

DOI: 10.5846/stxb202108232345

周乐,王瑞,江善虎,王孟浩,刘亚婷,任立良.生态相关水文指标的优选及其演变归因分析.生态学报,2022,42(17):7068-7079.

Zhou L, Wang R, Jiang S H, Wang M H, Liu Y T, Ren L L. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7068-7079.

生态相关水文指标的优选及其演变归因分析

周乐^{1,2}, 王瑞³, 江善虎^{1,2,*}, 王孟浩², 刘亚婷², 任立良^{1,2}

1 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

2 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

3 香港科技大学土木与环境工程学院, 香港 999077

摘要: 河流生态系统健康是流域可持续发展的基础, 水文情势自然变化是维持河流生态健康的关键因素, 因此需进行变化环境下水文情势演变归因研究。以老哈河流域为例, 基于 1964—2016 年水文气象资料, 利用趋势及突变检验方法, 确定径流序列突变点, 划分研究期, 并结合可变下渗容量模型重建天然径流; 通过主成分分析法确定生态最相关水文指标 (ERHIs), 并利用变化范围法评估水文指标的改变程度; 基于“观测-模拟”对比分析法, 定量评估气候变化和人类活动对河道径流和 ERHIs 的影响。结果表明: 流域年径流序列呈现显著减少趋势, 突变点为 1979 年和 1999 年, 将研究期划分为基准期、变化期 I 和变化期 II; 筛选出 7 个 ERHIs, 分别为 2 月流量、6 月流量、最大 7 日流量、年最小流量出现时间、低流量年内发生次数、高流量年内平均历时、上升率; 7 个 ERHIs 中, 大部分表现为下降趋势, 综合改变度在变化期 I 和变化期 II 分别为 0.45 和 0.74; 定量归因结果表明, 人类活动是影响 ERHIs 变化的主要因素, 其在变化期 II 对水文情势的影响较变化期 I 更为剧烈。研究提供了生态相关水文指标优选及其演变归因的综合方法, 揭示了不同时期流域 ERHIs 变化的主要驱动因子, 为河流适应性管理提供科学依据。

关键词: 气候变化; 人类活动; 水文改变指标; 主成分分析; 演变归因

Optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions

ZHOU Le^{1,2}, WANG Rui³, JIANG Shanhu^{1,2,*}, WANG Menghao², LIU Yating², REN Liliang^{1,2}

1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 Department of Civil and Environmental Engineering, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

Abstract: The health of a river ecosystem is the foundation of the sustainable development of a basin, while the natural variability of the hydrological regime is a key factor for maintaining and protecting the ecological health of a river. Therefore, variation attribution of the hydrological regime in the changing environment becomes more important. In this study, the Laohahe basin was selected as a case study area and its hydro-meteorological data during 1964—2016 were collected to achieve the study aim. Firstly, the study period was divided according to the trend and change points test results of Mann-Kendall, Pettitt and precipitation-streamflow double cumulative curve method. Then, the natural streamflow series was reconstructed using the Variable Infiltration Capacity (VIC) model. After that, the principal component analysis (PCA) was used to select the most ecologically relevant hydrological indicators (ERHIs). Then the degree of the change of the hydrological indicators was evaluated by the range of variability approach. Finally, the ‘simulated-observed’ comparison

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFA0601504); 国家自然科学基金项目 (51979069); 中央高校基本科研业务费项目 (B200204029)

收稿日期: 2021-08-23; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hik0216@163.com

method was adapted to quantify the impacts of climate change and human activities on the variations of streamflow and ERHIs. The results showed that the annual streamflow series of the basin had a significant downward trend ($\alpha < 0.05$) and its change points appeared in 1979 and 1999, respectively. Then the whole study period could be divided into base period, changed period I and II based on the above two change points. Then, 7 ERHIs were selected, including February flow, June flow, annual maximum 7-day flow, Julian day of each annual 1-day minimum, number of low pulse each year, mean duration of high pulse within each year, and rise rate. The 6 ERHIs, February flow, June flow, annual maximum 7-day flow, number of low pulse each year, mean duration of high pulse within each year, and rise rate, had a downward trend. While the Julian day of each annual 1-day minimum showed a slight upward trend. Also, the comprehensive degree of change of the 7 ERHIs are 0.45 and 0.74, respectively in the changed period I and II. The quantitative attribution results showed that human activities were the dominant factors to cause the changes of ERHIs, and their impacts on hydrological regime during the changed period II were more severe than those during the changed period I. This study proposed a comprehensive method for the optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions. Then the method was used to reveal the dominant driving factors of the ERHIs change at different periods. These methods and findings will provide a scientific basis for water resource management under changing environment.

Key Words: climate change, human activity, indicators of hydrological alteration (IHA), principal component analysis (PCA), variation attribution

河流生态系统是多样化生态系统中最重要的一环,为人类和其他生物的生存与发展提供了重要的生态系统服务^[1]。随着人类活动对河流的干扰日益加剧,河流生态系统退化已经成为全球性的生态环境问题^[2]。河流生态系统健康的恢复和维持,已成为流域管理的重要策略,是实现流域可持续发展的基础^[3]。

水文情势的自然变化对水质、水温、溶解氧、营养盐等物理化学过程以及河流地貌形成过程起到了主导作用^[4-5],是维持和保护本土物种和生态完整性的关键因素^[6]。因此,定量描述水文变量和生态变量之间的关系成为国内外研究的热点问题之一^[7-8]。水文改变指标(Indicators of Hydrological Alteration, IHA)方法不仅可以描述流量变化特征,还建立起了不同水文变量与水生生物、栖息地环境等生态特征的联系^[9]。为了定量评估生态水文改变程度,Richter 等^[4]进一步发展了基于 IHA 的变化范围法(Range of variability approach, RVA)。Yang 等^[10]基于遗传算法,构建了 IHA 指标与描述生物多样性指标香农指数之间的拟合关系,定量描述了水文指标与鱼类种群丰度的联系。然而,33 个 IHA 指标之间存在着自相关性和冗余性^[11],使得其在水资源管理实践中难以操作和管理^[12-13]。此外,气候变化耦合人类活动影响引起的环境变化,使得水文指标的变化更为显著,导致了严重的河流生态系统退化^[14-16]。因此,优选表征生态水文信息的关键水文变量,了解其变化特征和潜在驱动因素,对流域水资源的有效管理及河流生态系统的保护具有重要意义^[17-18]。

本文以老哈河流域为例,利用可变下渗容量模型(Variable Infiltration Capacity, VIC)重建天然流量序列;采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)方法从 IHA 指标中筛选生态最相关水文指标(The most ecologically relevant hydrological indicators, ERHIs);基于“观测-模拟”对比分析法,定量评估气候变化和人类活动对河道径流、ERHIs 等水文变量变化的影响,以期对河流适应性管理提供基础依据。

