

变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素

李继清¹, 刘佳利¹, 邓世浪^{1,2}, 吴 亮¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要:为掌握变化环境下西江干流水文情势演变特征及主要驱动因素,通过识别径流序列突变点将径流序列划分为天然时期和变化时期,采用基于水文改变指标的变化范围法定量探究各水文指标改变度,借助水文变异程度和水文情势变化法(DHRAM)评估整体水文情势改变度,利用主成分分析法筛选最相关生态指标捕捉关键水文变量,并基于随机森林模型,结合残差分析法定量评估气候变化与人类活动对流域水文情势的影响。结果表明:西江干流 4 座水文站 32 个水文指标以中、低度改变为主,天峨、迁江、武宣、梧州站水文变异程度分别为 64.70%、61.34%、51.70%、51.89%,基于 DHRAM 得到各站水文情势改变等级分别为 3、3、2、3,综合判定 4 站整体水文情势改变度均为中度;中上游天峨、迁江站改变度比中下游武宣、梧州站高,应重点关注中上游生态保护;气候变化与人类活动均是西江干流水文情势变化的重要驱动因素,气候变化对天峨、迁江、武宣、梧州站水文情势变化的贡献率分别为 25.65%、60.07%、50.29%、55.22%,气候变化对于西江流域中下游地区水文情势的影响大于上游地区。

关键词:水文情势变化; IHA-RVA; 驱动因素; 随机森林模型; 西江干流

中图分类号:TV11 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)01-0009-10

Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment//LI Jiqing¹, LIU Jiali¹, DENG Shilang^{1,2}, WU Liang¹(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: To understand the characteristics of hydrological regime evolution and the main driving factors in the main stream of the Xijiang River under the changing environment, the runoff series was divided into natural and changing periods by identifying its abrupt point, and the change degrees of various hydrological indicators were quantitatively investigated using the range of variability approach based on indicators of hydrologic alteration. The degree of hydrological alteration and Dundee hydrological regime assessment method (DHRAM) were used to assess the overall change degree of hydrological regime, and the principal component analysis method was used to select the most ecologically relevant hydrological indicators and capture the key hydrological variables. Furthermore, the impacts of climate change and human activities on hydrological regime in the river basin were quantitatively assessed using the random forest model combined with residual analysis. The results show that 32 hydrological indicators at four hydrological stations are dominated by medium and low degrees of alteration. The degrees of hydrological alteration at Tian'e, Qianjiang, Wuxuan, and Wuzhou stations were 64.7%, 61.34%, 51.70%, and 51.89%, respectively. The hydrological regime change levels at the four stations were 3, 3, 2, and 3, respectively according to the results of DHRAM, and the overall hydrological regime change degree at the four stations was determined to be moderate. The change degrees of hydrological regime at Tian'e and Qianjiang stations on the middle and upper reaches are higher than that at Wuxuan and Wuzhou stations on the middle and lower reaches. Therefore, the ecological protection on the middle and upper reaches should be paid more attention. Both climate change and human activities are important driving factors for the hydrological regime evolution in the main stream of the Xijiang River. The contribution rates of climate change to the hydrological regime evolution at Tian'e, Qianjiang, Wuxuan, and Wuzhou stations were 25.65%, 60.07%, 50.29%, and 55.22%, respectively. The impact of climate change on the hydrological regime in the middle and lower reaches of the Xijiang River Basin is greater than that in the upper reaches.

Key words: hydrological regime change; IHA-RVA; driving factor; random forest model; main stream of the Xijiang River

基金项目:国家自然科学基金项目(52179014);国家重点研发计划项目(2022YFC3002702)
作者简介:李继清(1972—),女,教授,博士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:jqli6688@163.com
通信作者:刘佳利(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文学水资源研究。E-mail:1750663519@qq.com

河流水文情势是维持生态系统健康的关键,然而变化环境下受气候变化和人类活动共同影响,陆地水文循环显著变化,由此引起江河水文情势发生改变^[1-3],对河流的天然流态及生物多样性产生影响,致使河流生态系统退化^[4]。因此,评估流域水文情势变化及其主要驱动因素对维持流域水文情势稳定及生态系统健康发展具有重要意义。

分析变化环境下水文情势演变规律及水文要素变化归因已成为当前水科学研究的热点之一^[5-9]。近年来,国内外专家学者围绕气候变化和人类活动对流域水文情势的影响开展了一系列研究。鞠琴等^[10]采用 M-K 检验法和累计距平法分析渭河流域咸阳站逐日流量演变规律,并对水文情势改变度进行了评估;杨靖等^[11]基于生态最相关水文指标(the most ecologically relevant hydrologic indicators, ERHIs)对雅鲁藏布江流域水文情势变化特征进行分析,发现 ERHIs 具有一定合理性;王鸿翔等^[12]综合水文变异程度和水文情势变化法(Dundee hydrological regime assessment method, DHRAM)对岷江水文情势改变度做出定量评价,并利用 Budyko 理论进行归因分析,结果表明岷江流域水文情势总体改变度为中度,人类活动为主要影响因素;江善虎等^[13]综合 ERHIs 和 VIC(variable infiltration capacity)模型,提出“观测-模拟”对比分析法对渭河流域生态水文情势演变进行归因分析,得出咸阳和华丰站实测 ERHIs 综合改变度分别为 41% 和 34%,气候变化对水文情势变化的贡献率分别为 44% 和 53%;林雍权等^[14]基于新安江模型模拟还原了老挝南俄河流域水库影响期的天然日径流过程,得出人类活动是径流变化的主要因素;Jiang 等^[15]采用水文敏感性分析方法,基于降水和潜在蒸散量,评价气候变化和人类活动对于年径流量的影响;蒋美彤^[16]基于 Budyko 假设理论和 SWAT(soil and water assessment tool)模型量化了气候变化及人类活动对嫩江流域径流的贡献率;叶婷等^[17]基于 Budyko 假设理论和微分方程探究淮河上中游地区气候变化和人类活动对不同时间尺度径流特征的影响,结果表明淮河上中游大部分地区的径流在突变年份后呈现下降趋势。上述研究中,ERHIs 缓解了水文改变指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)的冗余性问题,利用水文变异程度和 DHRAM 更好地评估了河流整体水文情势改变度及河道生态系统风险。与上述传统径流归因方法相比,随机森林(random forest, RF)模型能够挖掘数据间的内在联系,捕捉气象因子与径流间的非线性特征,避免水文调参的

