DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0015 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

基于生态最相关水文指标的汉江中游水文情势变化研究

彭涛[1,2],潘奕帆[1],赖雯[1],由星莹[3],刘伯娟[4],董晓华[1,2]

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002; 3. 湖北省水利厅水旱灾害防御中心,湖北 武汉 430060; 4. 湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司,湖北 武汉 430070)

摘要: 基于黄家港站和皇庄站的逐日径流数据,运用水文改变指标(IHA)和变化范围法(RVA)评估汉江中游各个水文指标的改变度,采用主成分分析(PCA)筛选了7个IHA指标作为生态最相关水文指标(ERHIs)。结果表明:1)黄家港和皇庄站的整体水文改变度均为中度,其中1974-2014年分别为47.41%和52.74%,2015-2023年分别增加到54.86%和63.19%;2)IHA指标之间具有显著的相关性,信息冗余问题突出,有必要降维优化;3)与传统的RVA相比,黄家港和皇庄站ERHIs的整体水文改变度变幅更大,能更好地反映水利工程影响下水文情势的变化特征;4)ERHIs具有良好的适用性,不仅有效降低IHA参数的冗余性问题,还能保留关键的生态水文指标,简化水文情势变化评估流程,可为流域生态修复与可持续发展提供科学依据。

关键词: 水文改变指标;水文情势;主成分分析;生态最相关水文指标;汉江中游

中图分类号: TV 123 **文献标志码:** A

Study on hydrological regime change in the middle reaches of the Hanjiang River based on the most ecologically relevant hydrological indicators

PENG Tao[1,2], PAN Yifan[1], LAI Wen[1], YOU Xingying[3], LIU Bojuan[4], DONG Xiaohua[1,2]

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2. Engineering Education Center of the Ministry of Education for Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Yichang, Hubei 443002, China;
3. Flood and Drought Prevention Center of Hubei Provincial Department of Water Resources, Wuhan 430000, China;
4. Hubei Provincial Water Resources Surveying and Design Co., LTD, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the daily runoff data from Huangjiagang and Huangzhuang stations, the degree of alteration of various hydrological indicators in the middle reaches of the Hanjiang River was evaluated using the indicators of hydrological alteration (IHA) and the range of variability approach (RVA). Principal component analysis (PCA) was applied to select seven IHA indicators as the most ecologically relevant hydrologic indicators (ERHIs). The results show that: 1) The overall hydrological alteration at both Huangjiagang and Huangzhuang

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 彭涛(1973-),男,副教授,硕士生导师,主要从事水文水资源及生态水文研究,E-mail: pengtao306@163.com。

通信作者: 赖雯(2000-),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究,E-mail: 2609443538@qq.com。

基金项目: 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202109。

本文引用格式: 彭涛,潘奕帆,赖雯,等.基于生态最相关水文指标的汉江中游水文情势变化研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: PENG Tao, PAN Yifan, LAI Wen, et al. Study on hydrological regime change in the middle reaches of the Hanjiang River based on the most ecologically relevant hydrological indicators[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX): 1-12.

stations is moderate, with alteration degrees of 47.41% and 52.74%, respectively, during 1974 - 2014, which increased to 54.86% and 63.19% during 2015 - 2023; 2) There is significant correlation among the IHA indicators, highlighting prominent information redundancy and the necessity of dimension reduction and optimization; 3) Compared with the traditional RVA, the overall hydrological alteration degrees of the ERHIs at Huangjiagang and Huangzhuang stations show greater variation, which better reflects the changing characteristics of the hydrological regime under the influence of water conservancy projects; 4) The ERHIs demonstrate good applicability, effectively reducing the redundancy issue of IHA parameters while retaining key eco-hydrological indicators, simplifying the assessment process of hydrological regime changes, and providing a scientific basis for watershed ecological restoration and sustainable development.

Key words: indicators of hydrological alteration; hydrological regime; principal component analysis; the most ecologically relevant hydrological indicators; the middle reaches of the Hanjiang River

河流作为地球生命的重要组成部分,除了为人类提供基本的生活和农业用水外,还在航运、灌溉、发电、旅游等方面发挥着重要作用[1]。然而,大规模的水库建设、调水工程以及水资源的过度开发导致水文情势发生显著变化,进一步造成河流生态功能受损、生物多样性减少、水质恶化等问题[2-5]。因此,评估水利工程影响下河流水文情势变化,对于区域水资源可持续利用和河流生态系统修复具有重要意义。

河流水文情势变化研究一直是国内外学者关注的热点领域。RICHTER等[6,7]提出了包含32个水文参数的水文改变指标(Indicators of Hydrological Alteration, IHA)体系及其变化范围法(Range of Variability Approach, RVA),旨在通过比较历史流量数据的变化范围与影响后的流量数据,已被广泛应用于评估大坝建设和水资源开发对水文情势的影响。POFF等[8]通过分析美国186条中型河流的水文情势,发现20世纪大坝建设使得坝下径流过程均匀化。MAHESH等[9]使用IHA指标评估了气候变化和水库运行对美国San Joaquin流域的水文改变度。IHA-RVA法在国内也得到了广泛的应用。顾西辉等[10]基于多水文改变指标评价了东江流域河流流态变化的影响。戴明龙等[11]基于传统的RVA法提出了改进的水文改变度评估方法,分析了梯级水库运行对长江宜昌-大通段水文情势的改变程度。但是,传统IHA方法所含32个水文变量之间存在显著的自相关性与信息冗余问题,可能增加分析复杂度且掩盖关键的水文变化特征。为此,近年来一些学者采用主成分分析法(Principal component analysis, PCA)筛选构建生态最相关水文指标(The most ecologically relevant hydrological indicators, ERHIs),以有效减少信息重叠、突出核心生态水文特征,实现更精准的水文改变度评估[12-14]。因此,遴选表征水文情势的关键生态水文指标,识别其变化特征及驱动因子,对河流生态系统保护具有重要意义。