1 研究区概况

老哈河发源于燕山山脉北部的光头山,全长约 430 公里,是西辽河的主要源头之一。本研究选取兴隆坡水文站(42°19'N, 119°26'E)以上集水面积作为研究区。研究区面积为 18112km²,呈不对称扇形,介于 41°—42°45'N, 117°15'—120°E(图 1)。流域地形以山地为主,地势起伏较大,自西南向东北高程由 2017m 下降为 427m。流域地处中温带半干旱大陆性季风气候区,夏季高温多雨,多年平均降水量约为 411.7mm,约 88%的

年降水发生在 5—9 月份。近 50 年流域平均气温为 7.0℃,且表现出缓慢上升的趋势。流域内水利工程众多,包括 2 座大型水库(三座店、打虎石)、1 座中型水库(二道河子)以及 30 多座小型水库,总蓄水量超过 5 亿 m^3 ,主要满足流域内农业灌溉的需要^[19]。其中,三座大中型水库的基本信息见表 1。

表 1 老哈河流域主要水库基本信息

Table 1 Basic information on the main reservoirs in the Laohahe basin

水库名称 Reservoir	经度/纬度 Latitude/Longitude	修建时间 Building time/a	库容量 Storage Capacity/ ($10^8 m^3$)	级别 Class
三座店	42°14', 118°54'	2003—2005	3.69	II
打虎石	41°25', 118°41'	1968—1970	1.2	II
二道河子	42°18', 119°00'	1968—1971	0.8	III

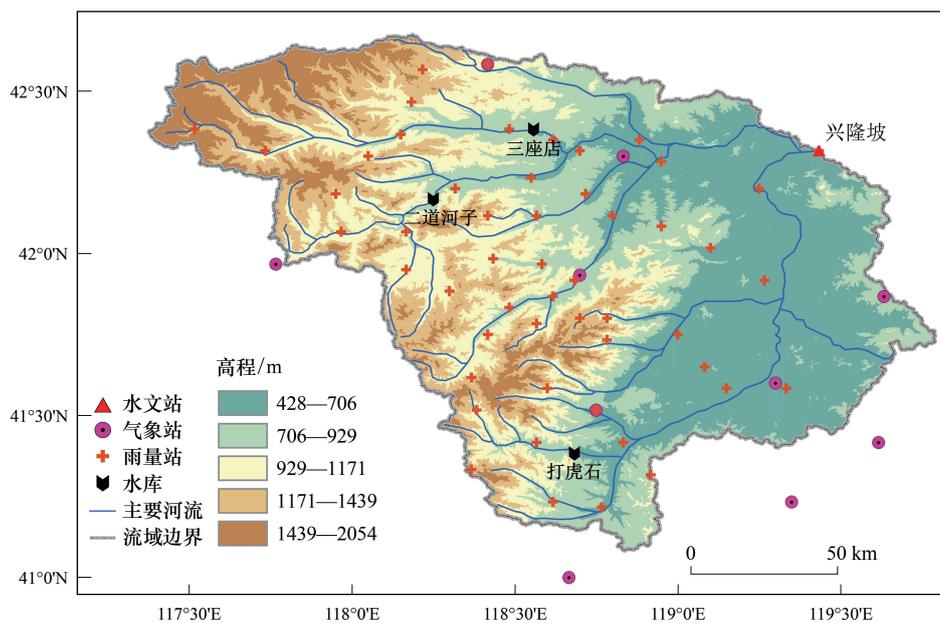


图 1 老哈河流域水文站、气象站和雨量站示意

Fig.1 Sketch map of meteorological and hydrological stations over the Laohahe basin

2 数据及方法

2.1 研究数据

本文收集的资料主要分为地理信息数据、水文气象数据和社会经济数据。地理信息数据包括:美国地质调查局(USGS)网站提供的 30m 分辨率的全球数字高程模型数据(<https://www.usgs.gov/>);联合国粮食与农业组织(FAO)提供的土壤类型数据;美国马里兰大学提供的 1km 分辨率的全球土地覆被类型数据。水文气象数据包括:从内蒙古水文局获取的 1964—2016 年 17 个雨量站日降雨数据和兴隆坡水文站的日流量数据,从国家气象局获取的老哈河流域内及周边 6 个气象台站 1964—2016 年数据(<http://data.cma.cn/>),包括日最高和最低气温、10m 平均风速,并采用反距离平方加权法对站点数据进行空间插值。社会经济数据主要为中国科学院资源环境科学与数据中心提供的人口和国内生产总值(GDP)数据(<http://www.resdc.cn>)以及地方统计局提供的粮食产量数据。

2.2 研究方法

2.2.1 天然径流重建

本文采用可变下渗容量模型(VIC)重建天然径流序列。作为大尺度分布式水文模型,VIC 模型模拟径流

被广泛应用于径流演变归因^[20]、干旱的演变及影响^[21-22]和生态相关径流指标的评估^[23]等方面。模型主要通过读取区域土壤类型和土地利用类型数据,利用降水、气温和风速等水文气象数据驱动计算产流并汇流至流域出口,依据基准期的实测流量数据率定和验证模型参数,进而还原河流天然流量序列。因此,本文应用 Mann-Kendall (MK) 趋势检验^[24]、Pettitt 突变点检测^[25]和降水径流双曲线法分析流域降水、潜在蒸散发和径流序列的变异特征,并将研究期划分为基本不受人活动影响的基准期和受人活动影响的变化期。其中,潜在蒸散发量由 Penman-Monteith 公式^[19]计算得到。

2.2.2 基于 PCA 的生态最相关指标优选及其改变度计算

水文变化指标(IHA)包含了 33 个水文变量,按照其特征可分为 5 组(表 2),涵盖了径流量的量级、出现时间、历时、频率和变化率等水文特征。利用 IHA 7.1 软件,可计算各水文变量的统计特征。各水文指标更加详细的说明和具体计算方法请参见 IHA 软件使用手册^[26]。

主成分分析(PCA)是通过降维的方法将一系列相关变量转化为少数几个不相关变量,并较大程度保留原始数据的关键信息^[27]。本文中,IHA 共有 33 个指标,且各指标的量纲与数值大小存在明显差异,因此首先要对数据进行标准化处理。基于特征值 ≥ 1 和累计贡献率达到 70%—90%两个原则,可确定主成分(PC)的个数,并将主成分因子载荷矩阵中绝对值最大的变量作为该主成分的解释变量,从而优选出生态最相关水文指标(ERHIs)。

表 2 IHA 的分组及变量

Table 2 Groups and variables of IHA

IHA 组别 IHA groups	序号 Number	基本说明 Definition of parameters
第 1 组:月平均流量 Group 1: Magnitude of monthly water condition	1—12	1—12 月的各月平均流量
第 2 组:年极端流量及历时 Group 2: Magnitude and duration of annual extreme water conditions	13—24	年均最小(大)1、3、7、30、90 日流量,零流量天数、基流指数
第 3 组:年极端流量出现时间 Group 3: Timing of annual extreme water conditions	25—26	年最大(小)日流量发生时间(儒略日)
第 4 组:高低流量发生频率和历时 Group 4: Frequency and duration of high and low pulses	27—30	年高(低)流量脉冲发生次数,年高(低)流量脉冲平均历时(在某水文年内,流量超过 75% 分位数的划分为高流量,低于 25% 分位数的划分为低流量)
第 5 组:流量改变率和频率 Rate and frequency of changes in water condition	31—33	上升率,下降率,逆转次数(上升率(下降率)为某水文年内连续两日流量的正(负)变化率;逆转次数指某水文年内日流量由增加转为减少或由减少转为增加的次数)

