 、 CDD 、 CWD 、 $PRCPTOT$)与 4 个极端气温指标(FDO 、 $SU25$ 、 TX_x 、 TN_n)表征极端降水与极端气温特征,各气象站点极端降水与极端气温指数的计算借助 RClimDex1.0 软件,对应地取流域内所有站点某指数的均值作为该指数在整个研究区的值。

3 结果与分析

3.1 径流模拟精度评价

基于实测气象数据的 SWAT 模型径流模拟表明,总体模拟效果较好,率定期(1984—2003 年), R^2 与 NSE 皆为 0.9 以上,验证期(2004—2013 年) R^2 与 NSE 分别为 0.91 与 0.89。另外,需要考虑模型的不确定性^[38],在 SWAT 模型中,所有不确定性的程度通过 P-factor 衡量,其含义为在 95% 预测不确定性区间(95ppu)以内监测数据的百分比,R-factor 则为 95ppu 带的平均厚度除以监测数据标准偏差。本文中 P-factor 为 0.73、R-factor 为 0.69,二者达到了平衡,模拟具有较高的可靠性,月尺度上该套参数的拟合效果较好。将 TRMM、PERSIANN-CDR、CFSR 产品进行降水、气温组合,共得到 A~H 8 种气象输入组合(表 2),借助水文模型探究不同气象输入数据组合的径流模拟精度,为防止过多参数带来的模拟结果的不确定性,所有组合使用同一套

表 1 降水与温度产品基本参数

Table 1 Basic parameters of precipitation and temperature products				
产品	研究时段	获取变量	空间分辨率	时间分辨率
中国地面气候资料日值数据集 V3.0	1983—2013 年	降水量和最高、最低气温		逐日
TRMM 3B42V7	1998—2013 年	降水量	0.25°×0.25°	3 h
PERSIANN-CDN	1983—2013 年	降水量	0.25°×0.25°	逐日
CFSR	1983—2013 年	降水量和最高、最低气温	0.313°×0.313°	逐日

由地面气象站点数据率定所优选的水文参数,方案 A 作为基准组合与其他方案进行对比。

表 2 各组合的径流模拟评价结果

Table 2 Evaluation results of runoff simulation for each combination

编号	组合的产品	R^2	NSE	RE/%	评价
A	站点降水,站点气温	0.94	0.91	8.26	满意
B	CFSR 降水,CFSR 气温	0.35	-0.05	-67.77	一般
C	CFSR 降水、站点气温	0.42	0.04	-74.87	一般
D	PERSIANN-CDN 降水、站点气温	0.67	0.50	19.15	较为满意
E	TRMM 降水、站点气温	0.87	0.70	8.61	满意
F	站点降水,CFSR 气温	0.92	0.89	9.23	满意
G	PERSIANN-CDR 降水、CFSR 气温	0.66	0.57	19.15	较为满意
H	TRMM 降水,CFSR 气温	0.81	0.79	8.36	满意

根据表 2,径流模拟精度的评价结果可以大致分为满意、较为满意与一般 3 个层次(满意:E、F、H, R^2 与 NSE 皆大于 0.8;较为满意:D、G, R^2 皆大于 0.6,NSE 皆大于 0.5;一般:B、C,NSE 小于 0.1,模拟效果最差)。除基准情景外,F 组合的模拟精度最高($R^2=0.92$,NSE=0.89),模拟精度最差的是 B, $R^2=0.35$,NSE 小于 0。8 个组合模拟精度由高到低顺序为 A、F、E、H、D、G、C、B。在无实测数据的组合中(B、G、H),H 组合的 R^2 与 NSE 分别为 0.81、0.79,最接近基准组合 A,是替代实测降水与气温的最佳遥感产品组合。