汉江流域已建成大中小型水库2900余座,总库容超过500亿m^3。由于流域梯级水库建设和南水北调中线工程运行以及河道外取用水量快速增加,导致汉江中下游水文情势发生显著变化[15-17]。本文利用汉江中游黄家港站和皇庄站逐日径流数据,采用IHA-RVA法量化评估水库运行对汉江中游水文情势的影响,并通过PCA法剔除IHA指标的冗余信息,遴选关键水文参数,以提升分析的准确性及生态相关性,为流域水资源可持续利用与生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江是长江最长的支流,流域面积15.9万km^2。汉江流域属于亚热带季风气候,降水季节性特征显著。年降水量为800-1000mm,主要集中在夏秋季,洪水发生迅猛且峰值较高。多年平均径流量为544亿m^3。丹江口水库是汉江流域的关键控制性工程,自1973年建成后经2014年加高,总库容达290.5亿m^3,具有防洪、供水、发电等综合效益。汉江流域作为南水北调中线工程的水源区,南水北调中线一期工程于2014年12月开始通水,年调水量约95亿m^3。随着丹江口水库运行和跨流域调水工程的实施,汉江中下游天然水文节律发生明显变化。研究区水系和水文站分布见图1。

1.2 数据来源

本研究所用的1954-2023年黄家港站和1961-2023年皇庄站的逐日径流资料来自长江水利委员会水文局。为了全面评估丹江口水库运行和南水

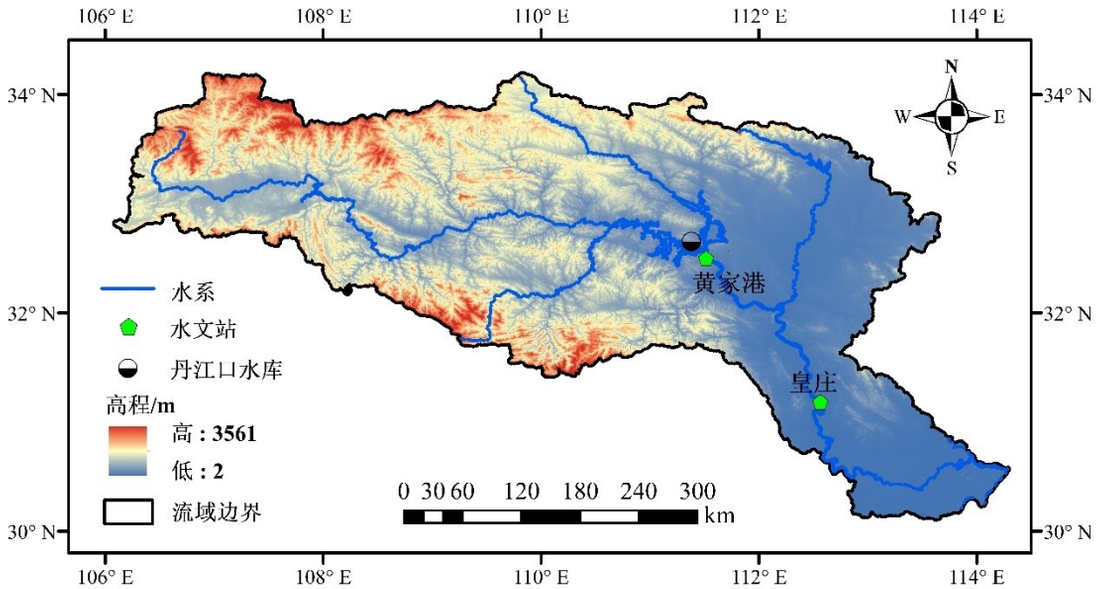


图1 研究区水系和水文站分布

Fig. 1 Distribution of water systems and hydrological stations in the study area

北调中线工程对汉江中游水文情势的影响,本文将研究时期划分为三个时段:1973年以前(丹江口水库建成前)、1974-2014年和2015-2023年(南水北调中线一期工程运行后)。

1.3 研究方法

1.3.1 水文改变指标

水文改变指标(IHA)指标体系最初包含32个水文参数,后经RVA法扩展为33个指标,形成IHA-RVA综合评估方法[6,7]。IHA包括月平均流量、年极端流量、年极端流量出现时间、高低流量脉冲频率及历时、流量变化率及频率五大类指标(表1),能全面刻画水文情势变化特征。

1.3.2 变化范围法

针对IHA方法在整体状态评估方面的局限,Richter等[7]于1997年提出了变化范围法(RVA)。该方法通过建立水文指标变异阈值体系,增设补充性评估参数,将离散的水文指标分析提升为综合状态评估。该方法设定25%分位数和75%分位数作为RVA目标阈值的上下限,建立单指标与整体水文改变度的双层评价模型。对于单个IHA指标,其改变度D_i计算公式为

$$D_i=\frac{N_i-N_e}{N_e}\times 100\% \tag{1}$$

$$N_e=P\times N_T \tag{2}$$

式中:N_i表示受影响后第i个指标落入RVA目标阈值的实际年数;N_e为理论期望年数,其中P=50%表征自然状态下指标落入阈值范围的基准概率;N_T为受干扰后径流序列总年数。根据D_i值划分改变等级:$|D_i|<33\%$为低度改变(L);$33\%\leqslant|D_i|<67\%$为中度改变(M);$|D_i|\geqslant 67\%$为高度改变(H)。

