

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.004

气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应

李铠峰^{1,2}, 赵超^{1,2}, 李文或^{1,2}, 邓淇耘^{1,2}, 刘涵^{1,2}, 李宜润^{1,2}

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门市水资源利用与保护重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要: 为充分认识气候变化及人类活动影响下的河流水文健康响应, 采用降水-径流双累积曲线法和 Pettitt 法分析永安溪径流变化, 并基于气象和径流数据构建流域长短期记忆(LSTM)神经网络模型还原天然流量序列, 通过对多种方法计算的最适宜生态流量进行对比和筛选, 揭示了永安溪河流水文健康度(R_{HD})变化, 定量评估了各驱动因子的贡献度。结果表明: 永安溪径流的突变时间为 2003 年, 与下岸水库运行时间一致; 与 5 种概率密度函数法相比, Q50 法计算的永安溪流域最适宜生态流量是可靠且合理的; 与人类活动的贡献(34.74%)相比, 气候变化(65.26%)是永安溪河流水文健康下降的主要因素; 对比还原流量的 R_{HD} , 下岸水库运行后实测流量的 R_{HD} 在 3 月、4 月、10 月明显提升。

关键词: 河流水文健康; LSTM; 最适生态流量; 永安溪

中图分类号: P467; P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)01-0025-06

Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River

LI Kaifeng^{1,2}, ZHAO Chao^{1,2}, LI Wenyu^{1,2}, DENG Qiyun^{1,2}, LIU Han^{1,2}, LI Yirun^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. The Key Laboratory of Water Resources Utilization and Protection of Xiamen, Xiamen 361024, China)

Abstract: To comprehensively understand the response of climate change and human activities impact of the river hydrological health, the precipitation-runoff double accumulation curve method and Pettitt method were used to analyze the abrupt change of runoff of Yong'an River, and the long short-term memory (LSTM) neural network model was developed to reconstruct the natural flow series based on meteorological and runoff datasets. Various optimal ecological flow calculation methods were compared and filtered to reveal the change trend in the river hydrological health degree (R_{HD}), and contribution of each driving factor was quantitatively evaluated. The results show the mutation in the runoff series of Yong'an River occurred in 2003, which is consistent with the operating time of the Xia'an reservoir. Compared with the five probability density function methods, the Q50 flow is recognized as the optimal ecological flow calculation method for the Yong'an River Basin. Compared to the contribution of human activity (approximately by 34.74%), climate change is the main factor (approximately by 65.26%) contributing to the decline in the hydrological health of Yong'an River. The R_{HD} of the measured runoff after the operation of the Xia'an reservoir showed a significant increase compared with the R_{HD} of the restored natural runoff, especially in March, April, and October.

Key words: river hydrological health; LSTM; optimal ecological flow; the Yong'an River

河流健康是指河流在生态功能和生物多样性方面的状态。人类活动(如水库调节和取水)会对径流产生影响,进而影响河流健康;气候变化则通过降水、极端事件频率和强度、气温以及太阳辐射等影响径流,进而影响河流健康^[1-4]。研究气候变化及人类活动影响下河流健康的响应机理可以更好地应对全球水资源管

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J011232); 厦门理工学院研究生科技创新计划项目(YKJCX2022171)

作者简介: 李铠峰(1995—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: 2222031423@stu.xmut.edu.cn

通信作者: 赵超(1977—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zhaochao@xmut.edu.cn

引用本文: 李铠峰,赵超,李文或,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 25-30.

LI Kaifeng, ZHAO Chao, LI Wenyu, et al. Hydrological health respond of climate change and human activities impact of the Yong'an River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 25-30.

理面临的挑战。河流健康大多采用化学、生物等生态指标研究;李磊等^[5]基于三峡工程蓄水后营养盐结构的变化,研究了蓄水可能引起的生态系统结构变化;盛萧等^[6]基于 5 种生物评价指数评估了东江流域主要干支流的河流生态健康。水文条件是影响河流生态系统生物多样性和生态完整性的基础因素,对维持生态平衡具有决定性作用。生态流量是指在维持河流自然功能和社会功能均衡发挥的前提下,保持河流、湖泊等水生态系统健康状态所需的水量,表征了河流的水文健康程度^[7]。江善虎等^[8-10]采用概率密度函数法计算生态流量,并通过与常见生态流量计算方法进行比较,获得最适宜生态流量指标,提出了科学合理的河流水文健康评价法。