不确定性,具有运行高效、抗过拟合和抗噪性等优点,目前已被广泛应用于水文水资源领域^[18-21]。

在气候变化及人类活动频繁作用下,西江流域河流生态系统健康安全遭受胁迫^[22],而目前对西江流域水文情势改变前后的综合评估以及水文演变的归因分析较少。鉴于此,本文综合水文变异程度和 DHRAM 分析西江流域水文情势改变度,采用改进的 IHA 指标降低水文变量的冗余性,以捕捉关键生态水文变量,应用 RF 模型,结合残差分析法量化气候变化和人类活动对水文情势演变的贡献率并进行分析,以期对西江流域生态系统健康发展和脆弱性修复提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

西江发源于云南曲靖马雄山东麓,全长 2214 km,是珠江流域最长、中国第三长的河流。西江流域处于 21° 58' N ~ 26° 33' N, 104° 26' E ~ 112° 04' E,集水面积达 35.31 万 km²,约占珠江的 80%;多年平均水资源量为 2302 亿 m³,约占珠江的 68%^[23]。西江干流已建有天生桥、平班、龙滩、岩滩、大化、乐滩、桥巩等梯级电站,受梯级水库时空调蓄作用的影响,径流天然水文节律遭受破坏,且生产生活取用水量增加等人类活动也威胁着河流生态系统的健康。本文以西江干流天峨、迁江、武宣、梧州 4 座水文站为例探究该流域水文情势演变及其驱动因素,气象数据选取流域内 13 个气象站(苍梧、都安、来宾、柳州、柳州、罗甸、马山、平南、天峨、望谟、梧州、武宣、紫云)1961—2020 年逐日降水、蒸发、气温、风速及日照时数数据(来源于中国气象网的地面气候资料日值数据集),水文数据选取天峨、梧州水文站 1961—2020 年和迁江、武宣水文站 1961—2019 年的径流数据。研究区水文和气象站分布见图 1。

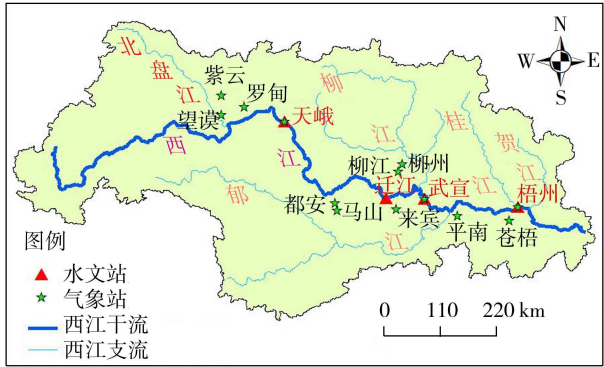


图 1 研究区水文和气象站分布

Fig. 1 Distribution of hydrological and meteorological stations in study area

2 研究方法

2.1 水文情势变化分析

2.1.1 径流序列划分

单一检验方法对于序列突变点的识别存在一定的缺陷^[24]。为避免单一检验方法出现虚假突变点的情况,采用滑动 t 检验法、Pettitt 检验法、累积距平法、有序聚类法、滑动秩和检验法和 M-K 突变检验法对西江干流 4 座水文站的年径流序列进行突变检验,综合判定突变点,依据径流的第一个突变点将径流序列划分为天然时期、变化时期。

2.1.2 水文情势改变度评价

为厘清流域复杂的水文情势变化,采用 Richter 等^[25]提出的 5 组 33 个 IHA 指标反映河流生态水文情势,包括各月中值流量($A_1 \sim A_{12}$ 分别为 1—12 月中值流量)、年极端流量($B_1 \sim B_5$ 分别为年最小 1、3、7、30、90 d 径流量, $B_6 \sim B_{10}$ 分别为年最大 1、3、7、30、90 d 径流量, B_{11} 为基流指数)、年极端流量发生时间(C_1 、 C_2 分别为年最小和最大 1 d 流量发生时间)、高(低)流量频率及历时(D_1 、 D_2 分别为高流量脉冲次数和历时, D_3 、 D_4 分别为低流量脉冲次数和历时)、流量变化率及频率(E_1 、 E_2 分别为流量平均上升和下降率, E_3 为逆转次数)。由于西江干流在研究期间未出现断流情况,故不予考虑断流天数指标。

为明确量化单个水文指标受影响后的河流水文情势改变度,Richter 等^[26]基于 IHA 提出变化范围法(range of variability approach, RVA)评估河流水文情势的改变情况,计算公式为

$$H_i = \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_o = \sqrt{\sum_{i=1}^{32} H_i^2 / 32} \quad (2)$$

式中: H_i 为第 i 个水文指标改变度; $N_{o,i}$ 为变化时期第 i 个水文指标在 RVA 阈值范围内的年数; N_e 为相应的期望年数; D_o 为水文变异程度。为直观反映水文情势的变化情况,规定 $0 \leq H_i$ (或 D_o) $< 33\%$ 为低度改变; $33\% \leq H_i$ (或 D_o) $< 67\%$ 为中度改变; $67\% \leq H_i$ (或 D_o) $< 100\%$ 为高度改变^[27]。

为准确衡量环境变化对于河流水文情势变化的影响程度及范围,引用 Black 等^[28]在 IHA 基础上提出的另一个水文情势变化评估方法 DHRAM。该方法假设生态系统的变化风险与水文情势累积变化成比例,建立 IHA 和生态影响之间的关联。本文基于调整后的 32 个水文指标,根据每组指标的均值和离差系数将各组指标的改变程度划分低、中、高 3 个影响类别,对 5 组指标均值和离差系数影响类别所赋

