

基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析

林雍权¹, 陈启慧¹, 李琼芳^{1,2}, 张静芳³, 张 炜⁴, 尹瑞琪¹, 方凯悦¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 呼和浩特水文水资源分中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 内蒙古自治区水利发展中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为分析 20 世纪 60 年代以来气候变化和人类活动对老挝南俄河流域径流变化的贡献率, 基于流域内地面站点实测降水数据, 对广泛应用于湄公河流域的 APHRODITE 和 MSWEP 两种卫星降水产品日降水数据进行了偏差校正, 采用经校正的基准期卫星日降水和白冠洪、欣赫普两站点实测日径流资料构建了新安江模型, 模拟还原了流域水库影响期的天然日径流过程, 定量分析了气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明: 南俄河流域年径流总体呈下降趋势; 白冠洪站两个水库影响期气候变化对径流变化的贡献率分别为-429%和-399%, 欣赫普站水库影响期气候变化对径流变化的贡献率为-380%, 而对应的人类活动贡献率分别为 529%、499%和 480%, 人类活动是流域径流变化的主要原因; 以水库运行为主的人类活动对径流年内分配影响显著, 丰水期人类活动影响量的绝对值超过气候变化影响量绝对值的 2 倍。

关键词:径流变化; 卫星降水; 新安江模型; 敏感性分析; 南俄河流域

中图分类号: P333; TV697.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2024)03-0021-06

Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin'anjiang model// LIN Yongquan¹, CHEN Qihui¹, LI Qiongfang^{1,2}, ZHANG Jingfang³, ZHANG Wei⁴, YIN Ruiqi¹, FANG Kaiyue¹
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hohhot Hydrology and Water Resources Branch Center, Hohhot 010010, China; 4. Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot 010020, China)

Abstract: In order to analyze the contribution rate of runoff variability from climate change and human activities in the Nam Ngum River Basin in Laos since the 1960s, the daily precipitation data from two widely used satellite precipitation products in the Mekong River Basin, APHRODITE and MSWEP, were bias-corrected based on the measured precipitation data from ground stations in the basin. The Xin'anjiang model was constructed using corrected satellite daily precipitation and measured daily runoff data from Pakkanhoung and Hinheup stations during reference period, and the natural daily runoff process in the basin during reservoir influence periods was simulated. The contribution rate of climate change and human activities to runoff variability was quantified. The results show that there is a general downward trend in annual runoff in the Nam Ngum River Basin. The contribution rates of climate change to the runoff variability during the two reservoir influence periods were -429% and -399% at the Pakkanhoung station, respectively, and the contribution rate was -380% at the Hinheup station. The corresponding anthropogenic contribution rates were 529%, 499% and 480%, respectively. Anthropogenic activities are the main cause of runoff variability in the basin. Anthropogenic activities mainly based on reservoir operation, have a significant imp.

Key words: runoff variability; satellite precipitation; Xin'anjiang model; sensitivity analysis; Nam Ngum River Basin

随着气候变化和人类活动的影响加剧, 全球前 200 大河流中有 45 条的径流量呈现显著下降趋

势^[1], 定量分析气候变化和人类活动对径流的影响已经成为水资源演变规律研究领域的热点问题^[2-3]。

基金项目:国家社会科学基金项目(19BGL181); 新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心(院士专家工作站)合作研究项目(2020-E-001)

作者简介:林雍权(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: 1770400449@qq.com

通信作者:陈启慧(1974—), 女, 副教授, 博士, 主要从事生态水文及水生态保护研究。E-mail: chenqh@hhu.edu.cn

间为 1961—2015 年,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 0.25°,研究区共包含 27 个格点;MSWEP 则提供 1979 年至今每 3 h 0.1°的降水数据,本文使用时将降水数据降尺度为 1 d,研究区共包含 146 个格点。

2 研究方法

2.1 卫星降水数据偏差校正

为解决卫星降水数据与实测降水数据之间存在偏差的问题,高超等^[14]提出了分段三伽马偏差校正法。采用伽马函数分别拟合实测和卫星降水序列的累积分布函数,计算各时段卫星降水的累积频率并通过实测降水的累积频率函数映射转化为校正后降水。为避免极值分布差异对拟合效果的影响,以 10% 和 90% 两个分位点作为极小值和极大值分位点将降水序列分为 3 段,分段对降水序列进行偏差校正,具体校正方法见文献[14]。采用相对偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)、相关系数(*R*)3 个指标对校正前后降水数据的精度进行评估^[15]。