在气候变化和人类活动的影响下,流域径流会经历某种程度的突变,从而对河流健康产生影响。本文以永安溪流域为研究区,通过长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)模型还原突变后的天然流量,构建河流水文健康评价指标——水文健康度,对突变前后的河流水文健康度进行评估与对比,以深入了解气候变化和人类活动的影响程度,以期为现阶段和未来潜在风险的预测与应对奠定理论基础。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

永安溪地处浙江省台州市,是椒江水系的源头,为仙居的“母亲河”,西起安岭,东下椒江,横贯仙居全境,全长 141.30 km,流域面积为 2 704 km²。柏枝岙水文站(28.88°N,120.93°E)是永安溪流域的出口控制站,位于浙江省临海市白水洋镇柏枝岙村,汇水面积为 2 475 km²。流域分布有曹店、白塔、仙居和柏枝岙雨量站。下岸水库位于仙居县溪港乡曹店村下游约 680 m 处,于 2003 年 3 月下闸蓄水,水库坝址以上控制集雨面积 259 km²,主河长 36 km,总库容量为 1.35 亿 m³,流域水文气象站点分布如图 1 所示。

1.2 研究数据

本文使用的 1980—2020 年永安溪流域的温度、相对湿度等逐月气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);1980—2020 年曹店、白塔、仙居和柏枝岙 4 个雨量站日降水数据和柏枝岙水文站的日流量数据来自台州水利局,采用泰森多边形法计算流域平均日降水量,并进一步将日降水量和日流量进行转换得到月值和年值的降水量和流量。

2 研究方法

2.1 最适宜生态流量

河流流量维持在最适宜的生态流量对于保持河流生态系统的稳定性和河流水文健康具有重要意义。最适宜生态流量的确定需要考虑流域的地理、气候、水文和生态特征,常见的方法是选取合适的概率密度函数拟合月径流序列,将密度曲线最大值定义为最适宜生态流量。本文选取水文分析中比较常用的非参数估计核密度函数(kernel density estimation, KDE),及 4 种参数化的概率密度函数,包括逆高斯分布(inverse Gaussian, IG)、对数正态分布(Log-Normal, Log-N)、广义极值分布(generalized extreme value distribution, GEV)^[11]、伽马分布(Gamma)。将以上 5 种概率密度函数的结果与 50%保证率的月流量(Q₅₀)^[12]进行比较,筛选出永安溪流域最适宜生态流量计算方法,并利用 25%保证率(Q₂₅)、75%保证率(Q₇₅)的月流量和 Tennant 法^[13]检验其分布的可靠性。考虑到突变后的流量序列受到了环境变化的影响,基于基准期的流量序列计算最适宜生态流量(Q₀)。

2.2 河流水文健康评价标准

基于筛选的最适宜生态流量以及 6 个不同水平的生态流量指标,通过无量纲数公式(式(1))耦合成一个系统,构建河流水文健康度^[9]评估河流水文健康。

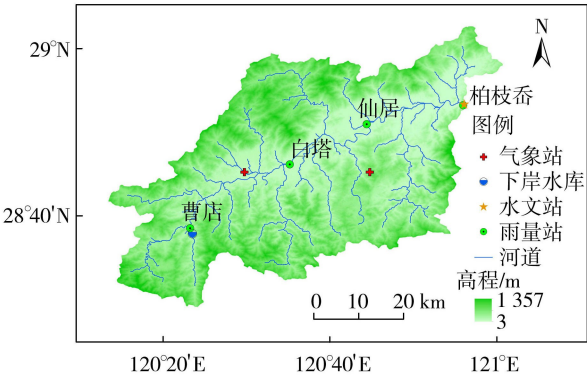


图 1 永安溪流域水文气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological stations in the Yong'an River Basin

$$R_{HD} = \begin{cases} 10(0.5Q/Q_5) & 0 \sim < Q_5 \\ 10[1.5(Q-Q_5)/(Q_3-Q_5)+1] & Q_5 \sim < Q_3 \\ 10[2(Q-Q_3)/(Q_1-Q_3)+4] & Q_3 \sim < Q_1 \\ 10[(Q-Q_1)/(Q_0-Q_1)+8] & Q_1 \sim < Q_0 \\ 10[(Q_2-Q)/(Q_2-Q_0)+9] & Q_0 \sim Q_2 \\ 10[2(Q_4-Q)/(Q_4-Q_2)+6] & > Q_2 \sim Q_4 \\ 10[1.5(Q_6-Q)/(Q_6-Q_4)+2.5] & > Q_4 \sim Q_6 \\ 10[(1.5Q_6-Q)/Q_6+0.5] & > Q_6 \sim 1.5Q_6 \\ 5 & > 1.5Q_6 \end{cases} \tag{1}$$