分值求和得到一个总分值,根据分值范围将水文情势改变度分成 5 个等级,分别为未改变、低度改变、中度改变、高度改变、严重改变,对应的分值范围分别为 0、1~4、5~10、11~20、21~30。分值越大表明水文情势改变度及生态环境被破坏的风险越高。本文采用水文变异程度和 DHRAM 共同评估河流整体水文情势改变度。

2.1.3 生态最相关水文指标优选

鉴于水文指标间存在的相关性强、冗余性突出问题,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)法优化水文指标,计算 ERHIs。PCA 法通过降维思想将多个相关变量转化为少数几个不相关的变量^[29],在保证全面描述流域水文情势变化的同时,尽可能保留原数据关键信息。由于 32 个水文指标的大小及量纲存在显著差异,先将数据标准化,并基于各主成分特征值大于或等于 1 且累计方差贡献率达 70%~90%的原则确定主成分个数,并在主成分因子荷载矩阵中,取绝对值最大的变量为其解释变量,从而实现 ERHIs 的优选。

2.2 基于 RF 模型的径流模拟

RF 模型是一种基于决策树的非线性集成学习模型。算法由子训练集和决策树组成,在抽取样本的特征属性时采取有机放回的抽样方式,具有学习速度快、适应性强的优点^[19-20]。本文从径流成因角度反映驱动因子与径流之间的关系,采用天然时期的气象径流数据建立 RF 模型,模型率定期及验证期仅采用气象要素作为输入,实现变化时期气候因素影响下的径流模拟。

径流突变前,天然时期气候因素与径流之间的关系可以表示为

$$R_a = f(P_a, T_a, E_a, W_a, S_a) \quad (3)$$

式中: R_a 为天然时期的径流量; P_a 、 T_a 、 E_a 、 W_a 、 S_a 分别为天然时期的降水量、气温、蒸发量、风速及日照时数。

径流突变后,变化时期气候因素驱动下的径流量可由突变前建立的函数关系进行模拟:

$$R_b = f(P_b, T_b, E_b, W_b, S_b) \quad (4)$$

式中: R_b 为变化时期气候因素驱动下的径流量; P_b 、 T_b 、 E_b 、 W_b 、 S_b 分别为变化时期的降水量、气温、蒸发量、风速及日照时数。

选定纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、均方根误差(RMSE)和决定系数 R^2 评估模型精度。NSE 与 R^2 越趋近于 1,实测与模拟数据越相关,模拟结果越可靠。一般认为,当 NSE 大于 0.5,且 $R^2 > 0.6$ 时,模拟结果可以接受^[30]。

2.3 水文情势变化驱动因素分析

假定气候变化与人类活动的影响是相互独立的,结合残差分析法定量分析气候变化和人类活动对径流水文情势的影响,将 RF 模型模拟得到的变化时期径流视为只受气候因素影响、无人类活动影响的天然径流^[31-32],计算公式为

I_c = (ΔQ_c / |ΔQ_t|) × 100% (5)

I_h = (ΔQ_h / |ΔQ_t|) × 100% (6)

其中 ΔQ_t = Q_ob - Q_oe ΔQ_c = Q_sb - Q_oe ΔQ_h = ΔQ_t - ΔQ_c

式中:I_c、I_h 分别为气候变化和人类活动对水文变量变化的贡献率;ΔQ_t 为水文变量的变化总值;ΔQ_c、ΔQ_h 分别为气候变化和人类活动引起的水文变量变化值;Q_ob、Q_oe 分别为变化时期和天然时期实测序列水文变量多年均值;Q_sb 为变化时期模拟序列水文变量多年均值。

3 结果与分析

3.1 径流序列划分

采用滑动 t 检验法、Pettitt 检验法、累积距平法、有序聚类法、滑动秩和检验法和 M-K 突变检验法分别对西江干流天峨、迁江、武宣、梧州站的年径流序列进行突变检验,结果见表 1。根据众数原则,当大于或等于 3 个方法检验得到一致的结果时,认为该点为真实突变点。如滑动 t 检验法、Pettitt 检验法、

累积距平法、滑动秩和检验法均检验出天峨站年径流序列在 1986 年发生了第一次突变,则认为 1986 年为天峨站年径流序列的真实突变点。综合考虑检验结果,根据径流第一次发生突变的时间将 4 座水文站径流序列分别划分为天然时期、变化时期,结果见表 2。

3.2 水文情势变化分析

3.2.1 水文指标改变度评价

在划分出径流天然时期、变化时期的基础上,采用 IHA-RVA 法定量探究 4 个水文站水文指标在变化时期较天然时期的改变度,各水文站水文指标改变度见图 2。由图 2 可知,受环境变化的影响,天峨、迁江两站高度改变的水文指标占比与其他两站相比相对较大,天峨站在变化时期发生高度改变的指标有 A_7、B_6~B_10、C_1、D_4、E_3,其中 D_4、E_3 两个水文指标改变度为 95%以上,低流量脉冲历时(D_4)反映西江流域内枯水过程的持续性强弱,逆转次数(E_3)会对河道的理化性质产生长远影响,这两个指标的大幅度改变会给河道生态环境带来不确定性影响^[33]。迁江站发生高度改变的指标有 A_9、B_2、C_1、D_2、D_3、D_4、E_2、E_3,其中 E_2、E_3 两个水文指标改变度达到 100%,由于生态系统承载能力有限,流量变化率及频率的改变会对河道生物群落带来不利影响,从而威胁生态系统的稳定,对其应对外界环境变化带来不利影响^[34]。天峨站和迁江站在变化时期发生高度改变的指标明显多于武宣站及梧州站,这是因为西江水电开发主要集中在中上游,尤其是南盘