3.2 径流极值分析

分别计算除基准情景 A 外的 7 种方案在 Q_5 、 Q_{10} 、 Q_{90} 、 Q_{95} 各序列的均方根误差,判断各组合在不同极值序列的径流极值捕捉能力(表 3)。所有的组合中,C 组合均方根误差最大,对径流极值的捕捉能力最弱,径流极高值、极低值捕捉能力最强的分别是 F、E 组合。同一组合方案在不同极值序列捕捉径流极值的表现非常一致,说明以上组合捕捉径流极值能力具有稳定性。在只有遥感数据的 3 种组合中(B、G、H),H 组合对径流极高值的捕捉精度最高,均方根误差分别为 573.8(Q_5)、647.9(Q_{10}),G 组合模拟径流极低值的精度最高,均方根误差分别为 185.2(Q_{90})、177.9(Q_{95})。

表 3 各组合方案不同序列的均方根误差统计结果

Table 3 Statistical results of root mean square error of different sequences for each combination scheme

编号	Q_5	Q_{10}	Q_{95}	Q_{90}
B	1221.3	1236.9	4622.8	3311.1
C	1552.1	1788.1	4661.3	3321.4
D	1361.3	1123.7	178.4	173.9
E	619.7	662.1	112.8	110.1
F	248.9	223.6	128.7	135.1
G	1343.3	1108.1	185.2	177.9
H	573.8	647.9	205.3	197.4

计算每种组合与基准组合之间的相对误差,探究不同组合对径流极值的高估或低估程度。总体而言,B、C 组合高估径流量,高估 67.8%~74.9%,其余组合皆低估径流,平均低估不超过 20%。在各径流极值序列中(图 2),CFSR 降水参与的组合(B、C)径流极值模拟结果皆为高估,高估 8.9%~653.6%,其余组合皆不同程度地低估径流,低估 14.5%~67.5%。B 与 C,D 与 G,E 与 H 分别具有相同降水的组合,由气温数据不同导致的径流极值相对误差差别较小,对比 C、D、E 与 B、F、G、H 两组具有相同气温的组合,相对误差差距较大,表明在该研究范围内降水对径流极值模拟误差的影响大于气温。