式中： R_{HD} 为河流水文健康度； Q 河流的实测流量； Q_5 为极低环境流量，等于基准期每个月的最小日流量； Q_3 为最小环境流量，等于基准期月最小流量； Q_1 为流量下限阈值，等于 Q_3 和 Q_0 的平均值； Q_2 为流量上限阈值，等于 Q_4 和 Q_0 的平均值； Q_4 为最大环境流量，等于基准期月最大流量； Q_6 为极高环境流量，等于基准期每个月的最大日流量。式中各变量均为月尺度。由式(1)可知 R_{HD} 的取值范围为 $0 \sim 100$ ， $80 \leq R_{HD} \leq 100$ 、 $40 \leq R_{HD} < 80$ 、 $0 \leq R_{HD} < 40$ 分别对应的河流水文健康等级为稳定、干扰、严重破坏。

2.3 驱动因子对河流水文健康变化的贡献分割

根据 LSTM 模型的输入数据特征，将影响河流水文健康度变化的因子分为气候变化因子和人类活动因子，分析气候变化和人类活动对河流水文健康度的贡献^[13-14]：

$$\Delta R_{HD} = \Delta R_{HD,hum} + \Delta R_{HD,cli} = \bar{R}_{HD,obs-post} - \bar{R}_{HD,obs-pre} \tag{2}$$

$$\Delta R_{HD,cli} = \bar{R}_{HD,sim-post} - \bar{R}_{HD,sim-pre} \tag{3}$$

$$\eta_{hum} = \frac{|\Delta R_{HD,hum}|}{|\Delta R_{HD,hum}| + |\Delta R_{HD,cli}|} \times 100\% \tag{4}$$

$$\eta_{cli} = \frac{|\Delta R_{HD,cli}|}{|\Delta R_{HD,hum}| + |\Delta R_{HD,cli}|} \times 100\% \tag{5}$$

式中： ΔR_{HD} 为突变年份前后 R_{HD} 的差异； $\Delta R_{HD,hum}$ 、 $\Delta R_{HD,cli}$ 分别为人类活动和气候变化的贡献； $R_{HD,obs-pre}$ 、 $R_{HD,obs-post}$ 分别为突变年前后观察到的 R_{HD} ； $R_{HD,sim-pre}$ 、 $R_{HD,sim-post}$ 分别为突变年前后的模型模拟径流的 R_{HD} ； η_{hum} 、 η_{cli} 分别为人类活动和气候变化影响的贡献率。

3 结果与分析

3.1 径流变化与突变

采用 M-K 趋势检验^[15-16]对永安溪流域 1980—2020 的年径流序列进行趋势分析， $Z = -0.12$ ，表明永安溪流域径流呈现不显著下降趋势。Pettitt 法^[17]和降水-径流双累积曲线检测结果如图 2 和图 3 所示。

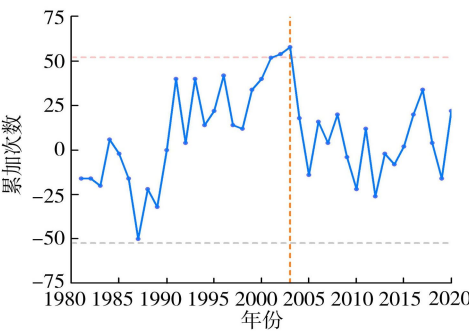


图 2 年尺度径流 Pettitt 突变检验

Fig. 2 Pettitt mutation test of annual runoff

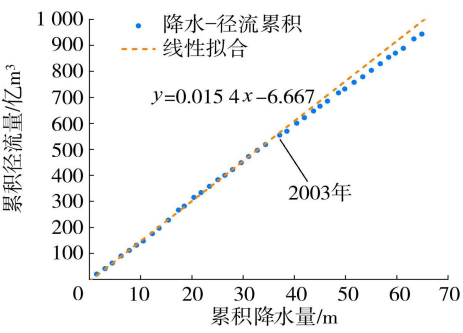


图 3 年降水-径流双累积曲线

Fig. 3 Double cumulative curve of annual precipitation-runoff

由图 2 和图 3 可知,永安溪流域的径流突变年份为 2003 年,与下岸水库投入运行年份一致。因此,将整个研究周期(1980—2020 年)划分为 2 个阶段:基准期(1980—2002 年)和变化期(2003—2020 年)。