表 1 径流突变检验结果

Table 1 Runoff mutation test results

水文站	方法	突变年份	水文站	方法	突变年份
天峨站	滑动 t 检验法	1986、1993、2002、2008	武宣站	滑动 t 检验法	1992、2002、2008
	Pettitt 检验法	1986、2002		Pettitt 检验法	2002
	累积距平法	1986、1993		累积距平法	1983、1992、2002
	有序聚类法	2002		有序聚类法	1992、2002
	M-K 突变检验法	1982、1993、1997		M-K 突变检验法	1983、1992、2002
	滑动秩和检验法	1986、1997、2002		滑动秩和检验法	2002
迁江站	滑动 t 检验法	1986、1992、2002、2008	梧州站	滑动 t 检验法	1986、1992、2002
	Pettitt 检验法	1986、2002		Pettitt 检验法	2002
	累积距平法	1986、1992、2002		累积距平法	1983、1992、2002
	有序聚类法	2002、2014		有序聚类法	1998
	M-K 突变检验法	1986、1997		M-K 突变检验法	1983、1992、1995、1998
	滑动秩和检验法	1979、1986、2002		滑动秩和检验法	1983、2002

表 2 径流序列天然时期和变化时期划分

Table 2 Division of natural and changing periods of runoff series

水文站	序列长度	径流突变点	天然时期	变化时期
天峨站	1961-01-01 至 2020-12-31	1986 年、2002 年	1961—1986 年	1987—2020 年
迁江站	1961-01-01 至 2019-12-31	1986 年、2002 年	1961—1986 年	1987—2019 年
武宣站	1961-01-01 至 2019-12-31	1992 年、2002 年	1961—1992 年	1993—2019 年
梧州站	1961-01-01 至 2020-12-31	1983 年、1992 年、2002 年	1961—1983 年	1984—2020 年

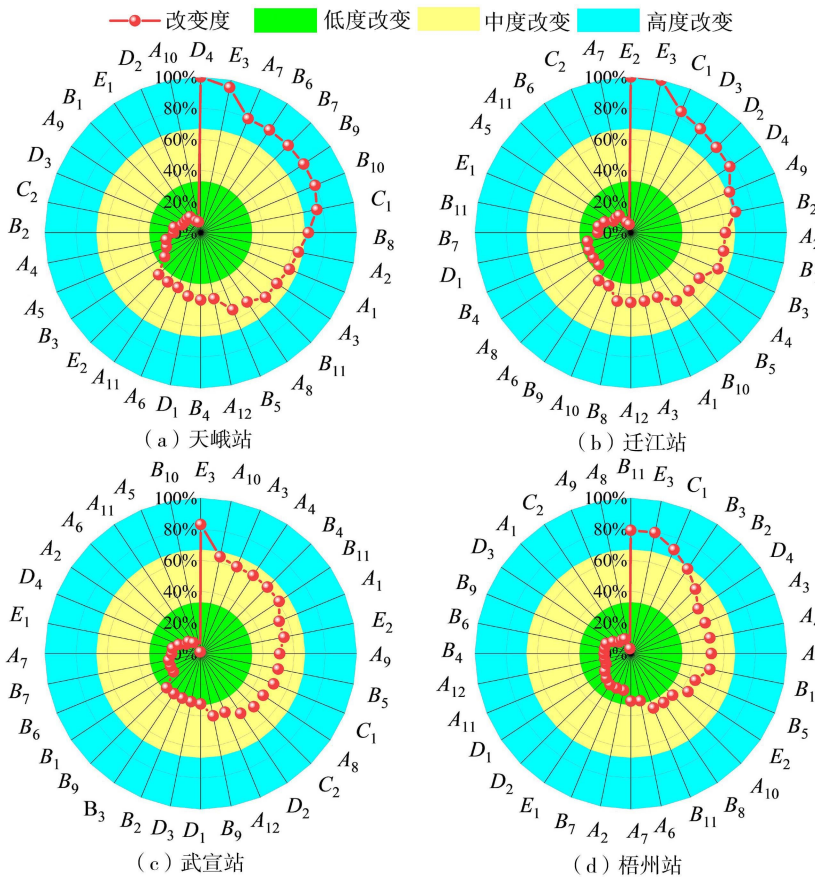


图 2 水文指标改变度

Fig. 2 Change degree of hydrological indicators

江红水河及黔江河段。武宣站水文指标多为中、低度改变,占比分别为 46.88%、50.00%,仅 E_3 为高度改变。梧州站仅 E_3 、 C_1 、 B_{11} 为高度改变,占比为 9.38%,其余指标为中、低度改变,占比 90.62%。4 座水文站的逆转次数均为高度改变,而逆转次数是消除外来物种、保持生物进化的关键因素,其高度改变会直接影响动植物的生长环境,从而对其生长产生负面影响^[29]。

根据计算出的天峨、迁江、武宣、梧州 4 个水文站径流序列突变前后 32 个水文指标绝对值的改变度,计算 4 个水文站不同改变度等级指标占比。从表 3 可见,西江干流自上游至下游天峨、迁江、武宣和梧州站发生低度改变的水文指标呈递增趋势,占比分别为 34.38%、37.50%、50.00%、53.12%。天峨站作为西江上游的主要控制站,控制流域面积占

表 3 不同改变度等级水文指标占比

Table 3 Proportion of hydrological indicators with different change degrees

水文站	指标占比/%		
	低度改变	中度改变	高度改变
天峨站	34.38	37.50	28.12
迁江站	37.50	37.50	25.00
武宣站	50.00	46.88	3.12
梧州站	53.12	37.50	9.38

珠江流域的 76.5%,既是上游龙滩水库的出库站,又是岩滩水库的入库站,受影响程度大,在 4 个水文站中发生高度改变的水文指标占比最高,为 28.12%,其次是位于中游红水河的控制性水文站迁江站,占比为 25.00%。

3.2.2 整体水文情势改变度分析

西江干流水文站水文变异程度和 DHRAM 的计算结果见表 4。从 DHRAM 计算结果来看,天峨、迁江、梧州站 DHRAM 总分值分别为 6、10、5,水文情势改变等级均为 3 级,属中度改变;武宣站总得分为 2,属低度改变。天峨、迁江、武宣、梧州站水文变异程度分别为 64.70%、61.34%、51.70%、51.89%,均属中度改变。结合水文变异程度和 DHRAM 计算结果,综合判定西江干流 4 座水文站整体水文情势均为中度改变,中上游天峨、迁江站较中下游武宣、梧州站改变度高,变化更为剧烈,应重点关注中上游河道生态环境的保护。