为综合评价河流整体水文情势变化,SHIAU等[18]提出整体水文改变度D_o,采用加权平均法整合33个IHA指标,其计算公式为

$$D_0=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_i^2} \tag{3}$$

式中,n=33为有效指标数(本研究中因无断流现象剔除零流量天数指标);D_0沿用与D_i相同的分级标准。

1.3.3 主成分分析

主成分分析法(PCA)是一种通过正交变换将

表1 IHA指标分类

Table 1 Classification of IHA indicators

组别	指标分组	指标参数
1	各月月平均流量	1—12月平均流量(A_1~A_{12})
2	年极端流量	年最小1、3、7、30、90d极端流量(B_1~B_5)、年最大1、3、7、30、90d极端流量(B_6~B_{10})、基流指数(B_{11})
3	年极端流量出现时间	年最小和最大1d极端流量发生时间(C_1~C_2)
4	高、低流量脉冲频率及历时	低流量脉冲次数及历时(D_1~D_2)、高流量脉冲次数及历时(D_3~D_4)
5	流量变化率及频率	流量上涨率、下降率及逆转次数(E_1~E_3)

高维相关变量转化为低维不相关变量的多元统计技术,其核心目标是在保留数据集关键信息的前提下实现数据降维[19,20]。在应用过程中需对原始数据进行标准化处理,即对各指标值进行均值中心化,以消除量纲差异对分析结果的影响。主成分提取通常遵循Kaiser-Guttman准则,选择特征值大于1且累积方差贡献率超过80%的主成分,以此平衡信息保留与维度压缩的需求[21]。水文情势分析中,PCA法常对33个水文指标构成的五维数据集进行分析,筛选各主成分载荷绝对值最高的指标,以消除IHA指标冗余、遴选出关键生态水文指标[22,23]。

2 结果与分析

2.1 水文指标改变度分析

运用IHA -RVA生态水文指标法分析了丹江口水库建设和南水北调中线工程运行对汉江中游水文情势变化的影响。图2为黄家港和皇庄站的IHA指标改变度分布占比情况。结果显示,1974-2014年黄家港站低度、中度和高度改变的指标占比分别为31%、47%和22%,以中度改变为主;皇庄站则分别为28%、44%和28%,三类等级分布相对均衡,其中高度改变比例略高于黄家港站。2015-2023年黄家港站高度改变指标占比上升至38%,低度和中度改变占比分别下降到22%和41%,水文变化干扰程度整体增强。皇庄站变化更为显著,高度改变比例大幅提升至53%,低度和中度改变指标分别下降至19%和28%,其水文节律受干扰程度显著高于黄家港站,这可能与汉江中游众多梯级水利枢纽运行以及人类河道外取用水量快速增加等因素有关。柏慕琛等[17]采用RVA法定量评估了丹江口水库建成运行后汉江中下游水文情势的时空变化特征,结果显示皇庄站高改变度的水文指标占比高于其上游的黄家港站。

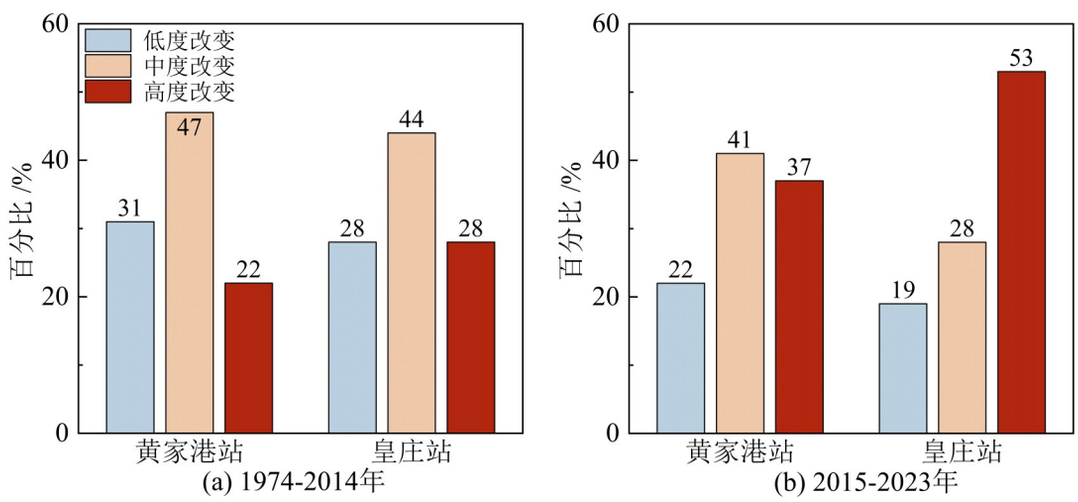


图2 黄家港和皇庄站不同改变度等级IHA指标占比

Fig. 2 Proportion of IHA indicators with different change grades at Huangjiagang and Huangzhuang stations

图3为黄家港和皇庄站五组水文指标的改变度和整体改变度。结果表明,1974-2014年和2015-2023年黄家港站受干扰最显著的IHA指标组别均为第五组(流量变化率及频率),改变度分别达88.92%与93.18%,均为高度改变;而第三组(年极值出现时间)受影响最小。1974-2014年和2015-2023年皇庄站改变度最大的组别分别为第五组和第二组(年极端流量),改变度分别为80.49%和90.08%,也属高度改变,最小均为第三组。从整体改变度来看,黄家港站的整体改变度由1974-2014年的47.41%上升至2015-2023年的54.86%,而皇庄站由52.74%增加到63.19%,两个站点的整体改变度进一步增强,这说明丹江口水库运行、南水北调中线工程以及其它人类活动对汉江中游水文情势的影响持续增加。总的来说,汉江中游水文情势发生明显变化,主要表现为月平均流量过程趋于均化,洪枯差异减小;极端流量事件加剧,年极流量出现时间间隔缩短;高、低流量脉冲频率增加且历时缩短;流量涨落率减缓、逆转次数增多,这些变化可能会影响河流生境稳定,干扰生物生活节律,对河流生境维持与鱼类产卵繁殖等造成了不利影响。