3.2 天然流量还原

将基准期分为训练期(1980—1997 年)和验证期(1998—2002 年)。采用训练期气象数据(降雨、相对湿度、温度)和流量数据通过 LSTM 模型^[18-20]进行参数训练,调试后参数:隐藏神经元为 64、最大 epoch 为 200、初始学习率为 0.01、正则化系数为 10^{-4} 、学习率缩减因子为 0.01。基准期 LSTM 模型模拟结果(图 4)表明:LSTM 模型对永安溪训练期月流量序列的模拟精度较高,训练期纳什效率系数、相对误差、绝对值洪峰误差分别是 0.91、-1.23%、11.59%,验证期纳什效率系数、相对误差、绝对值洪峰误差分别为 0.86、1.25%、5.41%,且皮尔逊相关系数均大于 0.9(训练期为 0.96,验证期为 0.93),说明基于 LSTM 模型模拟永安溪月尺度天然流量序列是合理和可靠的,可利用 LSTM 模型还原变化期的天然流量序列,用于评估河流的水文健康状态以及分割驱动因子的贡献程度。

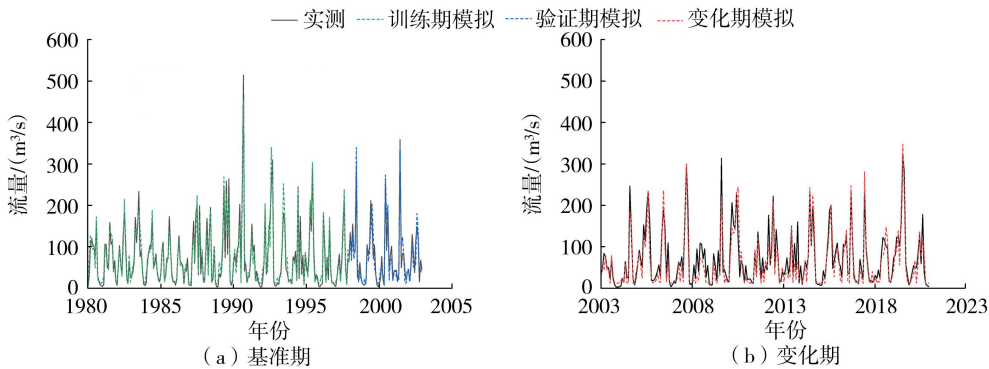


图 4 LSTM 模型模拟结果
Fig. 4 Simulated results of LSTM model

3.3 最适宜生态流量

5 种概率密度函数(KDE、IG、Log-N、GEV、Gamma)以及 50%保证率(Q50)法的最适宜生态流量计算结果如图 5 所示。由图 5 可知,IG、Log-N 和 Gamma 的各月最适宜生态流量偏低,甚至部分月份低于月频率法的 Q25,而 KDE、GEV 和 Q50 法的计算结果均在月频率法的 Q25 与 Q75 范围和 Tennant 法计算的最佳下限阈值($Tennant_L$)和最佳上限阈值($Tennant_H$)范围中间。在年尺度中,KDE、GEV 和 Q50 法计算的年最适宜生态流量分别为 69.12、77.21、70.85 m^3/s ,均在 Q25 和 Q75 范围(64.87~83.38 m^3/s)及 Tennant 法推荐的最佳流量范围(53.55~106.56 m^3/s),并且 Q50 法计算的月最适宜生态流量位于 GEV 和 KDE 中间,表明本文采用 Q50 法计算永安溪流域最适生态流量是恰当且可靠的。

基于 Q50 法,柏枝杳水文站每月各生态流量分布结果如图 6 所示。台风带来的强降雨导致永安溪 7—9 月流量急剧上升,因此 7—9 月的日最高流量(Q_6)显著大于其他月份。