2.2 新安江模型构建

南俄河流域降水充沛,属于湿润地区,适用新安江模型^[16]。以校正后的卫星降水数据驱动新安江模型模拟流域内白冠洪与欣赫普两站点径流,并采用水库建设前的天然径流序列进行模型参数率定和验证。其中白冠洪站 1963—1969 年为率定期,1970—1971 年为验证期;欣赫普站 1980—2003 年为率定期,2004—2009 年为验证期。模型适用性评价指标选用纳什效率系数(NSE)与径流深相对误差(RE),当 NSE 大于 0.75、RE 在-20%~20%之间时,认为模型模拟效果较好。

2.3 径流变化贡献率分析

以南立 1-2 水库建成年份为界将欣赫普站径流序列划分为基准期(1980—2009 年)和水库影响期(2010—2018 年);与流域内其他水库相比,南俄 1 水库建成时间较早,因此将白冠洪站径流序列划分为基准期(1963—1971 年)、水库影响期 I (1972—2009 年)和水库影响期 II (2010—2018 年)3 个时期。

利用构建的新安江模型,输入水库影响期的气象资料驱动模型模拟水库影响期的天然径流(以下简称“水库影响期模拟径流”)。利用基准期实测径流和水库影响期模拟径流的差异分析气候变化对径流变化的贡献率;利用水库影响期实测径流和模拟径流的差异分析人类活动对径流变化的贡献率^[7,17]。具体计算公式如下:

$$\Delta R_T = \Delta R_C + \Delta R_H = R_v - R_b \tag{1}$$

$$\Delta R_C = R_m - R_b \tag{2}$$

$$\Delta R_H = R_v - R_m \tag{3}$$

$$\eta_C = (\Delta R_C / \Delta R_T) \times 100\% \tag{4}$$

$$\eta_H = (\Delta R_H / \Delta R_T) \times 100\% \tag{5}$$

式中: ΔR_T 为径流变化总量; ΔR_C 、 ΔR_H 分别为气候变化、人类活动引起的径流变化量; R_v 、 R_b 分别为水库影响期和基准期实测径流; R_m 为水库影响期模拟径流; η_C 、 η_H 分别为气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。

2.4 模拟计算结果不确定性分析

受模型输入数据、模型参数等不确定性的影响,采用水文模型模拟流域径流过程时也会存在不确定性,因此需要对模拟结果及贡献率计算结果的合理性进行分析。对新安江模型而言,蒸散发能力折算系数 KC 控制着总水量的平衡,是模型计算最为重要与敏感的参数^[18]。因此本文分别对校正后的卫星降水数据与 KC 进行敏感性分析,对于校正后的卫星降水数据,以 2% 为变化步长,在±20% 的范围内进行变动;对于 KC,以 0.1 为变化步长,在±0.5 的范围内进行变动^[8]。以白冠洪站为例,在卫星降水数据和 KC 的不同变化水平下分别驱动模型进行计算,当变动后的卫星降水数据或 KC 模拟结果不满足模型模拟要求(NSE 大于 0.75、RE 在-20%~20%之间)时,计算该变动水平下的贡献率,并与初始贡献率计算结果进行对比,分析模型模拟不确定性对贡献率计算的影响。

3 结果与分析

3.1 降水适用性评估与偏差校正结果

适用性评估结果表明,APHRODITE 和 MSWEP 两种降水产品均能在一定程度上反映南俄河流域的降水空间分布特征,主要表现为从中部向四周逐渐降低。但两种产品在流域中部降水高值区的观测结果存在明显差异,MSWEP 的观测值更高。综合使用多个统计指标表征两种产品的在日尺度上的观测精度,发现两种产品在南俄河流域均表现出系统性低估,BIAS 分别为-35.15% 和-23.48%,RMSE 均超过 12 mm,*R* 分别为 0.73 和 0.63,说明观测值与实测值之间差距较大且无显著线性相关关系,不宜直接代替流域实测降水。

如图 2 所示,采用分段三伽马偏差校正法进行偏差校正后,两种产品的 BIAS 分别减小为-0.13% 和 0.18%,基本消除了系统偏差。RMSE 分别减小为 7.65 mm 和 8.67 mm,观测精度得到提升,且 *R* 提高到 0.88 和 0.81,呈显著线性相关关系。由于校正后 APHRODITE 的 *R* 与 RMSE 表现更优,因此 1963—2015 年采用校正后的 APHRODITE 降水数