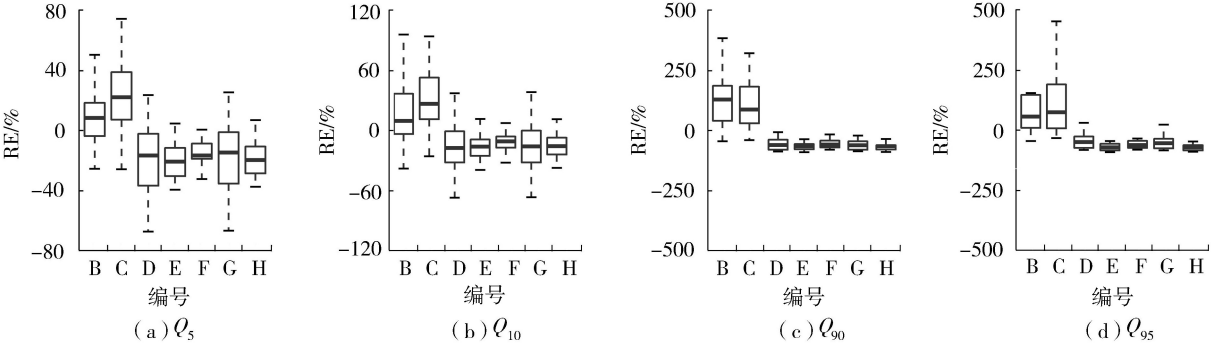


图 2 不同组合径流极值的相对误差箱线图

Fig.2 Relative error boxplots of runoff extremes in different combination scheme

为探究径流极值误差是否随径流量大小发生规律性变化,需要剔除模型水文参数误差的影响。图 3 为经误差剔除后各组合在不同分位数范围内的均方根误差,可以发现,除 B、C 方案外,其余组合则表现出径流极低值模拟误差小于径流极高值模拟误差的特征。Bastola 等^[39]发现,在考虑水文模型参数误差的基础上,考虑水文模型结构误差时,误差将增加 20%。本文仅使用了一种模型,无法进行水文模型结构误差的比较与消除,但有关基于雨量站降水的研究发现随着最大 1 d、3 d、7 d 流量均值的减小,各站点情景的模拟结果相应误差也逐渐减小^[40],这与本文的研究结果一致(图 3(a)),因此本研究中的模型结构误差不足以影响研究结论。B、C 两种组合与其他方案的结果相反,表现为模拟误差随径流值减小而增大,分析 CFSR 降水相对偏差发现, Q_5 、 Q_{10} 、 Q_{90} 、 Q_{95} 的降水相对偏差分别为 38.77%、47.83%、53.07%、61.60%,即径流极低值序列对应的降水偏差大于径流极高值序列的降水偏差,表明 B、C 组合呈现出的误差随径流值减小而增大的规律是受 CFSR 产品降水特征的影响。

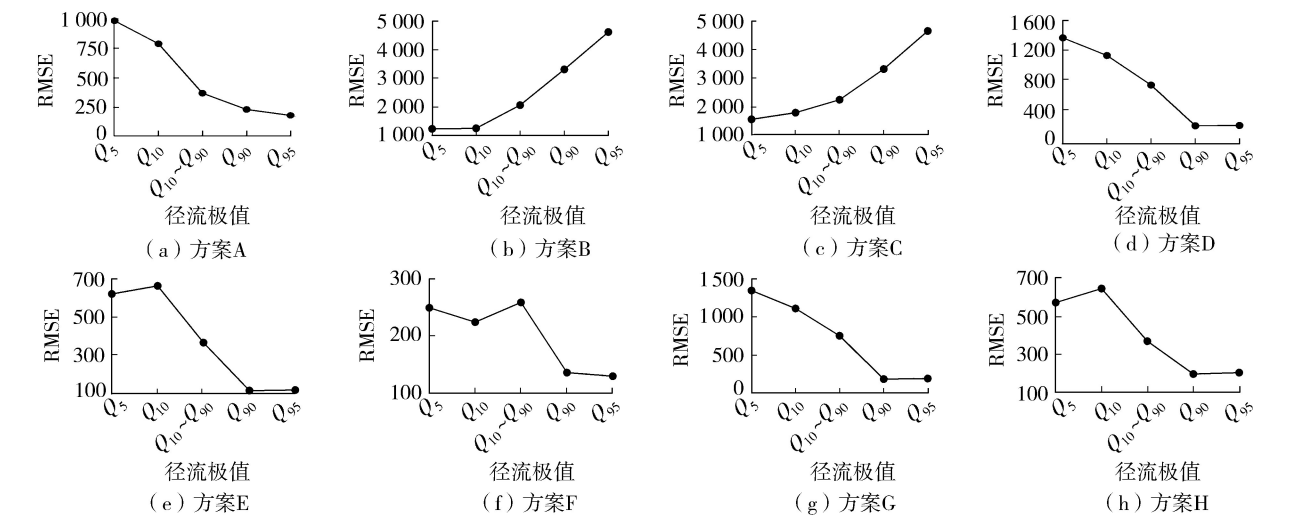


图 3 8 种组合的径流极值误差分析

Fig. 3 Analysis of runoff extreme value error for eight combinations

3.3 径流极值与极端降水关系解析

根据图 3,具有相同降水输入的 B 与 C、D 与 G、E 与 H 组合的径流极值误差变化分别具有相同的变化特征,通过分析极端降水指数与径流极值的关系进一步研究不同降水产品如何影响径流极值。根据图 4,