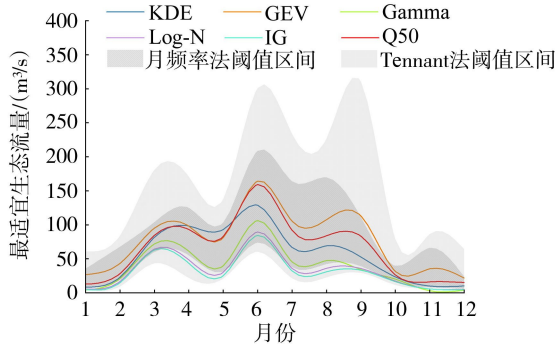


图 5 永安溪流域最适宜生态流量对比
Fig. 5 Comparison of optimal ecological flows in Yong'an River Basin

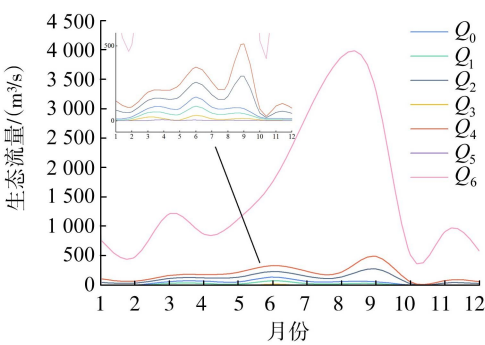


图 6 柏枝杳水文站生态流量年内分布
Fig. 6 Annual distribution of ecological flow of Baizhaio hydrological station

3.4 河流水文健康度评估

基于 LSTM 模型模拟还原的天然流量和河流水文健康度公式,评估永安溪流域基准期和变化期各月尺度水文健康情况(图 7)。由图 7 可知,实测流量和模拟流量的 R_{HD} 都在 2003 年左右发生了比较明显的下降变异,且模拟流量的 R_{HD} 下降程度更大。随着经济发展和人口增长,城市供水和工业用水增加,加剧了河流中水量的减少,从而影响了河流水文健康,这与径流量的突变分析结果一致。

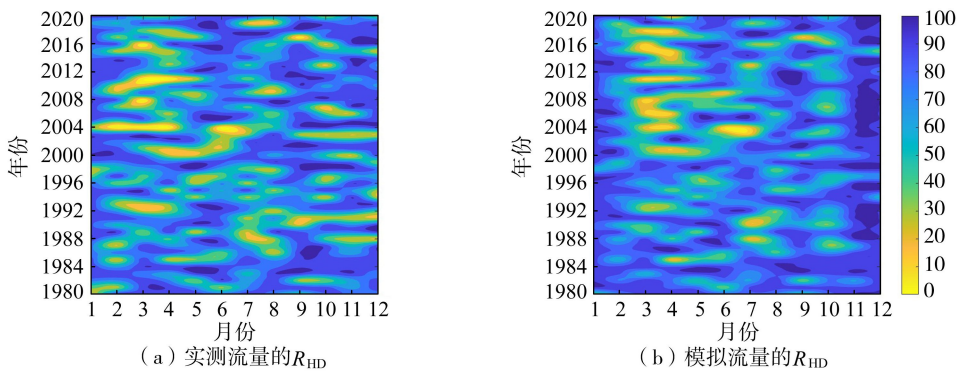


图 7 实测和模拟流量的 R_{HD}

Fig. 7 R_{HD} of measured and simulated series

变化期实测流量和模拟流量的 R_{HD} 在 3—4 月明显比其他月份低,且部分低于 25,出现严重破坏。主要是因为变化期 3—4 月大部分月流量小于基准期月最小流量。这主要和变化期的气候变化关系紧密,但相比变化期实测流量和模拟流量的 R_{HD} ,实测流量的偏大,说明下岸水库的运行对 3—4 月流量的调节发挥了作用。

对基准期和变化期年尺度的水文健康进行评估,突变前后的年平均水文健康度分别为 80.70 和 70.75,整体下降 9.95。显然,变化期的气候变化和人类活动对永安溪河流水文健康产生了较为明显的下降影响。