2.2 IHA的冗余性分析

对黄家港和皇庄站32个水文指标(去除零流量天数)标准化数据进行主成分分析,计算得到黄家

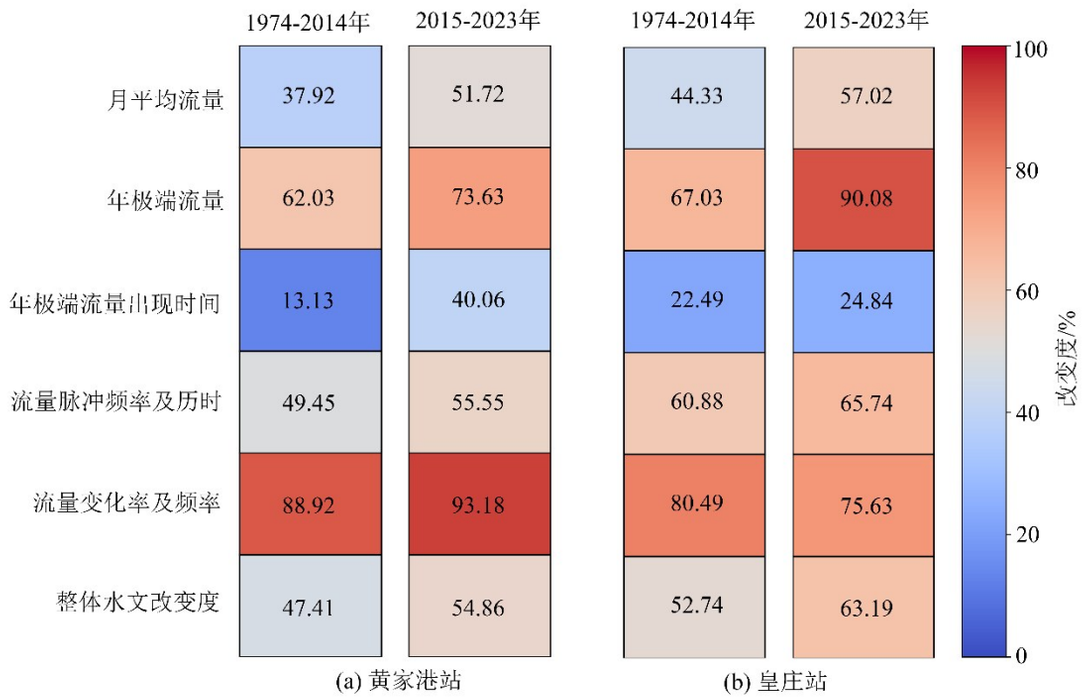


图3 黄家港和皇庄站IHA指标改变度

Fig.3 Change degree of IHA indicators at Huangjiagang and Huangzhuang stations

港和皇庄站的抽样适合性检验指标(KMO),结果显示KMO均大于0.5,且Bartlett球形检验小于0.05,说明适合进行主成分分析。黄家港和皇庄站IHA指标相关性分析的热力图见4。结果表明,大部分水文指标之间具有显著相关性,存在较多冗余信息,有必要进行主成分分析。