IHA:水文改变指标方法 Indicators of Hydrological Alteration

变化范围法通常被用来评估水文指标的改变程度。该方法以基准期各指标发生概率为 75% 和 25% 对应的值作为上下阈值,可估算单一指标的水文改变度,并通过计算多个指标的综合改变度反映河流受影响程度。其计算公式如下:

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

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (2)$$

式中, D_i 为第 i 个水文指标改变度; D_0 为多个指标综合改变度; $N_{o,i}$ 为第 i 个指标在变化期水文指标落在 RVA 阈值范围内的实际年数; N_e 为变化期水文指标落于 RVA 阈值范围内的预期年数; $0 \leq |D| < 0.33$ 为低度改变; $0.33 \leq |D| < 0.67$ 为中度改变; $0.67 \leq |D| \leq 1$ 为高度改变。

2.2.3 环境变化对水文指标影响的定量计算

“观测-模拟”对比分析法基于水文模型还原天然径流,被广泛应用于定量刻画环境变化对径流的影

响^[28]。假定气候变化和人类活动是相互独立的,则气候变化和人类活动对水文变量影响的定量分离如下:

$$\Delta X_t = \Delta X_c + \Delta X_h = \bar{X}_{2,obs} - \bar{X}_{1,obs} \quad (3)$$

$$\Delta X_c = \bar{X}_{2,sim} - \bar{X}_{1,sim} \quad (4)$$

$$\Delta X_h = \Delta X_t - \Delta X_c = (\bar{X}_{2,obs} - \bar{X}_{1,obs}) - (\bar{X}_{2,sim} - \bar{X}_{1,sim}) \quad (5)$$

$$I_c = \frac{\Delta X_c}{|\Delta X_t|} \times 100\% \quad I_h = \frac{\Delta X_h}{|\Delta X_t|} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ΔX_t 和 $|\Delta X_t|$ 分别表示水文变量的总变化值和其绝对值; ΔX_c 和 ΔX_h 分别表示气候变化和人类活动引起的水文变量变化量; $\bar{X}_{1,obs}$ 和 $\bar{X}_{2,obs}$ 分别为基准期和变化期实测序列水文变量多年平均值; $\bar{X}_{1,sim}$ 和 $\bar{X}_{2,sim}$ 分别为基准期和变化期模拟序列水文变量多年平均值; I_c 和 I_h 分别表示气候变化和人类活动对水文变量变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 水文气象要素变异分析与天然径流重建

老哈河流域 1964—2016 年水文气象要素演变特征如表 3 和图 2 所示。该流域年降水量和潜在蒸散发量呈不显著下降趋势,其 MK 检测量 Z 值分别为 -0.81 和 -0.70。年径流量下降趋势明显,其 MK 检测量 Z 值为 -5.04,特别是 2000 年之后,年径流量下降显著。Pettitt 突变点检测和降水径流双累积曲线结果一致表明:流域年降水量和潜在蒸散发量无明显突变特征,而年径流量存在两次明显的突变,分别为 1979 年和 1999 年。因此,整个研究期可分为 3 个阶段:1964—1979 年,基准期;1980—1999 年,变化期 I;2000—2016 年,变化期 II。

表 3 老哈河流域 1964—2016 年降水量、潜在蒸散发量和径流量 MK 趋势分析和 Pettitt 突变检验结果

Table 3 Results of MK trend analyses and Pettitt change-point tests of annual precipitation, potential evapotranspiration (PET), and streamflow for the Laohahe basin for the period 1964—2016

变量 Variables	MK 统计量 MK value	趋势 Trend	Pettitt 突变年份 Pettitt changed-point
降水量 Precipitation	-0.81	↓	—
潜在蒸散发量 Potential evapotranspiration	-0.70	↓	—
径流量 Streamflow	-5.04	↓↓	1979、1999

“↓”表示呈下降趋势,“↓↓”表示通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的 MK 检验,呈显著下降趋势

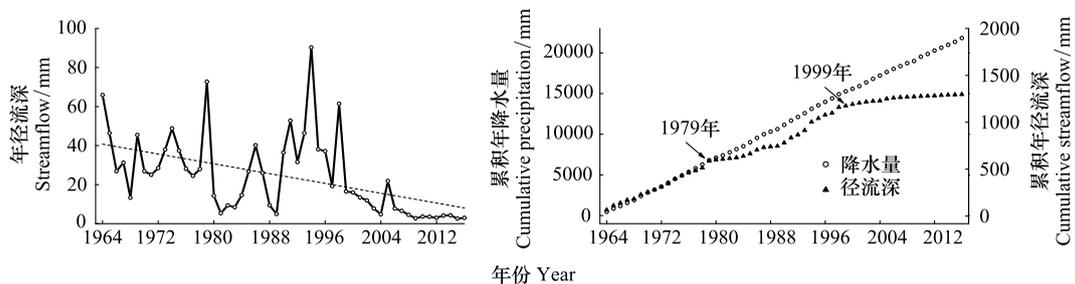


图 2 老哈河年平均径流深变化图和年降水径流双累积曲线

Fig.2 The time series variations of annual streamflow and the double cumulative curves of annual precipitation and streamflow for the Laohahe basin

利用 VIC 模型还原天然径流,首先将基准期(1964—1979 年)划分为模型率定期(1964—1974 年)和验证期(1975—1979 年)。利用基准期确定的模型参数,模拟了流域月平均径流,其与实测月平均径流的对比如图

3. 本文采用相关系数 E_{CC} 、Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NSC} 和相对偏差 E_{BIAS} 三个指标评估模型的模拟精度。在率定期, E_{CC} 、 E_{NSC} 和 E_{BIAS} 分别为 0.91、0.83、1.2%; 在验证期, E_{CC} 、 E_{NSC} 和 E_{BIAS} 分别为 0.90、0.80、1.6%。以上结果表明, 水文模型模拟的径流序列满足精度要求^[29], 可被用来进行水文指标的定量归因分析, 其中变化期内实测径流与模拟径流的差别可认为是由人类活动引起的。