3.2.3 ERHIs 优选

用 PCA 进行 ERHIs 优选,由相关系数矩阵计算各成分特征值及累计方差贡献率,结果见表 5。天峨站前 6 个成分 PC1~PC6 的特征值均大于 1,累计方差贡献率达 100%,根据主成分的选取原则,选取前 6 个成分作为天峨站的主成分。同理,确定迁江、

表 4 D_o 和 DHRAM 计算结果

Table 4 D_o and DHRAM calculation results								
水文站	IHA 分组	均值结果		离差系数结果		DHRAM 水文情势		$D_o/\%$
		均值	赋分	离差系数	赋分	总分值	改变等级	
天峨站	1	39.54	1	63.89	1	6	3	64.70
	2	24.09	0	63.79	0			
	3	20.25	1	29.27	0			
	4	46.07	1	31.68	1			
	5	41.20	0	70.11	1			
迁江站	1	35.43	1	54.40	1	10	3	61.34
	2	24.08	0	68.52	0			
	3	24.66	2	135.51	3			
	4	46.14	1	41.01	1			
	5	63.69	1	15.98	0			
武宣站	1	17.64	0	26.34	0	2	2	51.70
	2	12.70	0	20.55	0			
	3	15.62	1	20.93	0			
	4	48.78	1	18.79	0			
	5	31.46	0	27.43	0			
梧州站	1	21.20	1	30.21	1	5	3	51.89
	2	6.59	0	30.29	0			
	3	11.40	1	25.60	0			
	4	24.99	0	30.86	1			
	5	50.20	1	28.85	0			

梧州站前 8 个成分为主成分,武宣站前 9 个成分为主成分。

进一步确定各主成分的解释变量,以各主成分中载荷绝对值最大的指标作为 ERHIs。对于天峨站 PC1, A_{12} 、 B_7 、 B_8 、 E_2 载荷值较高,载荷值最高的指标

表 5 主成分分析的特征值及累计方差贡献率

Table 5 Eigenvalue and cumulative variance contribution rate of PCA								
主成分	特征值				累计方差贡献率/%			
	天峨站	迁江站	武宣站	梧州站	天峨站	迁江站	武宣站	梧州站
PC1	10.64	10.56	8.50	7.92	33.24	33.00	26.56	24.76
PC2	8.48	5.54	5.79	6.19	59.75	50.32	44.65	44.11
PC3	6.72	2.81	3.29	3.51	80.76	59.08	54.95	55.09
PC4	3.10	2.60	2.62	2.41	90.46	67.20	63.12	62.61
PC5	1.96	1.81	1.73	1.93	96.60	72.84	68.54	68.64
PC6	1.09	1.31	1.56	1.42	100	76.95	73.42	73.08
PC7		1.23	1.12	1.27		80.80	77.04	77.04
PC8		1.01	1.07	1.03		83.95	80.37	80.27
PC9			1.02				83.57	

为 E_2 ;PC2 高载荷值指标主要集中在 $B_2 \sim B_4$,载荷值最高的指标为 B_3 ;PC3~PC6 最高载荷值指标分别为 A_5 、 A_6 、 D_3 、 C_2 。因此,选取天峨站前 6 个主成分的 解释变量,即 E_2 、 B_3 、 A_5 、 A_6 、 D_3 、 C_2 作为天峨站的 ERHIs。同理确定迁江、武宣、梧州站的 ERHIs,见表 6。

PCA 法所提取的 ERHIs 在各 IHA 指标组中均有涉及,在有效降低 32 个水文指标冗余性的同时,极大程度地保留了原始数据的关键信息。为进一步验证其合理性,计算各水文站 ERHIs 间的相关性,结果见图 3。由图 3 可知,多数 ERHIs 间相关系数