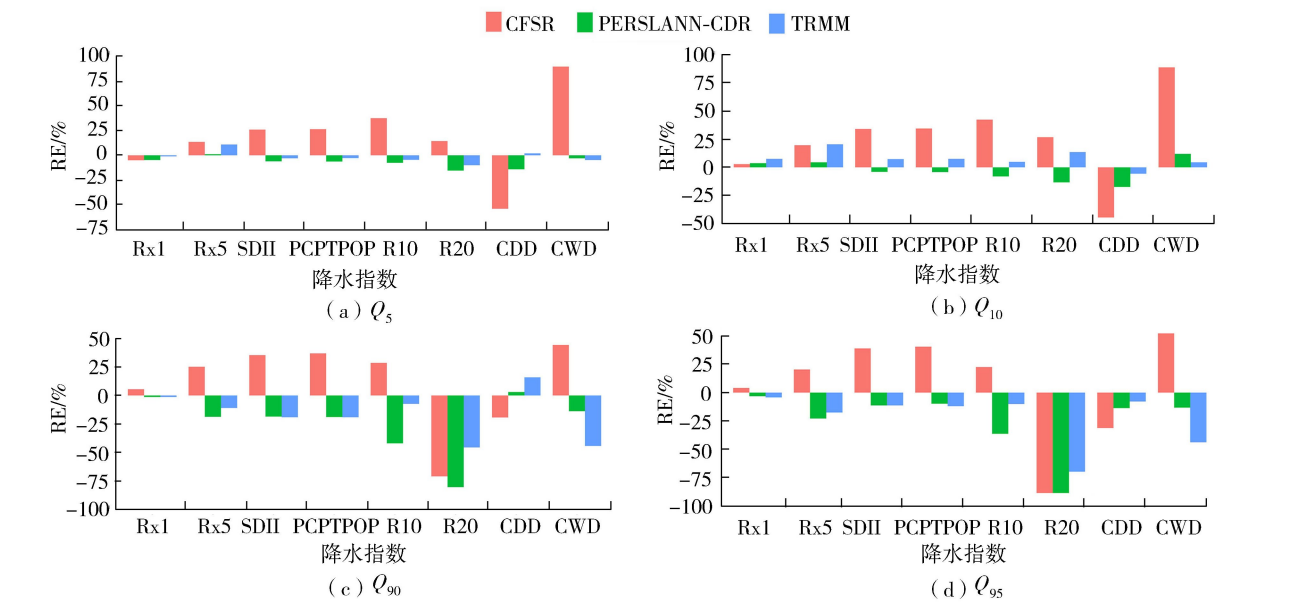


图 4 各降水产品极端降水指标相对误差

Fig. 4 Relative error of extreme precipitation index for each precipitation product

TRMM 降水在 Q_5 序列的极端降水指数 R_{x1} 、SD II、PRCPTOT、 R_{10} 、 R_{20} 、CDD 与气象站点对应的极端降水指数相对偏差最小,相对偏差范围为-1%~10%, Q_{10} 序列中,与 CFSR、PERSIANN-CDR 相比 TRMM(-5.6%~13.6%)的 R_{10} 、 R_{20} 、CDD、CWD 相对偏差最小,表明较于其他 2 种产品,径流极高值序列中 TRMM 更能反映极端降水的发生频率以及无雨历时等特征;在 Q_{90} 与 Q_{95} 序列中,PERSIANN-CDR 的 R_{x1} 、SD II、PCPTPOP、CWD 相对偏差最小,相对偏差范围分别为-1.2%~-19.0% (Q_{90})、-3.1%~-13.1% (Q_{95}),表明较于其他 2 种产品,径流极低值序列中 PERSIANN-CDR 更能反映极端降水的强度、总量以及持续时间。Liu 等^[41]对 PERSIANN-CDR 与 TRMM 完整降水序列的极端降水指数比较发现,TRMM 产品 R_{10} 、 R_{20} 与实测降水的 R_{10} 、 R_{20} 更为接近,PERSIANN-CDR 产品的 SD II 与实测降水的 SD II 更为接近,但关于极端降水历时、总量特征的结果与本研究不一致,究其原因,本研究是针对不同的极值序列进行极端气候指数的计算,同一产品对极高值序列与极低值序列降水特征的反应能力也存在差异。

分析 Q_5 、 Q_{10} 、 Q_{90} 、 Q_{95} 径流极值序列所对应的极端降水,CFSR 降水表现为高估极端降水量总量、频次、强度以及降水发生的持续时间,其相对偏差较其他产品皆最大,同时 CFSR 降水严重低估持续干日(CDD)的结果,相对偏差分别为-53.5% (Q_5)、-44.6% (Q_{10})、-19.4% (Q_{90})、-31.2% (Q_{95})。