3.5 气候变化和人类活动对河流水文健康的影响程度

基于 LSTM 模型的模拟结果和式(2)~(5),定量分离气候变化和人类活动的影响,结果表明,永安溪变化期水文健康的下降主要受气候变化影响,贡献率达到 65.26%,人类活动的影响相对较小,贡献率为 34.74%。进一步细分年内各月气候变化和人类活动的贡献(图 8),结果表明年内大部分月份的气候变化贡献率较大,只在 5 月、12 月人类活动的贡献率呈现明显偏大,并提升了 R_{HD} ,说明人类活动(主要表现为水库运行)改善了河流水文健康。年内大部分月份气候变化的贡献量为负值,主要原因在于虽然年降水量的年际变化不大,但是降水的年内分配不均匀程度加大,特别在非汛期月份(如 3 月、4 月、10 月),降水占比更小,对 R_{HD} 产生较显著的负贡献量。而同期水库的运行调蓄,增加了河道流量,3 月、4 月、10 月的 R_{HD} 从 49.35、48.38、56.06 的低值提升至 60.71、62.56、66.24 的良好状态,产生了正贡献量,与沈凯琦等^[21]对永安溪流域的分析结果基本一致。受水库调节作用,径流不均匀系数、完全调节系数及集中度均在水库运行后下降。

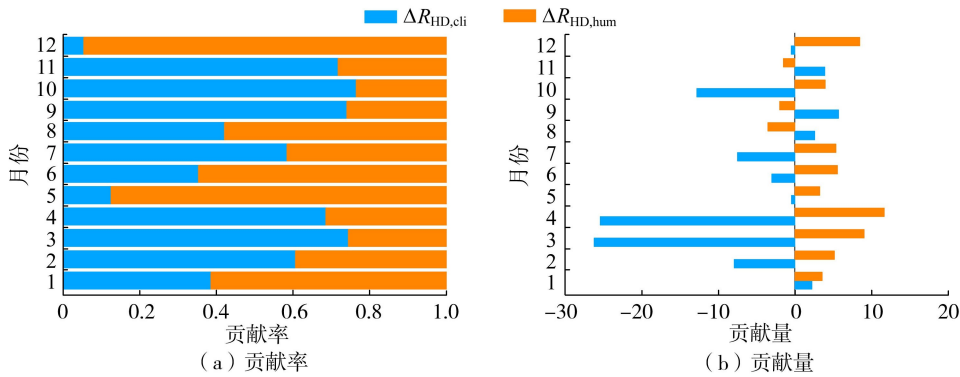


图 8 气候变化和人类活动影响对河流水文健康变化的贡献

Fig. 8 Contributions of climate change and human activities impact to river hydrological health

4 结 论

- a. 永安溪流域的径流突变发生在 2003 年,正好为下岸水库建设完成开始投入运行的时期。验证期纳什效率系数、相对误差、绝对值洪峰误差、皮尔逊相关系数分别为 0.86、1.25%、5.41%、0.93,说明 LSTM 模型模拟永安溪月尺度天然流量序列是合理且可靠的。
- b. Q50 法计算得到的月生态流量值位于 KDE 和 GEV 之间,且符合 Tennant 法验证区间,因此永安溪采用 Q50 保证率计算最适生态流量是准确且合理的。
- c. 流域 3—4 月的河流水文健康受到了干扰,且该期间变化期实测月流量下的 R_{HD} 高于模拟月流量下的 R_{HD} 均值,说明下岸水库的运行对 3—4 月流量的调节产生积极影响。
- d. 永安溪变化期内,气候变化对 R_{HD} 变化的影响为主要因素,贡献率达到 65.26%,人类活动的影响相对较小,贡献率为 34.74%。年内大部分月份气候变化的贡献量为负值,对 R_{HD} 产生较显著的负贡献量。只在 5 月、12 月人类活动的贡献率呈现明显的偏大,且改善了河流水文健康。

参考文献:

[1] 李发文,陶仁杰.变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[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))

[2] HE Yi, QIU Haijun, SONG Jinxi, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101729.

[3] 张亚坤,吴泽昆,唐文哲,等.雄安新区水生态环境一体化管理研究[J].水利经济,2023,41(5):24-28. (ZHANG Yakun, WU Zekun, TANG Wenzhe, et al. Research on integrated management of water ecological environment in Xiong' an New Area [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(5): 24-28. (in Chinese))

[4] 薛联青,白青月,刘远洪.人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J].水资源保护,2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 57-62. (in Chinese))

[5] 李磊,王云龙,蒋玫,等.三峡工程蓄水后长江口溶解硅酸盐(DSi)、营养盐结构的变化特征及其生态影响分析[J].环境化学,2014,33(1):135-141. (LI Lei, WANG Yunlong, JIANG Mei, et al. Changes and impacts of dissolved silicate and nutrient structure in the Yangtze River Estuary and adjacent area after water storage of the Three Gorges Project[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(1): 135-141. (in Chinese))

[6] 盛萧,毛建忠,曹然,等.基于 5 种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J].水资源保护,2017,33(1):75-82. (SHENG Xiao, MAO Jianzhong, CAO Ran, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 75-82. (in Chinese))

[7] MA Diaoyuan, LUO Wenguang, YANG Guolu, et al. A study on a river health assessment method based on ecological flow[J]. Ecological Modelling, 2019, 401: 144-154.