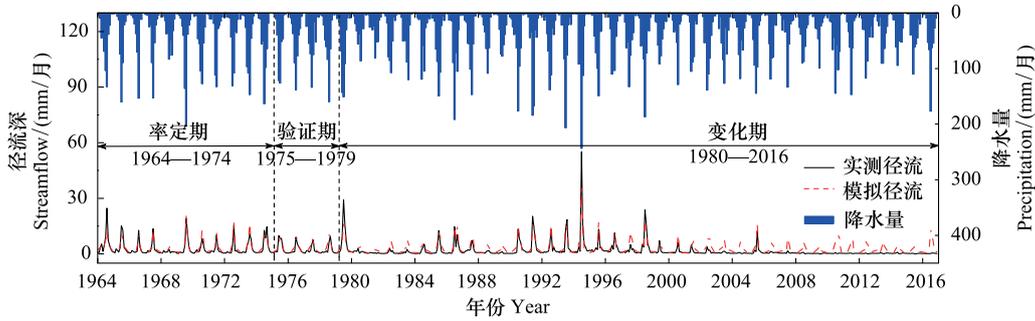


图3 VIC 模型月尺度平均径流模拟结果

Fig.3 The result of VIC-simulated streamflow

VIC: 可变下渗容量 Variable Infiltration Capacity

3.2 生态最相关指标优选及演变特征分析

利用 PCA 方法计算的 33 个水文变量特征值及累计贡献率如图 4 所示。其中, 第 1 主成分(PC1)的特征值为 15.13, 累计贡献率为 46%; 前 7 个主成分的特征值均大于 1, 累计贡献率为 83%。根据 2.2.3 中提出的主成分提取原则, 确定 PC1—PC7 为所需主成分。表 4 给出了上述 7 个主成分的因子载荷矩阵。依据解释变量的确定原则, 最终优选出 7 个生态最相关水文指标, 依次为最大 7 日流量、2 月流量、上升率、低流量年内发生次数、高流量年内平均历时、6 月流量、年最小流量出现时间。

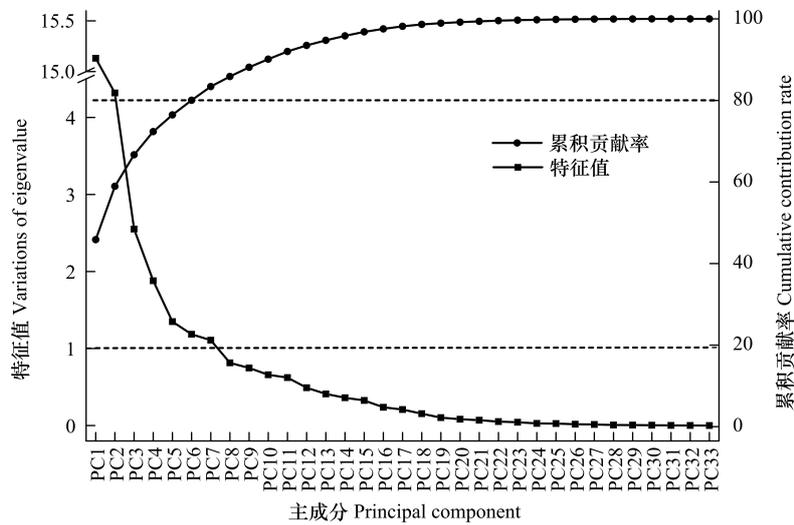


图4 基于主成分分析的特征值和累积贡献率变化

Fig.4 Variations of eigenvalue and cumulative contribution rate explained based on PCA

PCA: 主成分分析 principal component analysis

IHA 变量之间的高度自相关性, 使得信息冗余问题显著, 影响了 IHA 在水资源管理实践中的应用^[13]。如表 4 所示, 主成分的高载荷值在一定程度上出现了聚类现象, 例如, PC1 中, 最大 1、3、7、30、90 日流量均有较高的载荷值。图 5 表明, 同组 IHA 变量的变异度之间差异较小, 例如, 变量 31—33 在变化期 I 和变化期 II 的

变异度均较大,从而影响 IHA 变量的综合变异评估。因此,优选 ERHIs,减少信息冗余性,成为准确评估河流水文特征、构建生态水文联系的关键^[30]。本文选出了 7 个 ERHIs,其中,年最小流量出现时间在多项研究中被选为 ERHIs^[13],而年极端流量的出现时间正是水生生物进入生命循环周期的重要信号^[6]。此外,IHA 的 5 个组别中,均有至少一个变量被选为 ERHIs。因此,可以认为本文基于 PCA 选取的 ERHIs 是合理的,并且有效反映了原始数据集的关键信息。

表 4 前 7 个主成分的载荷值

Table 4 Loadings for the first seven principal components

变量 Variables	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
1 月流量 January	0.17	0.90 *	0.26	0.04	0.06	0.11	-0.07
2 月流量 February	0.18	0.92 **	0.16	0.05	0.07	0.13	-0.05
3 月流量 March	0.13	0.61 *	0.67	0.15	-0.04	0.02	-0.09
4 月流量 April	0.02	0.21	0.83	-0.04	-0.06	0.10	-0.02
5 月流量 May	0.60	0.47	0.24	-0.03	0.05	0.16	0.07
6 月流量 June	0.20	0.28	0.22	0.00	-0.09	0.78 **	0.05
7 月流量 July	0.74	-0.06	0.13	-0.11	0.27	0.29	0.07
8 月流量 August	0.47	0.18	0.60	-0.14	0.31	0.05	0.21
9 月流量 September	0.29	-0.06	0.61	0.04	0.40	0.03	0.24
10 月流量 October	0.40	0.19	0.65	-0.06	0.46	-0.08	0.18
11 月流量 November	0.33	0.28	0.63	-0.08	0.56 *	-0.06	0.15
12 月流量 December	0.46	0.35	0.43	-0.06	0.58 *	0.00	0.15
最小 1 日流量 1-day min	0.20	0.36	0.67	0.19	0.09	0.46	0.22
最小 3 日流量 3-day min	0.20	0.45	0.67	0.20	0.12	0.41	0.15
最小 7 日流量 7-day min	0.24	0.52	0.64	0.21	0.12	0.36	0.13
最小 30 日流量 30-day min	0.32	0.71	0.51	0.18	0.10	0.15	0.07
最小 90 日流量 90-day min	0.25	0.67	0.65	0.11	0.06	0.10	-0.02
最大 1 日流量 1-day max	0.94 *	0.16	0.11	0.03	0.04	-0.06	-0.01
最大 3 日流量 3-day max	0.94 *	0.18	0.09	0.02	0.08	-0.02	0.01
最大 7 日流量 7-day max	0.95 **	0.18	0.13	0.01	0.12	0.02	0.04
最大 30 日流量 30-day max	0.87 *	0.14	0.36	-0.03	0.23	0.07	0.12
最大 90 日流量 90-day max	0.79 *	0.11	0.42	-0.05	0.29	0.22	0.15
零流量天数 Zero-flow days	-0.18	-0.11	-0.21	-0.71	-0.27	-0.18	0.13
基流指数 Base flow	-0.27	0.28	0.04	0.75	-0.12	0.19	0.03
年最小流量出现时间 Date min	-0.15	0.37	-0.10	0.20	-0.11	-0.15	-0.68 **
年最大流量出现时间 Date max	0.05	-0.07	0.22	-0.08	-0.14	-0.56	0.56 *
低流量年内发生次数 Low pulse count	-0.07	-0.10	0.09	0.85 **	-0.11	-0.17	0.04
低流量年内平均历时 Low pulse duration	-0.09	-0.24	-0.04	-0.42 *	-0.05	0.02	-0.60
高流量年内发生次数 High pulse count	0.04	0.17	0.64	0.36 *	-0.02	-0.09	0.22
高流量年内平均历时 High pulse duration	0.28	-0.01	0.00	0.03	0.81 **	0.02	-0.05
上升率 Rise rate	0.16	0.28	0.89 **	0.06	0.15	-0.08	0.04
下降率 Fall rate	-0.35	-0.16	-0.83 *	0.08	-0.18	-0.19	-0.13
流量逆转次数 Reversals	0.16	-0.02	0.77 *	0.24	-0.08	0.01	-0.17