据,由于 APHRODITE 数据集只提供到 2015 年,故 2016—2018 年采用校正后的 MSWEP 降水数据。

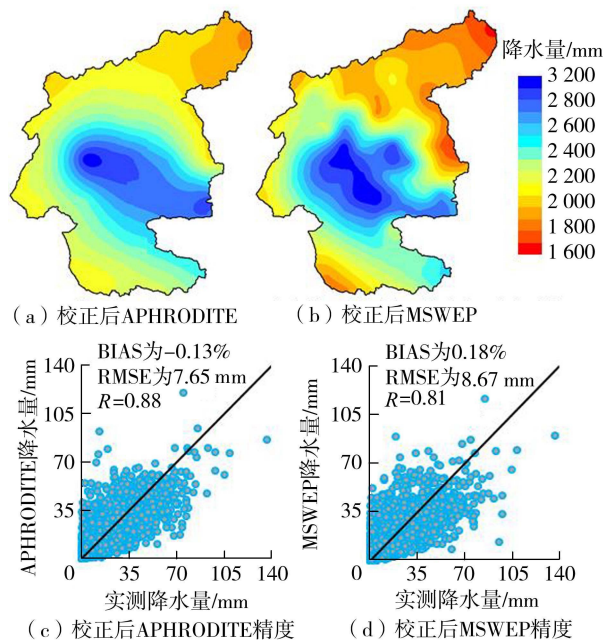


图2 校正后两种降水产品适用性评估

3.2 新安江模型模拟精度

以校正后的卫星降水数据驱动新安江模型对白冠洪站和欣赫普站基准期日径流过程进行模拟,模拟效果如图 3 所示,白冠洪站率定期 NSE 为 0.832、RE 为 8.4%,验证期 NSE 为 0.817、RE 为 7.1%;欣赫普站率定期 NSE 为 0.794、RE 为 11.4%,验证期 NSE 为 0.758、RE 为 18.7%,均满足模拟精度要求。说明采用校正后降水驱动的新安江模型能够较好地模拟研究区天然径流过程,可用于水库影响期天然

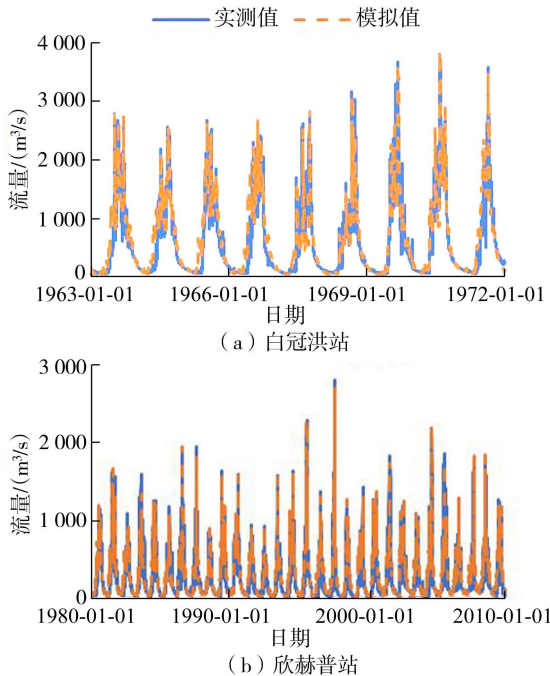


图3 两站点基准期日尺度径流模拟结果

径流过程的模拟。

3.3 径流变化贡献率

采用新安江模型模拟还原两站点水库影响期的天然日径流过程,并与同期的实测径流序列进行对比,图 4 清晰反映出实测径流丰水期低于模拟径流,而枯水期则高于模拟径流,且枯水期径流过程线十分平稳。计算得到两站点不同时期月径流离差系数如下:白冠洪站基准期为 1.23,水库影响期 I、II 分别为 1.12 和 0.99;欣赫普站基准期为 1.18,水库影响期为 0.95,说明受水库调度运行影响,两站点的离差系数均有所减小。可见水库调度运行显著影响下游径流年内分配,因此在定量分离气候变化和人类活动影响时按全年、丰水期和枯水期 3 种不同时间尺度进行分析。