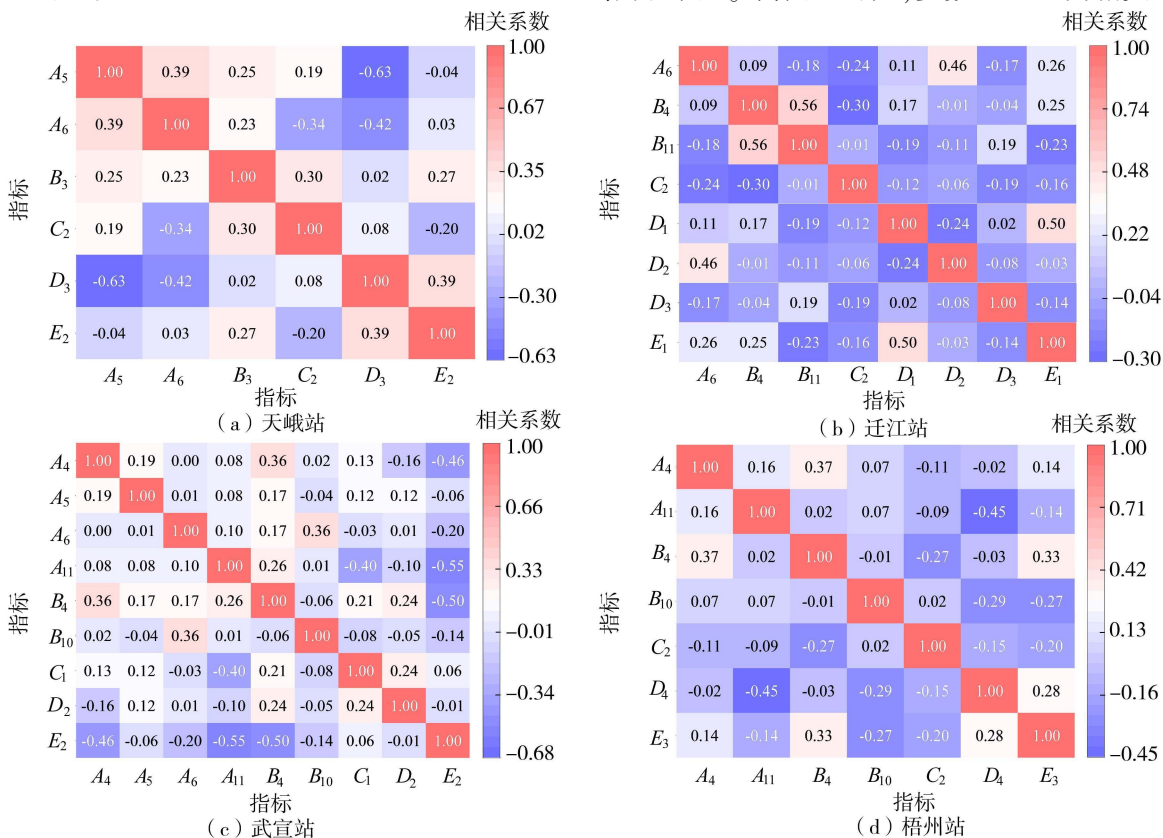


图 3 ERHIs 相关关系

Fig.3 Correlation of ERHIs

表 6 各水文站 ERHIs

Table 6 ERHI sat each hydrological station

水文站	ERHIs
天峨站	$A_5、A_6、B_3、C_2、D_3、E_2$
迁江站	$A_6、B_4、B_{11}、C_2、D_1、D_2、D_3、E_1$
武宣站	$A_4、A_5、A_6、A_{11}、B_4、B_{10}、C_1、D_2、E_2$
梧州站	$A_4、A_{11}、B_4、B_{10}、C_2、D_4、E_3$

的绝对值为 0~0.2, 指标间相关程度有限, 由此可见, 优选的 ERHIs 较为合理。

3.3 径流模拟结果

依据天然时期(基准期)数据建立 RF 模型, 将 1961—1975 年作为天峨、迁江、梧州站的率定期, 1976 年至突变年作为验证期; 将 1961—1981 年作为武宣站的率定期, 1982 年至突变年作为验证期, 分别模拟变化时期(模拟期)气候因素影响下的径流。采用 NSE、RMSE、 R^2 对模型模拟的精度进行检验, 评价结果见表 7。由表 7 可知, 模型率定期各水文站的 NSE 和 R^2 均达到或接近 0.9, 模拟结果较好; 模型验证期 NSE 和 R^2 也均大于 0.6, 达到精度要求, 说明 RF 模型在天然时期建立的气象因子与径流变化之间的关系适用于研究区。

表 7 西江干流水文站径流模拟评价结果

Table 7 Runoff simulation evaluation results at hydrological stations on main stream of the Xijiang River

时期	水文站	NSE	RMSE/(m^3/s)	R^2
率定期	天峨站	0.890 2	565.738 2	0.916 9
	迁江站	0.899 7	687.317 7	0.921 4
	武宣站	0.883 1	1 309.084 7	0.913 3
	梧州站	0.933 0	1 535.596 5	0.944 7
验证期	天峨站	0.698 2	1 066.829 9	0.676 3
	迁江站	0.655 0	1 314.411 3	0.694 0
	武宣站	0.602 8	1 237.483 5	0.663 8
	梧州站	0.669 3	3 255.812 4	0.669 4

研究时段内逐日径流实测值与模拟值的对比见

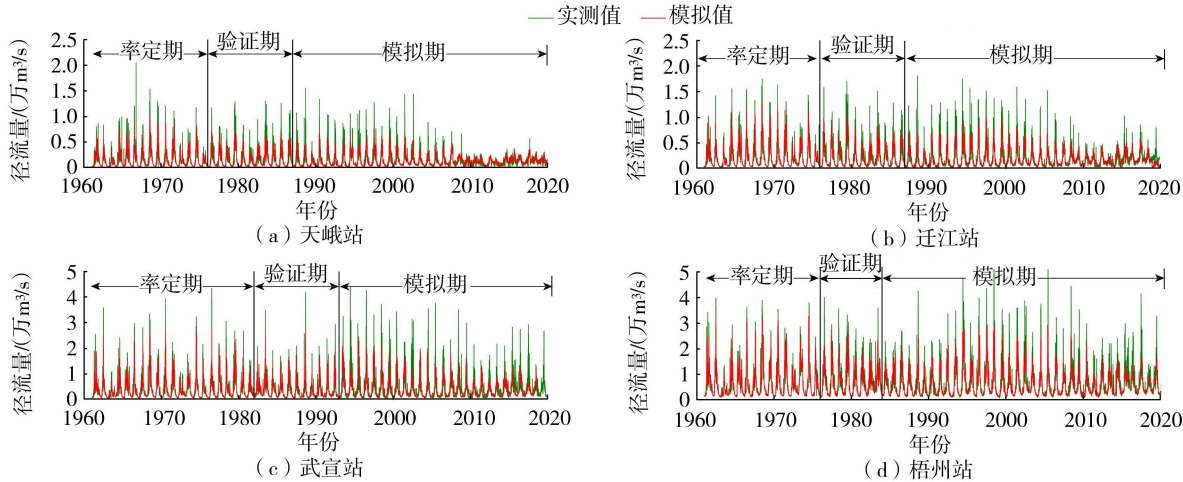


图 4 基准期、模拟期逐日径流值对比

Fig. 4 Comparison of daily runoff between base period and simulation period

图 4。由图 4 可知, 模型在率定和验证期均能较好地模拟径流变化趋势。多数情况下模拟值与实测值接近度高, 模拟效果好, 但在极值模拟中存在一定偏差, 这是因为极端降雨事件通常具有高度的时空变异性 and 复杂性。尤其模拟期内, 模拟的峰值均小于实测值, 高流量事件的量级和发生次数的模拟值低于实测值, 同时低流量事件的量级和发生次数高于实测值。这种现象在径流量较大的下游武宣站及梧州站表现尤为突出, 这可能与水库蓄丰补枯的调度方式有关, 表明人类活动影响下径流的变化幅度增大^[30]。