[8] 江善虎,周乐,任立良,等.基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J].水科学进展,2021,32(3):356-365. (JIANG Shanhu, ZHOU Le, REN Liliang, et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 356-365. (in Chinese))

[9] JIANG Shanhu, ZHOU Le, REN Liliang, et al. Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126566.

[10] WANG Menghao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. An approach for identification and quantification of hydrological drought termination characteristics of natural and human-influenced series[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125384.

[11] 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, 51(2): 1-7. (in Chinese))

[12] 白涛,徐燕,孙宪阁,等.官厅水库多目标调度规律与方案研究[J].水资源保护,2023,39(2):101-108. (BAI Tao, XU Yan, SUN Xiange, et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 101-108. (in Chinese))

of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(8):120-132. (in Chinese))

[37] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(730):1999-2049.

[38] ORSOLINI Y, WEGMANN M, DUTRA E, et al. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations[J]. The Cryosphere,2019,13(8):2221-2239.

[39] 温婷婷,郭英香,董少睿,等. 1979—2017 年 CRU、ERA5、CMFD 格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022,39(3):684-697. (WEN Tingting, GUO Yingxiang, DONG Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research,2022,39(3):684-697. (in Chinese))

[40] 徐楠楠. 基于 LSTM 的中国大陆地区 ERA5 日尺度降水预测方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2021.

[41] 丁光旭,郭家力,汤正阳,等. 多种降水再分析数据在长江流域的适用性对比[J]. 人民长江,2022,53(9):72-79. (DING Guangxu, GUO Jiali, TANG Zhengyang, et al. Evaluation on applicability of various reanalysis datasets of precipitation in Changjiang River Basin[J]. Yangtze River,2022,53(9):72-79. (in Chinese))

[42] JIANG Yaozhi, YANG Kun, SHAO Changkun, et al. A downscaling approach for constructing high-resolution precipitation dataset over the Tibetan Plateau from ERA5 reanalysis[J]. Atmospheric Research,2021,256:105574.

(收稿日期:2024-04-08 编辑:刘晓艳)

(上接第 30 页)

[13] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou,BAI Tao,HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):168-174. (in Chinese))

[14] GUO Wenxian, YANG Huan, HU Jianwen, et al. Driving forces of hydrological health and multifractal response of fish habitat in regulated rivers[J]. Journal of Environmental Management,2023,345:118844.

[15] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上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))

[16] 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]. 水利水电科技进步,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))

[17] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(1):1-6. (in Chinese))

[18] 田烨,谭伟丽,王国庆,等. LSTM 变体模型在径流预测中的性能及其可解释性[J]. 水资源保护,2023,39(3):188-194. (TIAN Ye,TAN Weili,WANG Guoqing,et al. Performance of variant LSTM models in runoff prediction and their interpretability [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):188-194. (in Chinese))

[19] 郭燕,赖锡军. 基于长短时记忆神经网络的鄱阳湖水位预测[J]. 湖泊科学,2020,32(3):865-876. (GUO Yan,LAI Xijun. Water level prediction of Lake Poyang based on long short-term memory neural network[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):865-876. (in Chinese))

[20] 郭明辰,张润润,闻余华. 基于 PSO-LSTM 模型的平原河网汛期水位预测[J]. 水利水电科技进步,2024,44(6):64-70. (GUO Mingchen, ZHANG Runrun, WEN Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):64-70. (in Chinese))

[21] 沈凯琦,赵超,张翔宇,等. 下岸水库对永安溪水文情势的影响分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):174-180. (SHEN Kaiqi, ZHAO Chao,ZHANG Xiangyu,et al. Influence analysis of Xia'an Reservoir on hydrological regime of the Yong'an River[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):174-180. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-26 编辑:刘晓艳)