4 讨 论

降水与气温是影响径流的 2 个最关键的气象要素,选取几种降水与气温产品探究不同组合对径流极值模拟结果的影响。无实测数据的组合中,TRMM 降水与 CFSR 气温、PERSIANN-CDR 降水与 CFSR 气温 2 种组合分别模拟径流极高值与径流极低值时具有最小的均方根误差,Zhang 等^[42]在西南地区的红河流域上游进行日尺度上径流模拟,对于超过 90% 分位数的径流极高值,TRMM 与 PERSIANN-CDR 分别低估 19.1%、28%,与本文研究结果相近,但径流极低值的结果存在较大差异,小于 50% 分位数的径流极低值分别高估 18.9%、49.4%,表明基于卫星产品的径流极低值模拟受区域差异的影响而存在较大的不确定性,Thiemig 等^[43]也发现 TRMM 等遥感产品对径流极高值的模拟性能好于径流极低值。鉴于较大的不确定性,在进行径流极低值模拟应用时,卫星数据经数据融合、偏差纠正后再应用到具体的研究中将更加妥当^[44]。

在湘江流域,降水产品是导致径流极值误差分布存在差异的主要原因,Seyyedi 等^[45]在美国东北部的萨斯奎哈纳河流域对 TRMM 3b42v7 降水与 GLDAS 再分析降水产品进行径流模拟误差传递效应研究也得到同样的结果。气温产品之间的差异对径流模拟也具有重要的影响,CFSR 气温与气象站点实测气温的绝对偏差较小(图 5),FD0 与 SU25 绝对误差不超过 1 d, TXx 的绝对误差不超过 1.5℃, TNn 的绝对误差不超过 1℃,说明 CFSR 能够比较精确地反映逐日最高、最低气温以及月尺度上的极端气温,这与 Lu 等^[46]的研究结论一致。其次气温对极端径流的影响往往在寒区更加明显,如受气候变暖的影响,未来长江上游融雪径流将减少 36%~39%,而极端径流也将小幅度减少^[47],而本研究位于长江中游的亚热带季风气候区,不存在融雪径流,因此气温对极端径流的影响较小。

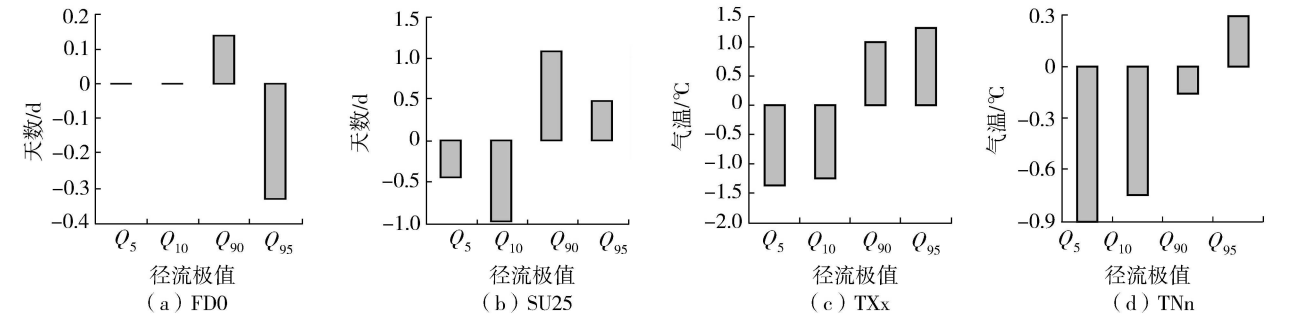


图 5 CFSR 极端气温指数绝对误差
Fig.5 Absolute error of CFSR extreme temperature index

5 结 论

a. 在湘江流域不使用实测气象资料的情况下,TRMM 降水与 CFSR 气温组合在水文模型中的表现最接

近实际情况。TRMM 降水与 CFSR 气温、PERSIANN-CDR 降水与 CFSR 气温 2 种组合的径流极值模拟结果分别最接近实测径流极高值、极低值,平均相对误差分别为-15.8%与 44.8%。考虑实测气象数据时,除基准情景外,实测降水与 CFSR 气温、TRMM 降水与站点气温分别是径流极高值、径流极低值模拟精度最高的两组组合,平均相对误差分别为-12.7%与-64.0%。