3.4 驱动因素分析

计算各水文站 ERHIs 变化时期实测和模拟序列较天然时期实测序列的变化量, 进而估算气候变化和人类活动对 ERHIs 的贡献率, 结果见图 5。由图 5 可知, 人类活动对天峨站 6 个 ERHIs 的影响显著, 对水文情势变化的综合贡献率高达 74.35%, 说明人类活动是天峨站水文情势变化的主要原因。迁江站受气候变化影响显著的 ERHIs 包括 $B_4、B_{11}、C_2、E_1、D_1、D_2$, 气候变化对水文情势变化的综合贡献率为 60.07%, 比人类活动的贡献率大。武宣站气候变化和人类活动对水文情势变化的影响相当, 贡献率分别为 50.29%、49.71%, 前者对 $A_4 \sim A_6、B_4、C_1、D_2$ 影响显著, 后者对 $A_5、A_6、A_{11}、B_{10}、D_2、E_2$ 影响显著。梧州站气候变化对水文情势变化的影响大于人类活动, 气候变化对 $A_{11}、B_4、B_{10}、D_4、E_3$ 影响显著, 对水文情势变化的综合贡献率为 55.22%; 人类活动对 $A_4、B_{10}、C_2、E_3$ 影响显著, 对水文情势变化的贡献率为 44.78%。

变化环境下水文情势改变的驱动因素尤为复杂, 气候变化和人类活动是导致西江流域水文情势发生改变的关键因子, 气候变化对西江干流水文情势变化的影响程度表现为中下游地区高于上游地

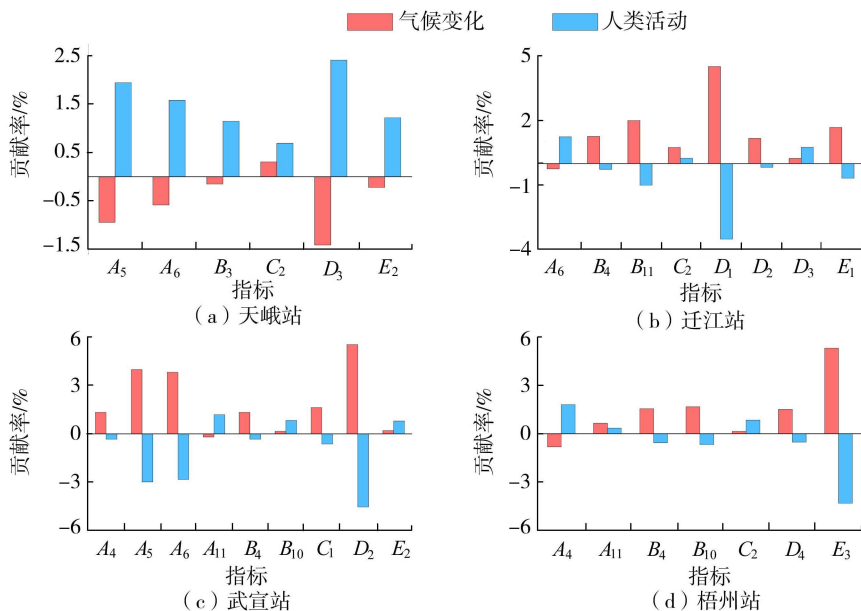


图5 气候变化和人类活动对 ERHIs 变化的贡献率

Fig.5 Contribution rates of climate change and human activities to change in ERHIs

区。这是因为西江流域极端降水整体呈现强度增大、强降水更为集中的特点,中下游低海拔地区相较于上游高海拔地区极端事件增多、降水强度增大的趋势更为明显^[23]。而降水量大小直接影响流域内的径流量,是气候变化中引起水文情势变化的主要因素。20 世纪 60 年代以来西江流域气候变化的总体趋势为年降水减少,降水的减少导致来水补给减少,进而改变了流域的水文格局,引起河流水文情势的变化^[35-36]。人类活动对西江流域水文情势变化的驱动体现在以下方面:①西江流域水力资源丰富,建设有天生桥水电站、大藤峡水利枢纽以及龙滩、岩滩水库等水利工程,流域下垫面发生改变进而引起水文节律变化;②人口的增加以及珠江—西江经济带的发展使得取用水量增加,引水工程及航道航运等人类活动的频繁干预也加剧了河川径流的变化,对流域水资源合理开发及生态环境的保护和恢复带来新的挑战。分析水文情势变化及其驱动因素,有利于应对水文情势变化带来的不利影响,更好地保障流域正常生态功能和维持生态系统健康。

4 结 论

a. 对西江干流 4 座水文站年径流序列的突变检验表明,天峨站、迁江站、武宣站、梧州站第一次突变年份分别为 1986 年、1986 年、1992 年、1983 年,以此划分径流序列的天然时期和变化时期。

b. 利用 IHA-RVA 法,基于 DHRAM 和水文变异程度综合分析可知,西江干流 4 座水文站 5 组水文指标变化时期较天然时期均存在不同程度的改变,整体水文情势改变度均为中度,其中天峨、迁江

站改变程度明显高于武宣、梧州站,应重点关注中上游河段生态环境的保护。

c. 采用 PCA 法筛选得到 ERHIs,基于 RF 模型模拟变化时期气候因素影响下的径流,结合残差分析得出气候变化与人类活动均是西江干流水文情势演变的重要驱动因素,气候变化对西江干流水文情势变化的影响程度表现为中下游地区大于上游地区,上游天峨站水文情势变化主要受人类活动的影响,气候变化对迁江、梧州站水文情势变化的影响程度大于人类活动,武宣站二者的影响相当,研究结果对适应环境变化的西江干流生态恢复及河流健康管理具有重要意义。

参考文献:

- [1] YANG Dawen, YANG Yuting, XIA Jun. Hydrological cycle and water resources in a changing world: a review [J]. Geography and Sustainability, 2021, 2(2): 115-122.
- [2] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [3] 宋益涛, 王双涛, 罗平平, 等. 变化环境下径流演变的研究方法进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 68-76. (SONG Yitao, WANG Shuangtao, LUO Pingping, et al. Advances in research methods of runoff evolution under changing environment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 68-76. (in Chinese))
- [4] 黄显峰, 贾永乐, 方国华, 等. 基于 PP-RVA 法的水电站