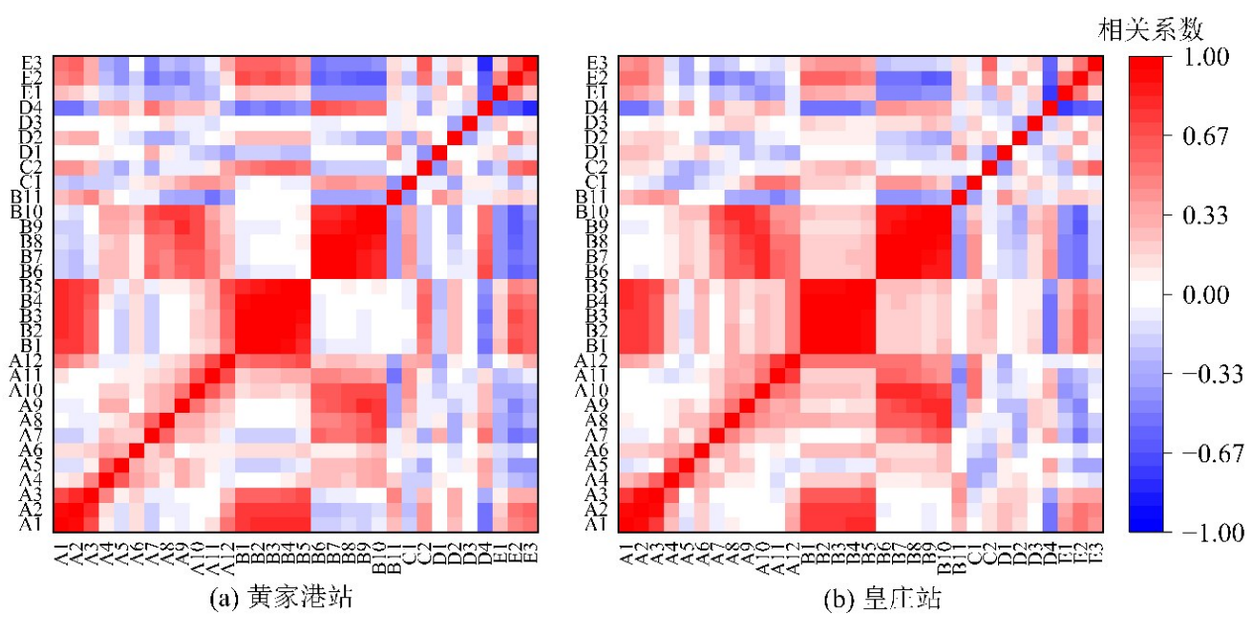


图4 黄家港和皇庄站IHA指标之间的相关关系

Fig. 4 Correlations between the IHA indicators at Huangjiagang and Huangzhuang stations

2.3 生态最相关指标优选

利用PCA方法计算得到黄家港和皇庄站的32项IHA指标的特征值及累积贡献率,如图5所示。结果显示,两个水文站前7个主成分的特征值均大于1,累积贡献率分别为81.45%和82.76%,均超过80%的阈值,表明这7个主成分能够充分反映原始指标信息。由此,IHA指标从32个降至7个,显著提升了水文情势分析的效率。因此,根据主成分选

择准则,选定 PC1～PC7为分析所用到的主成分。

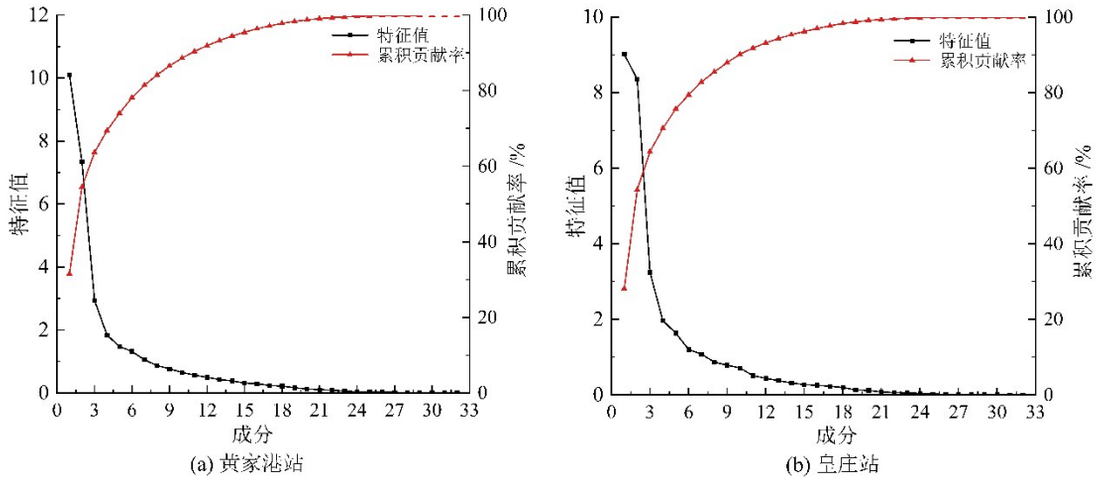


图5 基于主成分分析的特征值与累积贡献率变化

Fig. 5 Changes of eigenvalues and cumulative contribution rates based on principal component analysis

表2为黄家港和皇庄站因子荷载结果。结果表明,黄家港站PC1与最小1d、3d、7d、30d、90d流量密切相关,因子荷载均达到0.9以上,其中因子荷载最大的为最小7d流量,达到了0.956。PC2与最大1d、3d、7d、30d流量密切相关,因子荷载最大的为最大7d流量,达到0.956,反映了高流量的变异特征。PC3与最小1d流量发生时间、11月平均流量和12月平均流量密切相关,因子荷载最大的是最小1d流量发生时间,主要反映了流量的时序偏移性。PC4与4月平均流量和5月平均流量密切相关,5月平均流量荷载达到了0.831,主要反映春季末期的流量变化。PC5与高流量脉冲次数及历时相关,反映了高流量脉冲的特性,其中最大得分因子为高流量脉冲历时。PC6主要与低流量脉冲次数及历时和日平均流量下降率密切相关,反映了低流量脉冲的特性,最主要的因子是低流量脉冲次数。PC7主要与6月平均流量密切相关。因此,最终提取最小7d流量、最大7d流量、最小1d流量发生时间、5月平均流量、高流量脉冲历时、低流量脉冲次数和6月平均流量作为黄家港站的ERHIs。

类似地,皇庄站PC1与最大1d、3d、7d、30d和90d流量密切相关,反映了年极端高流量的变化,其中因子荷载最大的为最大7d流量。PC2与最小1d、3d、7d、30d和90d流量密切相关,反映年极端低流量的变化,其中最小7d流量荷载最大。PC3与4月、5月平均流量相关性最高,5月平均流量荷载达到了0.868。PC4与最小1d流量发生时间密切相关,反映流量的时序偏移性。PC5、PC6、PC7分别与低流量脉冲次数、高流量脉冲次数和高流量脉冲历时密切相关。综合可得皇庄站ERHIs,依次为最大7d流量、最小7d流量、5月平均流量、最小1d流量发生时间、低流量脉冲次数、高流量脉冲次数和高流量脉冲历时。