b. 在典型亚热带季风气候区湘江流域,降水产品的误差是导致径流极值误差分布存在差异的主要原因,3 种降水产品从降水到径流之间的误差传递特征表现为:CFSR 降水模拟的径流极低值误差大于径流极高值误差,TRMM 与 PERSIANN-CDR 降水模拟的径流极高值误差大于径流极低值误差。

c. 同一降水产品在不同的径流极值序列中表现出的极端降水特征不同,因而对径流极高值与极低值捕捉能力存在差异。径流极高值序列对应的 TRMM 降水对极端降水发生频率、连续干日持续特征具有高表征能力,径流极低值序列对应的 PERSIANN-CDR 降水对极端降水强度、总量以及历时特征具有高表征能力。

参考文献:

[1] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护,2022,38(1):100-105. (LIU Jiahong,LUO Zhuoran,ZHANG Yongxiang,et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):100-105. (in Chinese))

[2] 王辉,吴文俊,王广,等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. 水资源保护,2021,37(4):61-68. (WANG Hui,WU Wenjun,WANG Guang,et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):61-68. (in Chinese))

[3] PAPALEXIOUS S M,MONTANARI A. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming[J]. Water Resources Research,2019,55(6):4901-4914.

[4] 任立良,王宇,江善虎,等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):26-32. (REN Liliang,WANG Yu,JIANG Shanhu,et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):26-32. (in Chinese))

[5] ROXY M K,GHOSH S,PATHAK A,et al. A threefold rise in widespread extreme rain events over central India[J]. Nature Communications,2017,8(1):1-11.

[6] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang,ZHU Shuang,LUO Xiangang,et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):515-520. (in Chinese))

[7] THOMPSON J R,GOSLING S N,ZAHERPOUR J,et al. Increasing risk of ecological change to major rivers of the world with global warming[J]. Earth's Future,2021,9(11):e2021EF002048.

[8] LUCAS-BORJA M E,CARRA B G,NUNES J P,et al. Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil)[J]. Hydrological Sciences Journal,2020,65(11):1956-1973.

[9] AGNER P D,FIENER P,WILKEN F,et al. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions[J]. Journal of Hydrology,2012,464:388-400.

[10] WANG W,SUN L,CAI Y,et al. Evaluation of multi-source precipitation data in a watershed with complex topography based on distributed hydrological modeling[J]. River Research and Applications,2021,37(8):1115-1133.

[11] 温馨,周纪,刘绍民,等. 基于多源产品的西南河河源区地表蒸散发时空特征[J]. 水资源保护,2021,37(3):32-42. (WEN Xin,ZHOU Ji,LIU Shaomin,et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):32-42. (in Chinese))

[12] WU Y,GUO L,ZHENG H,et al. Hydroclimate assessment of gridded precipitation products for the Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment,2019,660:1555-1564.

[13] 范田亿,张翔,黄兵,等. TRMM 卫星降水产品降尺度及其在湘江流域水文模拟中的应用[J]. 农业工程学报,2021,37(15):179-188. (FAN Tianyi,ZHANG Xiang,HUANG Bing,et al. Downscaling of TRMM satellite precipitation products and its application in hydrological simulation of Xiangjiang River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2021,37(15):179-188. (in Chinese))

[14] WARD E,BUYTARET W,PEAVER L,et al. Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: a water resources perspective[J]. Advances in Water Resources,2011,34(10):1222-1231.

[15] VU M T,RAGHAVAN S V,LIONG S Y. SWAT use of gridded observations for simulating runoff-a Vietnam river basin study[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(8):2801-2811.