- 下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6): 479-485. (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] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [7] 江善虎, 任明明, 章二子, 等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in source region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [8] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))
- [9] 吕向林, 姬世保, 仇亚琴, 等. 汾河流域上游基流特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 147-153. (LYU Xianglin, JI Shibao, QIU Yaqin, et al. Characteristics of base flow in upstream of Fen River Basin and its influencing factors[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 147-153. (in Chinese))
- [10] 鞠琴, 吴佳杰, 姚婷月, 等. 基于 IHA-RVA 法的渭河流域水文情势变化分析[J]. 水文, 2022, 42(4): 76-82. (JU Qin, WU Jiajie, YAO Tingyue, et al. Analysis of hydrological regime change in Weihe River Basin based on IHA-RVA method[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 76-82. (in Chinese))
- [11] 杨靖, 蔺子琪, 赵庆绪, 等. 基于 ERHIs 法的雅鲁藏布江流域水文情势变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 108-119. (YANG Jing, LIN Ziqi, ZHAO Qingxu, et al. Research on the change of hydrological regime in the YarlungZanbo River Basin based on ERHIs method[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 108-119. (in Chinese))
- [12] 王鸿翔, 赵颖异, 卓志宇, 等. 基于 IHA-RVA 法的资水流域水文情势评估[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 16-21. (WANG Hongxiang, ZHAO Yingyi, ZHUO Zhiyu, et al. Hydrological regime assessment of Zishui Basin based on IHA-RVA method[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2019, 40(2): 16-21. (in Chinese))
- [13] 江善虎, 刘亚婷, 任立良, 等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 9-14. (in Chinese))
- [14] 林雍权, 陈启慧, 李琼芳, 等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 21-26. (LIN Yongquan, CHEN Qihui, LI Qiongfang, et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin'anjiang model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 21-26. (in Chinese))
- [15] JIANG Chong, LI Daiqing, GAO Yanni, et al. Impact of climate variability and anthropogenic activity on streamflow in the Three Rivers Headwater Region, Tibetan Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(1/2): 667-681.
- [16] 蒋美彤. 人类活动对水文干旱的影响研究: 以嫩江流域为例[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [17] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 25-32. (in Chinese))
- [18] 王艺璇, 刘夏, 沈彦军. 随机森林模型在径流变化归因分析中的适用性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 864-874. (WANG Yixuan, LIU Xia, SHEN Yanjun. Applicability of the random forest model in quantifying the attribution of runoff changes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5): 864-874 (in Chinese))
- [19] 宋蕾玥, 张珂, 晁丽君, 等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 125-132. (SONG Leiyue, ZHANG Ke,

- CHAO Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3) : 125-132. (in Chinese)
- [20] 刘娣, 孙佳倩, 余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (3) : 7-14. (LIU Di, SUN Jiaqian, YU Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3) : 7-14. (in Chinese))
- [21] 高玮志, 高华勇, 王兆礼, 等. 基于机器学习的太湖流域多层次防洪调度方案综合评价 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (3) : 118-125. (GAO Weizhi, GAO Huayong, WANG Zhaoli, et al. Comprehensive evaluation of multi-level flood control operation schemes in the Taihu Lake based on machine learning [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3) : 118-125. (in Chinese))
- [22] 苏训. 珠江生态流量保障实践与思考 [J]. 中国水利, 2020 (15) : 53-55. (SU Xun. The practice and thought of ecological flow guarantee of the Pearl River [J]. China Water Resources, 2020 (15) : 53-55. (in Chinese))
- [23] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (6) : 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6) : 128-136. (in Chinese))
- [24] 张媛, 李常斌, 王刘明, 等. 几种河川径流序列突变检验方法的对比 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (2) : 38-47. (ZHANG Yuan, LI Changbin, WANG Liuming, et al. Application and comparison of several test methods for change points diagnosis in streamflow variations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51 (2) : 38-47. (in Chinese))
- [25] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10 (4) : 1163-1174.
- [26] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37 (1) : 231-249.
- [27] 李欢玮, 赵广举, 穆兴民, 等. 渭河水文情势变化评估及归因分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30 (1) : 91-96. (LI Huanwei, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Alteration of hydrologic regime and analysis on its driving factors of the Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30 (1) : 91-96. (in Chinese))
- [28] BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC water framework directive [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2005, 15 (5) : 427-446.
- [29] RAHMAN M A T M T, HOQUE S, SAADAT A H M. Selection of minimum indicators of hydrologic alteration of the Gorai River, Bangladesh using principal component analysis [J]. Sustainable Water Resources Management, 2017, 3 (1) : 13-23.
- [30] KANG H, MOON J, SHIN Y, et al. Modification of SWAT auto-calibration for accurate flow estimation at all flow regimes [J]. Paddy and Water Environment, 2016, 14 (4) : 499-508.
- [31] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (3) : 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (3) : 313-323. (in Chinese))
- [32] GAO Qianyu, LI Guofang, LI Zhenyang. Attribution of climate change and human activities to urban water level alterations and factors importance analysis in central Taihu Basin [J]. Urban Climate, 2021, 40 : 101011.
- [33] 李光录, 樊立娟. 基于 IHA-RAV 法的长江源区生态水文情势变化 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (1) : 37-42. (LI Guanglu, FAN Lijuan. Study on ecohydrological regime change in headwaters of the Yangtze River by using indicators of hydrologic alteration and range of variability approach [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (1) : 37-42. (in Chinese))
- [34] 郭文献, 周昊彤, 张丽, 等. 近 60 年来岷江水文情势评价 [J]. 中国农村水利水电, 2022 (4) : 1-7. (GUO Wenxian, ZHOU Haotong, ZHANG Li, et al. Evaluation of hydrological situation of Minjiang River in the past 60 years, China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (4) : 1-7. (in Chinese))
- [35] 苏恒, 徐宗学, 李鹏, 等. 1970—2017 年西江流域降水特性分析 [J]. 水力发电学报, 2021, 40 (6) : 51-61. (SU Heng, XU Zongxue, LI Peng, et al. Characteristics of precipitation in Xijiang River Basin from 1970 to 2017 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (6) : 51-61. (in Chinese))
- [36] YANG Lin, ZHAO Guangju, TIAN Peng, et al. Runoff changes in the major river basins of China and their responses to potential driving forces [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607 : 127536.

(收稿日期: 2024 - 06 - 07 编辑: 施业)