2.4 ERHIs的合理性分析

基于PCA方法筛选出7个ERHIs,其相关性分析结果如图6所示。结果显示,两个站点筛选后的指标间冗余性均显著降低,绝大部分相关系数绝对值小于0.3,黄家港和皇庄站平均相关系数绝对值分别为0.19和0.18,远低于原始32个指标的水平。具体而言,黄家港站仅最小7d流量与低流量脉冲次数呈中度正相关(0.574);皇庄站仅有少数指标间的相关系数绝对值大于0.3,如最大7d流量与最小1d流量发生时间呈现负相关(-0.393),低流量脉冲次数与5月平均流量负相关(-0.329);高流量脉冲次数与历时负相关(-0.307),其余指标间相关性较弱。因此,7个ERHIs在保留极端流量、季节特征及脉冲动态等水文情势变化关键信息的同时,显著提升了评价指标体系的独立性与解释效率,能够为水文情势改变分析提供科学简化的评价依据。

2.5 基于ERHIs的水文情势改变度

基于7个ERHIs评估黄家港和皇庄站水文情势改变度,见表3。对比传统RVA法,黄家港站水文改变度仅相差1.64%和5.56%;皇庄站略高一些,但仍只相差5.09%和7.96%,这说明遴选的ERHIs有效保留了传统IHA指标中的信息,并剔除了冗余信息,且具有较强的可靠性。因此,采用优选指标

表2 黄家港和皇庄站前7个主成分的因子荷载

Table 2 Factor load of first seven principal components at Huangjiagang and Huangzhuang stations

站点	黄家港站							皇庄站						
IHA指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
A1	**0.898**	−0.104	−0.077	0.059	0.031	0.079	0.023	−0.044	0.878	0.006	0.231	−0.031	−0.048	0.036
A2	**0.881**	−0.131	−0.217	0.076	0.055	0.071	−0.01	−0.063	0.871	0.12	0.339	0.057	−0.066	0.035
A3	0.745	0.008	−0.345	0.349	0.06	0.066	−0.025	−0.031	0.768	0.292	0.414	0.045	−0.079	0.011
A4	0.134	0.268	−0.243	**0.825**	0.033	0.034	0.084	0.108	0.253	**0.819**	0.281	−0.106	−0.08	−0.016
A5	−0.169	0.205	0.014	**0.831***	−0.052	−0.032	0.117	0.15	−0.12	**0.868***	−0.093	−0.212	0.125	−0.06
A6	0.152	0.007	0.148	0.40	−0.065	0.045	**0.769***	0.077	0.272	0.319	−0.011	−0.195	0.619	−0.261
A7	−0.158	0.639	−0.2	−0.023	−0.037	0.135	0.493	0.531	−0.073	0.073	0.312	0.001	0.536	−0.083
A8	0.015	0.60	−0.009	−0.129	−0.243	−0.079	0.531	0.651	0.143	0.104	−0.142	−0.049	0.424	0.119
A9	0.032	0.718	0.183	0.254	−0.187	−0.081	−0.248	0.74	0.014	0.141	−0.168	0.089	0.048	0.295
A10	0.149	0.675	0.444	0.141	0.096	0.016	−0.118	0.808	0.128	−0.147	−0.083	−0.092	−0.148	−0.093
A11	0.203	0.381	**0.723**	0.022	0.25	−0.041	0.075	0.575	0.162	−0.252	−0.404	−0.227	−0.071	−0.29
A12	0.609	0.174	**0.614**	−0.039	0.047	−0.054	−0.044	0.499	0.506	−0.16	−0.399	−0.089	−0.191	−0.138
B1	**0.92**	−0.048	0.085	−0.071	−0.008	−0.02	0.002	0.138	**0.951**	−0.03	−0.079	0.042	0.047	0.068
B2	**0.952**	−0.008	0.113	−0.088	0.02	−0.06	0.018	0.135	**0.956**	−0.037	−0.087	0.069	0.046	0.055
B3	**0.956***	−0.02	0.121	−0.086	0.033	−0.078	0.031	0.123	**0.961***	−0.042	−0.11	0.081	0.037	0.027
B4	**0.954**	−0.01	0.125	−0.028	0.035	−0.109	0.022	0.139	**0.96**	−0.01	−0.116	0.087	0.042	−0.006
B5	**0.929**	0.074	0.117	0.097	0.036	−0.091	0.02	0.169	**0.937**	0.072	−0.045	0.056	0.044	−0.04
B6	−0.112	**0.909**	0.176	0.063	0.134	0.04	0.05	**0.936**	0.07	0.031	−0.142	−0.075	0.017	−0.067
B7	−0.067	**0.921**	0.191	0.061	0.109	0.023	0.001	**0.947**	0.081	0.022	−0.132	−0.056	0.012	−0.049
B8	−0.031	**0.956***	0.163	0.034	0.009	−0.019	−0.012	**0.964***	0.071	0.037	−0.085	−0.009	0.035	0.033
B9	−0.05	**0.941**	0.134	0.132	−0.11	−0.026	0.072	**0.951**	−0.012	0.07	−0.03	0.035	0.146	0.128
B10	−0.013	**0.916**	0.092	0.141	−0.143	−0.048	0.227	**0.916**	0.077	0.097	−0.004	0.03	0.297	0.116
B11	0.595	−0.567	−0.058	−0.271	0.153	−0.037	−0.196	−0.608	0.62	−0.19	−0.075	0.203	−0.229	0.02
C1	0.137	−0.229	**−0.751***	0.125	0.178	0.195	−0.085	−0.345	0.106	0.167	**0.773***	0	−0.062	−0.063
C2	−0.103	0.349	0.545	−0.246	−0.214	0.156	0.015	0.44	0.108	−0.495	−0.239	−0.25	−0.408	0.011
D1	0.527	−0.163	−0.016	−0.278	0.057	**−0.686***	−0.069	−0.05	0.2	−0.172	−0.096	**0.883***	−0.112	−0.106
D2	−0.13	0.094	−0.465	−0.125	0.099	**0.664**	0.221	−0.166	0.103	−0.078	0.626	−0.526	0.15	−0.037
D3	0.277	−0.184	−0.158	0.049	**0.713**	−0.048	−0.243	−0.216	0.142	0.183	0.063	0.112	**−0.680***	−0.388
D4	0.049	−0.054	−0.042	0.056	**−0.806***	0.031	−0.035	0.198	0.073	−0.025	−0.016	0.027	−0.006	**0.780***
E1	−0.547	0.58	−0.11	0.189	0.28	−0.139	0.241	0.456	−0.598	0.247	0.024	−0.017	−0.127	−0.462
E2	0.234	−0.426	0.054	−0.078	−0.254	**0.66**	−0.234	−0.552	0.399	−0.056	−0.026	−0.347	0.097	0.505
E3	0.588	−0.466	−0.017	−0.351	−0.136	−0.199	−0.057	−0.209	0.436	−0.212	0.096	0.631	−0.006	0.188