“*”数值表示该主成分中较高的几个载荷值,“**”数值表示该主成分的最高载荷值

图 6 反映了 7 个 ERHIs 的时间变化特征,除年最小流量出现时间呈增长趋势外,其余 6 个 ERHIs 均表现为下降趋势。其中,6 月流量、最大 7 日流量、高流量年内平均历时和上升率下降明显,表明流域高流量脉冲在量级、历时和频率方面均减少;2 月流量下降趋势不显著,年最小流量出现时间略有提前,低流量年内发生次数显著减少,表明流域低流量现象有所改善。这种变化特征可能是因为流域内众多水库“蓄洪补枯”的运行调度模式。此外,在变化期 I,各指标波动特征明显,综合改变度为 0.45;在变化期 II,各指标主要表现为显

著降低,综合改变度为 0.74。如图 5 所示,在两个变化期,相比于模拟数据集,实测数据集 IHA 各变量改变度 D_i 绝对值增加明显。这表明在变化期 II,人类活动对 IHA 变量的影响更显著。

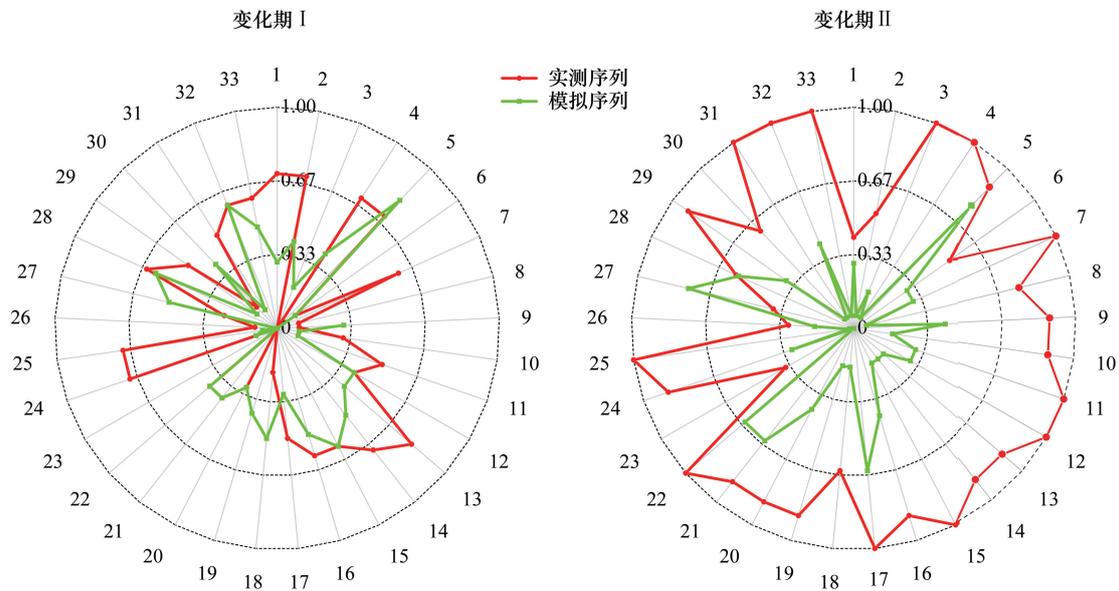


图 5 水文改变指标 (IHA) 33 个指标变异度

Fig.5 Degree of hydrological alteration (D_i) of the 33 variables of IHA

1:1 月流量 January;2:2 月流量 February;3:3 月流量 March;4:4 月流量 April;5:5 月流量 May;6:6 月流量 June;7:7 月流量 July;8:8 月流量 August;9:9 月流量 September;10:10 月流量 October;11:11 月流量 November;12:12 月流量 December;13:最小 1 日流量 1-day min;14:最小 3 日流量 3-day min;15:最小 7 日流量 7-day min;16:最小 30 日流量 30-day min;17:最小 90 日流量 90-day min;18:最大 1 日流量 1-day max;19:最大 3 日流量 3-day max;20:最大 7 日流量 7-day max;21:最大 30 日流量 30-day max;22:最大 90 日流量 90-day max;23:零流量天数 Zero-flow days;24:基流指数 Base flow;25:年最小流量出现时间 Date min;26:年最大流量出现时间 Date max;27:低流量年内发生次数 Low pulse count;28:低流量年内平均历时 Low pulse duration;29:高流量年内发生次数 High pulse count;30:高流量年内平均历时 High pulse duration;31:上升率 Rise rate;32:下降率 Fall rate;33:流量逆转次数 Reversals

3.3 水文变量变异驱动因素定量归因分析

变化环境下,河流水文特征发生了显著的改变。如表 5 和图 2 所示,流域年径流量下降明显,特别是在变化期 II (2000—2016)。相比于变化期 I,尽管变化期 II 内气候因素导致的径流下降有所增加,从 -1.0mm 减少到 -8.6mm ,但人类活动导致的径流下降变化量更大,从 -6.2mm 减少到 -20.9mm 。此外,变化期 II 人类活动对径流下降的贡献率小于变化期 I,主要有两个原因:一是变化期 I 整体径流减少量较小;二是变化期 II 多年平均降水量为 385.4mm ,与基准期 425.2mm 和变化期 I 423.3mm 有较大差距,导致了气候变化贡献率的相对增加。整体而言,人类活动对径流下降的影响更强烈,其全变化期平均贡献率为 74.3% ,远高于气候变化的贡献率 25.7% 。