- [16] 刘培,吴凯,许怡,等. 中国大陆 TRMM 降水多尺度精度评价[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):42-47. (LIU Pei, WU Kai, XU Yi, et al. Multi-scale accuracy evaluation of TRMM precipitation data in mainland China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):42-47. (in Chinese))
- [17] ZHANG Y, WU C, YE H P J F, et al. Evaluation and comparison of precipitation estimates and hydrologic utility of CHIRPS, TRMM 3B42 V7 and PERSIANN-CDR products in various climate regimes[J]. Atmospheric Research, 2022, 265:105881.
- [18] CHEN S, LIU B, TAN X, et al. Inter-comparison of spatiotemporal features of precipitation extremes within six daily precipitation products[J]. Climate Dynamics, 2020, 54(1):1057-1076.
- [19] 王戎蓉,周建中,杨鑫,等. 再分析降水资料的适用性评估与偏差校正:以长江中下游地区为例[J]. 人民长江, 2021, 52(9):93-100. (WANG Yurong, ZHOU Jianzhong, YANG Xin, et al. Applicability evaluation and deviation correction of analysis precipitation data: case of middle and lower reaches of Changjiang River[J]. Yangtze River, 2021, 52(9):93-100. (in Chinese))
- [20] 汪小菊,王文,王鹏. GLDAS 月气温数据在中国区的适用性评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11):10-13. (WANG Xiaoju, WANG Wen, WANG Peng. Assessing applicability of GLDAS monthly temperature data in China[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11):10-13. (in Chinese))
- [21] LU J, LIU Z, LIU W, et al. Assessment of CFSR and CMADS weather data for capturing extreme hydrologic events in the Fuhe River Basin of the Poyang Lake[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2020, 56(5):917-934.
- [22] LAURI H, RASANEN T A, KUMMU M. Using reanalysis and remotely sensed temperature and precipitation data for hydrological modeling in monsoon climate: Mekong River case study[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(4):1532-1545.
- [23] ZHANG G, SU X, AYANTOBO O O, et al. Remote-sensing precipitation and temperature evaluation using soil and water assessment tool with multiobjective calibration in the Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125416.
- [24] ZHU Qian, HSU Kuolin, XU Yueping, et al. Evaluation of a new satellite-based precipitation data set for climate studies in the Xiang River Basin, Southern China[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(13):4561-4575.
- [25] TIAN B, CHEN H, WANG J, et al. Accuracy assessment and error cause analysis of GPM (V06) in Xiangjiang River catchment [J]. Hydrology Research, 2021, 52(5):1048-1065.
- [26] WANG J, CHEN H, XU C Y, et al. Tracking the error sources of spatiotemporal differences in TRMM accuracy using error decomposition method[J]. Hydrology Research, 2018, 49(6):1960-1976.
- [27] 朱仟. 气候变化下降水输入和水文模型参数对水文模拟的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [28] 杨开斌,朱坚,葛朝霞,等. ENSO 事件影响下长江大通站汛期径流预测建模分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5):5-8. (YANG Kaibin, ZHU Jian, GE Zhaoxia, et al. Model establishment analysis of flood season runoff prediction of Datong Station on the Yangtze River under ENSO events' influence[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(5):5-8. (in Chinese))
- [29] 徐卫红,张双虎,蒋钟钟,等. 洞庭湖区洪水组成及遭遇规律研究[C]//流域水循环与水安全:第十一届中国水论坛论文集. 广州:中国水利学会, 2013:489-495.
- [30] 罗巧,王克林,王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):1431-1436. (LUO Qiao, WANG Kelin, WANG Qinxue. Using SWAT to simulate runoff under different land use scenarios in Xiangjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6):1431-1436. (in Chinese))
- [31] 沈倩娜,张霞. 湘江 2017 年与 2019 年两场特大洪水的对比分析[J]. 水文, 2021, 41(2):80-85. (SHEN Qianna, ZHANG Xia. Comparative analysis of Xiangjiang River catastrophic floods in 2017 and 2019[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2):80-85. (in Chinese))
- [32] 杜鹃,徐伟,赵智国,等. 湘江流域近 30 年径流量与水位长期变化规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3):369-378. (DU Juan, XU Wei, ZHAO Zhiguo, et al. Trends of runoff and water level over the past thirty years in Xiangjiang River Basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(3):369-378. (in Chinese))
- [33] ASHOURI H, HSU K L, SOROOSHIAN S, et al. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(1):69-83.
- [34] 李镇洋,李国芳,高倩雨,等. 变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2):35-40. (LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Runoff response of Fulaerji Station in Nenjiang River under changing environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2):35-40. (in Chinese))
- [35] WU Y, LIU S, YAN W, et al. Climate change and consequences on the water cycle in the humid Xiangjiang River Basin, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 30(1):225-235.
- [36] MORIASI D, GITAU M, PAI N, et al. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(6):1763-1785.