*表示主成分中的最高因子荷载值,粗体表示荷载值较高的因子群

评估河流水文情势变化,可以简化传统IHA方法的评价体系,提升水资源管理效率,为河流生态保护及水资源配置提供参考。

图7和图8为基于ERHIs的黄家港和皇庄站的时间变化特征。结果表明,丹江口水库和南水北调中线工程的运行显著改变了两个站点的天然水文节律。就黄家港站而言,1954-1973年最小7d流量、5月、6月平均流量、高流量脉冲历时等指标多数年份处于RVA阈值区间内,而最大7d流量则波动剧烈常超上限。1974-2014年低流量指标(如最小7d流量)显著升高并大多超过RVA上限,而高流量指标(如最大7d流量、5月流量)则大多低于RVA下限,同时低流量脉冲次数显著增加,最小1d流量出现时间波动仍大。2015-2023年多数流量指标值趋于稳定,但整体呈现偏离自然区间的态势,具体表现为最小7d流量保持于阈值之上,但较前期高值回落,最大7d流量稳定在阈值之下,高流量脉冲历时增加并多超上限,而低流量脉冲次数进一步加剧。

类似地,皇庄站的水文情势也发生了明显变化,但与黄家港站略有不同。1961-1973年各水文指标(如最大/最小7d流量、5月平均流量及脉冲事件)多集中于RVA阈值附近,呈现自然波动状态。

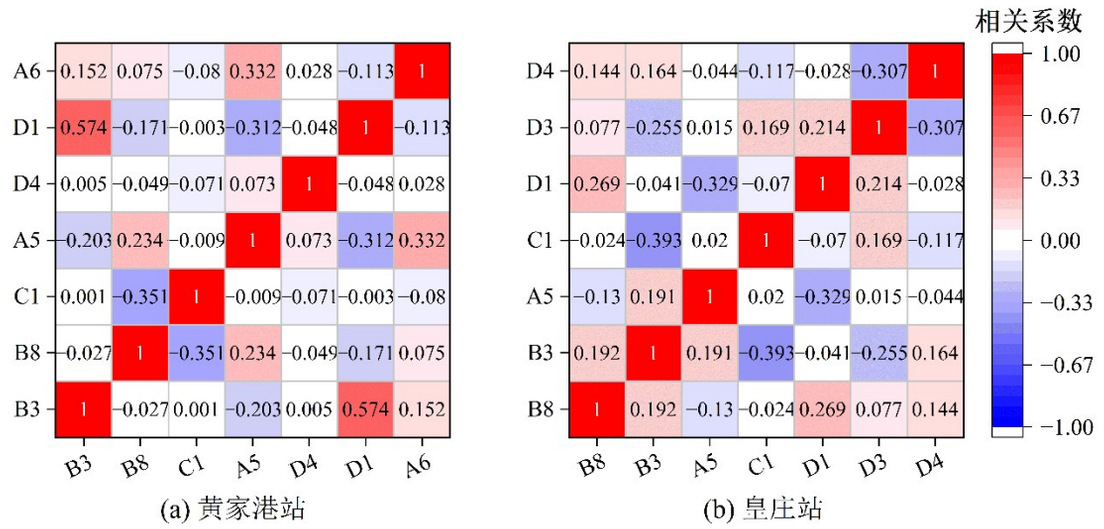


图6 黄家港和皇庄站7个ERHIs之间的相关关系

Fig. 6 Correlations among the seven ERHIs at Huangjiagang and Huangzhuang stations

表3 基于7个ERHIs的黄家港和皇庄站水文情势改变度

Table 3 Degree of hydrological regime change at Huangjiagang and Huangzhuang stations based on 7 ERHIs

黄家港站			皇庄站		
指标编号	1974－2014年	2015－2023年	指标编号	1974－2014年	2015－2023年
B3	－75.61	－100	B8	－60.98	－100
B8	－56.1	－33.33	B3	－70.73	－100
C1	－17.07	－55.56	A5	7.32	－11.11
A5	－2.44	－11.11	C1	－17.07	－33.33
D4	－60.98	－100	D1	－46.34	－55.56
D1	－51.22	－33.33	D3	－95.12	－100
A6	36.59	11.11	D4	－56.1	－33.33
整体改变度	49.05	60.42	整体改变度	57.83	71.15