为进一步分析环境变化对流域水文情势的影响,计算了 7 个 ERHIs 的变化量及气候变化和人类活动的贡献率。如表 6 所示,在变化期 I,气候变化对 2 月流量、年最小流量出现时间、高流量年内平均历时和上升率影响显著,贡献率分别为 -105.2% 、 -536.6% 、 -125.3% 和 -128.6% ,对应的人类活动贡献率分别为 205.2% 、 636.6% 、 225.3% 和 28.6% ;在变化期 II,受气候变化影响显著的有 2 月流量和年最小流量出现时间,其气候变化贡献率分别为 -170.6% 和 -316.6% ,相应的人类活动贡献率为 70.6% 和 416.6% 。其中,由于研究区内气候变化和人类活动对生态最相关水文指标的影响并不总是同向的,从而使得共同影响下的变化量小于单个因子影响下的变化量,造成了贡献率超过 100% ,贡献率的绝对值反映了因子对水文指标的影响程度。两变化期对比,气候变化的贡献率整体降低;全变化期内,人类活动的贡献率整体高于气候变化的贡献率,说明人类活动仍是影响流域水文情势的主要驱动因素。

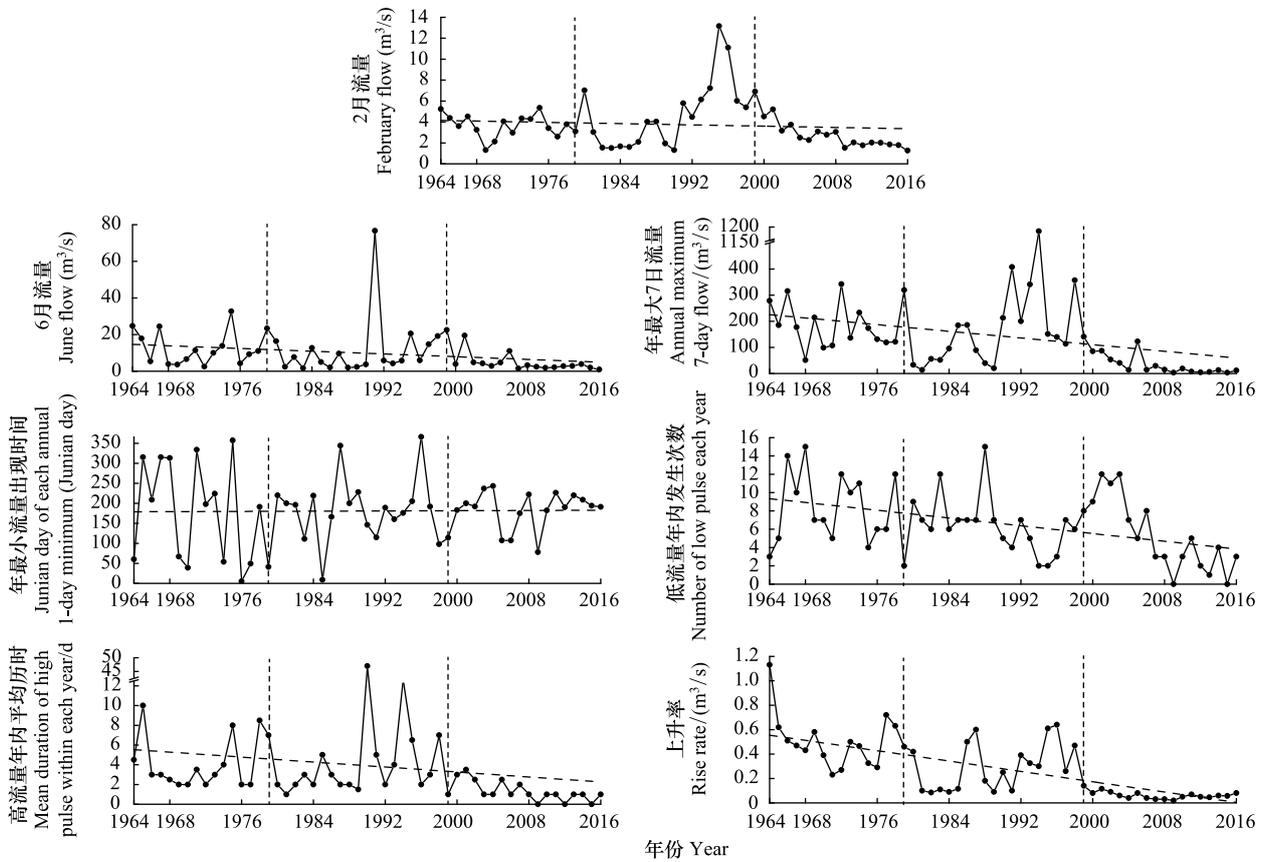


图 6 ERHIs 的时间变化特征(虚线表示线性趋势)

Fig.6 Temporal variations of ERHIs (The dotted lines denoted the trend of each ERHIs)

ERHIs:生态最相关水文指标 The most ecologically relevant hydrological indicators

表 5 气候变化和人类活动对老哈河流域 1980—2016 年径流衰减的贡献率

Table 5 Contribution rate of climate change and human activities to streamflow reduction at the Laohahe basin in the period of 1980—2016

变量 Variables	时期 Periods	年平均 Average		年平均变化量 Variation		贡献率 Contribution rate/%	
		实测 Observed	模拟 Simulated	ΔX_h	ΔX_c	气候变化 Climate change	人类活动 Human activities
年径流量 Streamflow/mm	基准期	36.7	36.8	—	—	—	—
	变化期 I	29.5	35.8	-6.2	-1.0	13.3	86.7
	变化期 II	7.2	28.1	-20.9	-8.6	29.3	70.7
	全变化期	19.21	32.28	12.98	-4.49	25.7	74.3

ΔX_c : 气候变化引起的径流的变化量 The change in streamflow induced by climate change; ΔX_h : 人类活动引起的径流的变化量 The change in streamflow induced by human activities

4 讨论

本文优选出 7 个 ERHIs, 其中, 月平均流量(2 月和 6 月流量) 主要影响水生生物栖息地的可利用性; 最大 7 日流量, 对重塑河道形态和自然栖息地有重要作用; 年最小流量出现时间则反映了生物体生命循环的兼容性以及对生存压力的可预见性; 高流量平均历时主要通过洪泛区影响水生生物的栖息地和水流有机质富集; 上升率对缓解缺水造成的水生生物胁迫有重要意义。该 7 个 ERHIs 与以往研究的结果不完全一致, 顾玉娇等^[31] 在老哈河流域三座店水库所在子流域的研究中选取了 6 月流量、最小 30 日流量和零流量天数三个主要

指标;程俊翔等^[13]在洞庭湖的研究选取了3月流量、6月流量、最小3日流量、最大7日流量、年最小流量出现时间、低流量年内平均历时和流量逆转次数7个指标;Gao等^[7]统计分析了美国189个水文观测点的数据,选取了2月流量、3月流量、6月流量、11月流量、最小30日流量、最大7日流量、高流量年内平均历时和上升率,与本文的结果有较大的相似。此外,Gao等^[7]的研究还表明不同流域、不同数据集分析结果存在一定的差异,但往往包含三个共同的要素:至少一个月均流量统计数据,至少两个极端事件统计数据代表高和低极端,以及至少一个与低流量和高流量频率相关的统计数据。这与本文选取的生态最相关指标有很好的一致性。

表6 生态最相关指标变化量及贡献率

Table 6 The changes of ERHIs and the contribution rate of climate change and human activities in different periods