[17] NELSEN R B. An introduction to Copulas;Springer series in statistics[M]. NewYork:Springer,,1999.

[18] VANDENBERGHE S,VERHOEST N E C,ONOF C,et al. A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events;a case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall[J]. Water Resources Research,2011,47(7):197-203.

[19] SRAJ M,BEZAK N,BRILLY M. Bivariate flood frequency analysis using the copula function;a case study of the Litija station on the Sava River[J]. Hydrological Processes,2015,29(2):225-238.

[20] GRALER B,VAN DEN BERG M J,VANDENBERGHE S,et al. Multivariate return periods in hydrology;a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013,17:1281-1296.

[21] 陈子桑,黄强,刘曾美. 变化环境下西江北江枯水流量联合分布分析[J]. 水科学进展,2015,26(1):20-26. (CHEN Zisheng,HUANG Qiang,LIU Zengmei. Analysis on the return level of joint distribution of low water flow of Xijiang River and Beijiang River under changing environment[J]. Advances in Water Science,2015,26(1):20-26. (in Chinese))

[22] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报,2018,49(9):1123-1136. (GUO Liang,DING Liuqian,SUN Dongya,et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(9):1123-1136. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-21 编辑:刘晓艳)

+++++
(上接第 16 页)

[37] LIERSCH S,TECKLENBURG J,RUST H,et al. Are we using the right fuel to drive hydrological models? A climate impact study in the Upper Blue Nile[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(4):2163-2185.

[38] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):116-122. (HE Xinyue,ZENG Xiankui,WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):116-122. (in Chinese))

[39] BASTOLA S,MURPHY C,SWEENEY J. The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish River catchments[J]. Advances in Water Resources,2011,34(5):562-576.

[40] 刘冀,覃巍,郑定湘,等. 卫星降雨在流域水文设计中适用性分析[J]. 水电能源科学,2019,37(6):12-15. (LIU Ji,QIN Wei,ZHENG Dingxiang,et al. Simulatting extreme streamflow for hydrological calculation using satellite-based precipitation forcing[J]. Water Resources and Power,2019,37(6):12-15. (in Chinese))

[41] LIU J,XIA J,SHE D,et al. Evaluation of six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over a climate transition area in China[J]. Remote Sensing,2019,11(12):1477.

[42] ZHANG Y,LI Y,JI X,et al. Evaluation and hydrologic validation of three satellite-based precipitation products in the upper catchment of the Red River Basin,China[J]. Remote Sensing,2018,10(12):1881.

[43] THIEMIG V,ROJAS R,ZAMBRANO-BIGIARINI M,et al. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin[J]. Journal of Hydrology,2013,499:324-338.

[44] 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))

[45] SEYYEDI H,ANAGNOSTOU E N,BEIGHLEY E,et al. Hydrologic evaluation of satellite and reanalysis precipitation datasets over a mid-latitude basin[J]. Atmospheric Research,2015,164:37-48.

[46] LU J,LIU Z,LIU W,et al. Assessment of CFSR and CMADS weather data for capturing extreme hydrologic events in the Fuhe River Basin of the Poyang Lake[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association,2020,56(5):917-934.

[47] HUANG Y,XIAO W,HOU B,et al. Hydrological projections in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 2020 to 2050 [J]. Scientific Reports,2021,11(1):1-21.

(收稿日期:2022-04-06 编辑:刘晓艳)