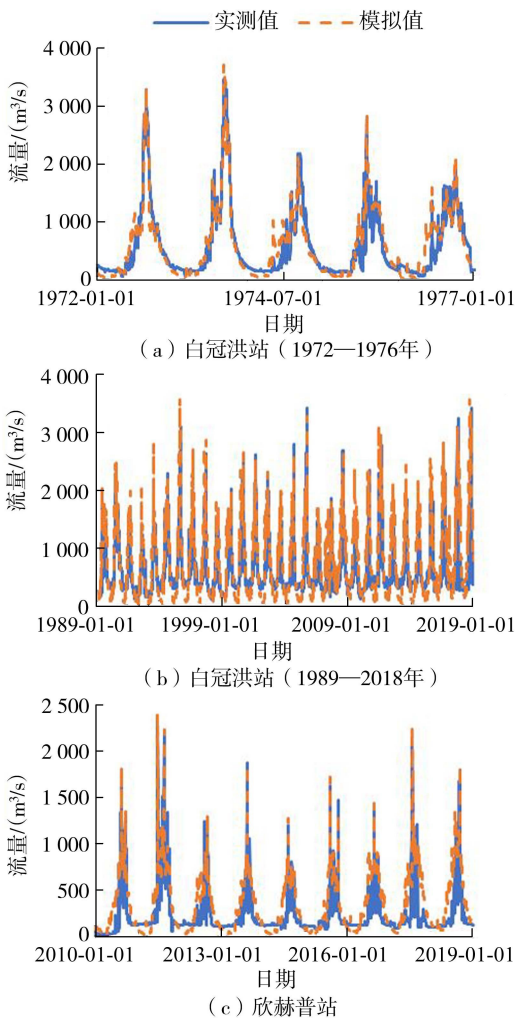


图4 两站点水库影响期日尺度径流模拟结果

表 3 为水文模拟法定量分析结果,由于径流量大小还与流域面积有关,故采用径流深对流域径流变化进行分析。与基准期相比白冠洪站水库影响期内实测径流深的年平均值有所下降,并且随着水库建设数量增多,水库影响期 II 的下降幅度比水库影响期 I 更大。在气候变化的影响下不同时间尺度的

表 3 水库影响期水文模拟法定量分析结果

站点	时间尺度	实测径流深 平均值/mm	实测径流深 变化量/mm	模拟径流深 平均值/mm	影响量/mm		贡献率/%		影响量绝对值之比
					气候变化	人类活动	气候变化	人类活动	
白冠洪 (水库影响期 I)	全 年	1 381	-51	1 651	219	-270	-429	529	1. 23
	丰水期	1 022	-251	1 376	103	-354	-41	141	3. 44
	枯水期	359	200	275	116	84	58	42	0. 72
白冠洪 (水库影响期 II)	全 年	1 302	-130	1 951	519	-649	-399	499	1. 25
	丰水期	851	-422	1 603	330	-752	-78	178	2. 28
	枯水期	451	292	348	189	103	65	35	0. 54
欣赫普	全 年	1 380	-49	1 615	186	-235	-380	480	1. 26
	丰水期	1 028	-179	1 329	122	-301	-68	168	2. 47
	枯水期	352	130	286	64	66	49	51	1. 03

注:影响量绝对值之比是人类活动影响量的绝对值与气候变化影响量绝对值的比值。

径流深都呈上升趋势,人类活动则是使丰水期平均径流深下降而枯水期上升,与水库蓄丰补枯的调度运行规律一致。由于径流深在丰水期的下降幅度大于枯水期的上升幅度,并且丰水期人类活动影响量的绝对值超过气候变化影响量绝对值的 2 倍,所以全年尺度下的径流深有所下降,人类活动是径流深发生变化的主要原因。欣赫普站径流深的变化规律与白冠洪站相似,主要受到以水库建设为主的人类活动的影响,径流深总体呈下降趋势。

3.4 模拟结果合理性

降水量 P 与 KC 的敏感性分析结果如图 5 所示,当变动后的降水量低于 $0.84P$ 或高于 $1.18P$,以及变动后的 KC 低于 KC 值-0.2 或高于 KC 值+0.3 时,模型模拟结果不再满足精度要求。将前文白冠洪站全年时段的贡献率计算结果与 4 种临界状态下利用模型模拟结果计算得到的径流变化贡献率进行对比(表 4),可以发现在模型模拟结果仍满足精度要求的情况下,降水量与 KC 的变化会对贡献率计算结果产生一定的影响,但仍然满足气候变化使径流增加而人类活动使径流减少,且人类活动的影响

更加显著,使径流呈现下降趋势的总体规律。由此可见当模型模拟结果满足精度要求时,采用水文模拟法计算径流变化的贡献率是可靠的。

表 4 降水量与 KC 变动前后贡献率计算结果对比

状态	气候变化贡献率/%		人类活动贡献率/%	
	水库影响期 I	水库影响期 II	水库影响期 I	水库影响期 II
初始	-429	529	-399	499
0.84P	-316	416	-263	363
1.18P	-465	565	-446	546
KC 值-0.2	-438	538	-471	571
KC 值+0.3	-369	469	-412	512