变量 Variables	变化期 I Changed period I					变化期 II Changed period II				
	ΔX_t	ΔX_c	ΔX_h	$I_c \%$	$I_h \%$	ΔX_t	ΔX_c	ΔX_h	$I_c \%$	$I_h \%$
2月流量 February	1.16	-1.22	2.38	-105.2	205.2	-1.02	-1.74	0.72	-170.6	70.6
6月流量 June	-0.74	-0.33	-0.41	-44.6	-55.4	-8.41	1.58	-9.99	18.8	-118.8
最大7日流量 7-day max	13.12	7.14	5.99	54.4	45.6	-156.64	-55.36	-101.27	-35.3	-64.7
年最小流量出现时间 Date min	9.51	-51.03	60.54	-536.6	636.6	12.46	-39.45	51.91	-316.6	416.6
低流量年内发生次数 Low pulse count	-1.46	0.15	-1.61	10.3	-110.3	-2.89	0.01	-2.90	0.3	-100.3
高流量年内平均历时 High pulse duration	1.66	-2.08	3.74	-125.3	225.3	-2.58	-0.46	-2.12	-17.8	-82.2
上升率 Rise rate	-0.21	-0.27	0.06	-128.6	28.6	-0.44	-0.04	-0.40	-9.1	-90.9

ΔX_t :生态最相关指标的总变化值 the total change in ERHIs; ΔX_c :气候变化引起的生态最相关指标的变化量 the change in ERHIs induced by climate change; ΔX_h :人类活动引起的生态最相关指标的变化量 the change in ERHIs induced by human activities; $\bar{X}_{1,obs}$:基准期实测序列生态最相关指标多年平均值 the observed average annual value of ERHIs for base period; $\bar{X}_{2,obs}$:变化期实测序列生态最相关指标多年平均值 the observed average annual value of ERHIs for changed period; $\bar{X}_{1,sim}$:基准期模拟序列生态最相关指标多年平均值 the simulated average annual value of ERHIs for base period; $\bar{X}_{2,sim}$:变化期模拟序列生态最相关指标多年平均值 the simulated average annual value of ERHIs for changed period; I_c :气候变化对生态最相关指标变化的贡献率 the contribution rate of climate change; I_h :人类活动对生态最相关指标变化的贡献率 the contribution rate of human activities。贡献率的正(负)为表明该因子引起变量的增加(减少)

以往研究表明,人类活动是影响流域河道径流量^[20]、水文干旱^[32]和水文健康^[33]的主要因素,综合贡献率为80%左右,这与本文中人类活动对径流量和水文情势影响特征一致。此外,本文结果表明,人类活动对部分生态最相关水文指标变化的影响更为强烈,远高于气候变化的影响,特别是2000年以后。这主要与流域内社会经济的发展有关。流域内生产活动主要为农业、畜牧业和采矿业,粮食产量相较基准期增加约400万t^[33],灌溉耕地面积增加约31万hm²,且在2000年之后呈现出持续增长的趋势(图7);国内生产总值GDP快速增长,特别是2000年之后,增幅明显。研究指出,流域范围内,人类取用水比例近10年整体呈上升趋势,平均为70%左右^[33]。此外,为满足流域用水需求,三座店水库于2003年开工建设,总蓄水量为3.69亿m³,大规模的农业灌溉显著减少了河道内径流量。

变化环境下,水文指标变化的驱动因素尤为复杂。Yong等^[19]研究表明,老哈河流域1970—1979年和1990—1999年降水量较大,其中1990—1999年年平均降水量为475.4mm,大于1970—1979年的449.4mm;2000年以后,年降水量较小,平均为390.2mm。因此,在变化期I,2月流量、6月流量和最大7日流量变化不大,甚至有小幅增加。2000年之后,区域社会经济高速发展,伴随着降水量的减少,6月流量和最大7日流量显著降低,同时人类活动对以上两个指标的贡献率明显增加。此外,水库“蓄洪补枯”的运行调度模式,增加了2月流量,减少了6月流量、最大7日流量和低流量年内发生次数,改变了年最小流量出现时间。由于社会经济的发展,人类生产、生活取用水增加,也影响了水库下泄的总流量,进而减少了高流量年内平均历时。人类取用水减少了河道内径流量,未严格遵循生态控制指标的水库调度破坏了天然水文情势,造成了流域生态赤字的累积^[34],显著影响了河流生态健康,使得区域水资源开发与利用以及河流生态保护与修护面临挑战。

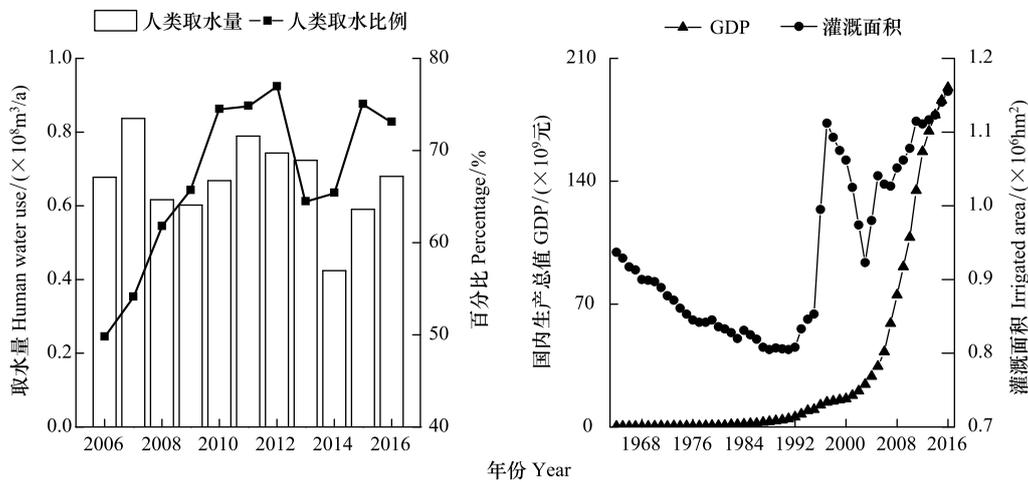


图7 研究区人类取用水和社会经济变化

Fig.7 Changes in human water use data and socioeconomic situation for the study area

5 结论

(1) MK 检验表明,年降水量和潜在蒸散发量呈不显著下降趋势,年径流量下降趋势明显;Pettitt 突变点检测和降雨径流双累积曲线表明,年径流量序列在 1979 和 1999 年出现突变。1980 年和 2000 年均均为经济增长速率明显增大的起始点,表明流域内经济活动显著影响了河道径流。基于 VIC 模型的径流重建,在率定期和验证期,相关系数 E_{CC} 均大于 0.9, Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NSC} 均大于 0.75, 相对偏差 E_{BIAS} 均小于 10%, 模拟精度符合研究要求。