4 结 论

a. APHRODITE 和 MSWEP 两种降水产品在南俄河流域存在系统性低估,不宜直接使用。经过偏差校正后的数据精度大幅提高,由校正后的降水数据驱动的新安江模型取得了较好的径流模拟效果,两站点模拟结果在率定期与验证期的 NSE 均超过 0.75 且 RE 均低于 20%。

b. 模型模拟结果表明南俄河流域年径流总体呈下降趋势,其中气候变化导致径流增多,人类活动导致径流减少,并且两站点水库影响期内人类活动对径流变化的贡献率均高于气候变化,说明人类活动是两站点年径流量变化的主要原因。以水库运行为主的人类活动对两站点的丰水期径流影响较全年及枯水期更为显著。

c. 水文模型模拟的不确定性会对贡献率计算结果产生影响,但当模拟结果满足精度要求时,模型输入与参数的轻微扰动不会改变模型模拟得到的径流变化规律,因此采用水文模拟法计算径流变化的贡献率是可靠的。

参考文献:

[1] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN

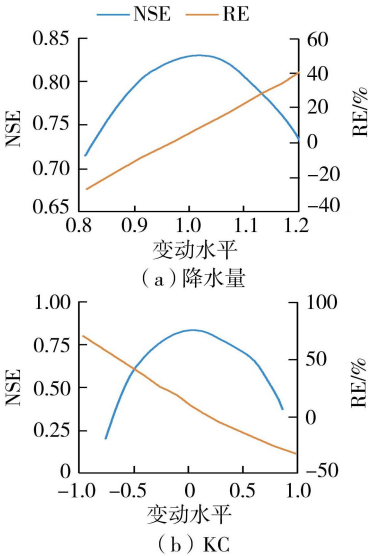


图 5 降水量与 KC 敏感性分析

- Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [2] ZHAO Guangju, TIAN Peng, MU Xingmin, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 387-398.
- [3] 马亚丽, 王兴繁, 白祖晖, 等. 白龙江中上游径流变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 22-26. (MA Yali, WANG Xingfan, BAI Zuhui, et al. Runoff variation of Bailongjiang River in upper and middle reaches and its response to climate change and human activities [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(2), 22-26. (in Chinese))
- [4] 盛菲, 刘士余, 刘政, 等. 基于三种方法的径流变化贡献率对比分析: 以彭冲洞小流域为例[J]. 人民长江, 2021, 52(3): 66-69. (SHENG Fei, LIU Shiyu, LIU Zheng, et al. Comparative analysis on contribution rate to runoff change based on three methods: case of Pengchongjian small watershed [J]. Yangtze River, 2021, 52(3): 66-69. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] YAN Xiaolin, BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, et al. Quantifying contributions of climate change and local human activities to runoff decline in the upper reaches of the Luanhe River Basin [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2020, 28: 67-74.
- [7] 吴丽, 张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科学进展, 2016, 36(2): 10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 10-15. (in Chinese))
- [8] 张力, 赵自阳, 王红瑞, 等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 109-118. (ZHANG Li, ZHAO Ziyang, WANG Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 109-118. (in Chinese))
- [9] EMMANUEL M, FRANCOIS M, CLAUDE M, et al. Impact of land-use change on the hydrology of North Lao PDR watersheds [C]//Proceedings of FRIEND-Water. Montpellier, France: IAHS Publication, 2014: 84-89.
- [10] YATAGAI A, KAMIGUCHI K, ARAKAWA O, et al. APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(9): 1401-1415.
- [11] BECK H E, WOOD E F, PAN M, et al. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 473-502.
- [12] 熊景华, 郭靖, 郭生练, 等. 基于多源降水数据估算澜沧流域可能最大降水[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 77-86. (XIONG Jinghua, GUO Jing, GUO Shenglian, et al. Estimating probable maximum precipitation based on multisource data of precipitation in the Lancang-Mekong River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 77-86. (in Chinese))
- [13] TANG Xiongpeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Error Correction of Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) over the Lancang-Mekong River Basin [J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 13020312.
- [14] 高超, 文化, 宣伟栋, 等. 基于分段三伽玛分布的降雨偏差纠正方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 169-178. (GAO Chao, WEN Hua, XUAN Weidong, et al. A separated three-gamma bias correction method for precipitation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2), 169-178. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] ZHAO Renjun. The Xin' anjiang model applied in China [J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1/2/3/4): 371-381.
- [17] 李苏. 气候变化和人类活动对流域径流的影响研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [18] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of parameters of the Xin' anjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1988(6): 2-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-08-15 编辑: 熊水斌)