(2) 基于 PCA 方法,确定了 7 个主成分,累积贡献率为 83%,其解释变量分别为 2 月流量、6 月流量、最大 7 日流量、年最小流量出现时间、低流量年内发生次数、高流量年内平均历时和上升率,即为 7 个生态最相关水文指标。在时间尺度上,除年最小流量出现时间外,ERHIs 主要表现为下降趋势。变化期 I 和变化期 II 7 个 ERHIs 综合改变度分别为 0.45 和 0.74,表明水文情势变化呈增长的趋势。

(3) 归因分析表明,人类活动是导致径流量下降和流域水文情势变化的主要因素。其中,全变化期内,人类活动对径流下降的平均贡献率为 74.3%。对于 7 个 ERHIs,变化期 II 比变化期 I 变化显著,人类活动贡献率相对增加,对上述 7 个变量的贡献率依次为 70.6%、-118.8%、-64.7%、416.6%、-100.3%、-82.2% 和 -90.9%,表明人类活动在变化期 II 对水文情势的影响比变化期 I 更为剧烈。

本文假设气候变化和人类活动是独立的,但气候变化和人类活动往往存在一定的关联,如雨量条件会影响人类取用水特征;地区少雨干旱时,会使得人类取水量增大,进一步影响了河道的水文要素。因此,本文计算的气候变化和人类活动对水文情势影响的贡献率可能与实际值存在一定差异。

参考文献 (References):

- [1] Naiman R J, Bilby R E. River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [2] Belletti B, de Leaniz C G, Jones J, Bizzi S, Bürger L, Segura G, Castelletti A, van de Bund W, Aarestrup K, Barry J, Belka K, Berkhuyzen A, Birnie-Gauvin K, Bussetini M, Carolli M, Consuegra S, Dopico E, Feierfeil T, Fernández S, Garrido P F, Garcia-Vazquez E, Garrido S, Giannico G, Gough P, Jepsen N, Jones P E, Kemp P, Kerr J, King J, Łapińska M, Lúzaró G, Lucas M C, Marcello L, Martin P, McGinnity P, O'Hanley J, del Amo R O, Parasiewicz P, Pusch M, Rincon G, Rodriguez C, Royte J, Schneider C T, Tummors J S, Vallesi S, Vowles A, Verspoor E, Wanningen H, Wantzen K M, Wildman L, Zalewski M. More than one million barriers fragment Europe's rivers. Nature, 2020, 588 (7838): 436-441.
- [3] 孙然好, 魏琳沅, 张海萍, 陈利顶. 河流生态系统健康研究现状与展望——基于文献计量研究. 生态学报, 2020, 40(10): 3526-3536.
- [4] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, Braun D. How much water does a river need? Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.

- [5] Ward J V, Tockner K, Schiemer F. Biodiversity of floodplain river ecosystems; ecotones and connectivity. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1999, 15(1/3): 125-139.
- [6] Poff N L, Allan J D, Bain M B, Karr J R, Prestegard K L, Richter B D, Sparks R E, Stromberg J C. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 1997, 47(11): 769-784.
- [7] Gao Y X, Vogel R M, Kroll C N, Poff N L, Olden J D. Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2): 136-147.
- [8] Cui T, Tian F Q, Yang T, Wen J, Khan M Y A. Development of a comprehensive framework for assessing the impacts of climate change and dam construction on flow regimes. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125358.
- [9] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, Braun D P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [10] Yang Y C E, Cai X M, Herricks E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance; a data mining approach for fish community analysis. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W04412.
- [11] Smakhtin V U, Shilpakar R L, Hughes D A. Hydrology-based assessment of environmental flows; an example from Nepal. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, 51(2): 207-222.
- [12] Clausen B, Biggs B J F. Flow variables for ecological studies in temperate streams; groupings based on covariance. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(3/4): 184-197.
- [13] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎. 生态最相关水文指标的优选及其在洞庭湖环境流量估算中的应用. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1235-1245.
- [14] Zhang Y Y, Shao Q X, Zhao T T G. Comprehensive assessment of dam impacts on flow regimes with consideration of interannual variations. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 447-459.
- [15] Gierszewski P J, Habel M, Szymańska J, Luc M. Evaluating effects of dam operation on flow regimes and riverbed adaptation to those changes. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136202.
- [16] Gunawardana S K, Shrestha S, Mohanasundaram S, Salin K R, Piman T. Multiple drivers of hydrological alteration in the transboundary Srepok River Basin of the lower Mekong region. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111524.
- [17] Peñas F J, Barquín J. Assessment of large-scale patterns of hydrological alteration caused by dams. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 706-718.
- [18] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, Zhang P F, Tian P, Gao P, Sun W Y. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133556.
- [19] Yong B, Ren L L, Hong Y, Gourley J J, Chen X, Dong J W, Wang W G, Shen Y, Hardy J. Spatial-temporal changes of water resources in a Typical Semiarid Basin of North China over the Past 50 years and assessment of possible natural and socioeconomic causes. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(4): 1009-1034.
- [20] Jiang S H, Ren L L, Yong B, Singh V P, Yang X L, Yuan F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods. *Hydrological Processes*, 2011, 25(16): 2492-2505.
- [21] Luo L F, Wood E F. Monitoring and predicting the 2007 U.S. drought. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(22): L22702.
- [22] Wang M H, Jiang S H, Ren L L, Xu C Y, Yuan F, Liu Y, Yang X L. An approach for identification and quantification of hydrological drought termination characteristics of natural and human-influenced series. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125384.
- [23] Shrestha R R, Peters D L, Schnorbus M A. Evaluating the ability of a hydrologic model to replicate hydro-ecologically relevant indicators. *Hydrological Processes*, 2014, 28(14): 4294-4310.
- [24] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society Series C-Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [26] The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual. The Nature Conservancy, 2009.
- [27] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征. *环境科学*, 2017, 38(4): 1366-1375.
- [28] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 鲍振鑫, 刘艳丽, 贺瑞敏, 金君良, 刘翠善, 陈鑫. 中国主要江河径流变化成因定量分析. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323.
- [29] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [30] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 王月, 刘剑宇. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(19): 6079-6090.
- [31] 顾玉娇, 杨肖丽, 任立良, 李文婷, 高甜. 基于 RVA 法和 PCA 法评估三座店水库对下游径流的影响. *中国农村水利水电*, 2020, (8): 177-181, 187-187.
- [32] Jiang S H, Wang M H, Ren L L, Xu C Y, Yuan F, Liu Y, Lu Y J, Shen H R. A framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on hydrological drought in a Semiarid Basin of northern China. *Hydrological Processes*, 2019, 33(7): 1075-1088.
- [33] Jiang S H, Zhou L, Ren L L, Wang M H, Xu C Y, Yuan F, Liu Y, Yang X L, Ding Y. Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126566.
- [34] 唐世南, 丁跃元, 于丽丽, 张越, 陈飞, 关雪, 马圣琦, 王奇. 内蒙古西辽河流域量水而行以水定需治理思路. *水利规划与设计*, 2019, (11): 28-31.