1974-2014年水文过程系统性偏离自然区间,主要表现为最大7d流量呈现偏低态势(66%年份低于下限),最小7d流量则转为显著偏高(71%年份高于上限),5月平均流量显著偏低,最小1d出现时间则明显延后,同时低流量脉冲次数激增而高流量脉冲频率减少。2015-2023年ERHIs的偏离态势进一步增强,如最小7d流量全部高于上限,低流量脉冲事件更加频繁。

3 结论

本文以汉江中游黄家港和皇庄站为研究对象,运用IHA-RVA法分析了汉江中游水文情势改变度,利用PCA方法识别了生态最相关水文指标(ERHIs)。主要结论如下:

1)汉江中游水文节律发生了显著变化,丰水期削峰、枯水期增流,整体季节波动减弱,极端流量指标变化显著,反映出水利工程运行对水文过程的重塑作用,两个站点的整体水文改变度均为中度。

2)相关分析表明大部分水文指标之间具有显著相关性,IHA指标间高度冗余。利用PCA筛选出7个主成分,累积贡献率均超过80%,由此确定了黄家港和皇庄站的ERHIs。

3)ERHIs能有效减少IHA参数的信息重叠问题,并完整保留关键的生态水文特征,提升水文情势评估效率。基于ERHIs的整体改变度与RVA法评估结果总体一致,验证了该方法的科学性与可行性。

本研究基于PCA优选了汉江中游两个站点的ERHIs,使得水文情势评估更加高效,但是PCA作为一种线性变换的数据驱动方法,并未将河流生态系统作为一个复杂、非线性、多功能整合的整体来考虑,甚至可能遗漏对生态系统完整性至关重要但统计不显著的特征。因此,在实践中还应结合专家咨询法、生态-水文响应模型等,进一步交叉验证和补充ERHIs。

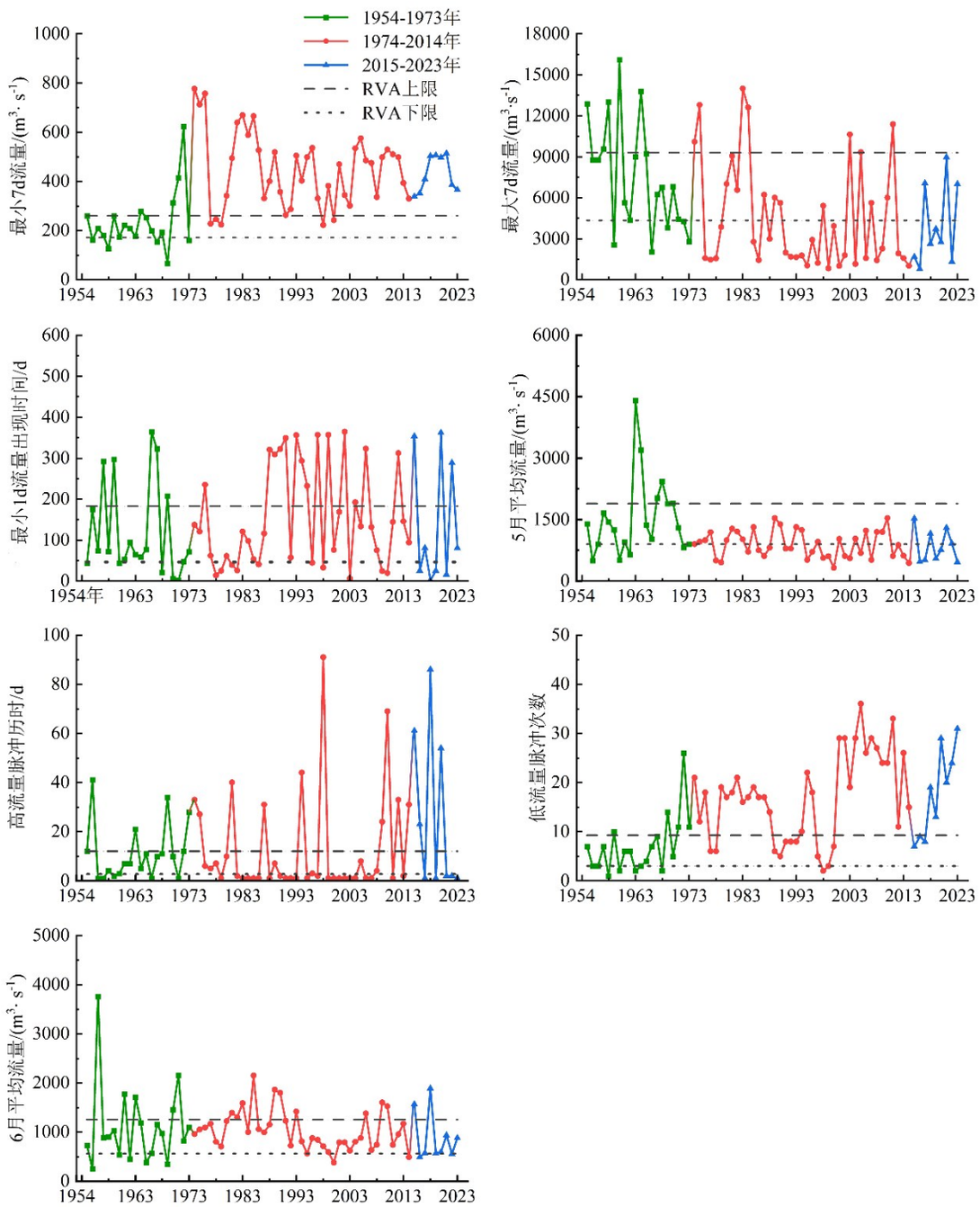


图 7　黄家港站 ERHIs 的时间变化

Fig. 7　Temporal variation of ERHIs at Huangjiagang station

参考文献:

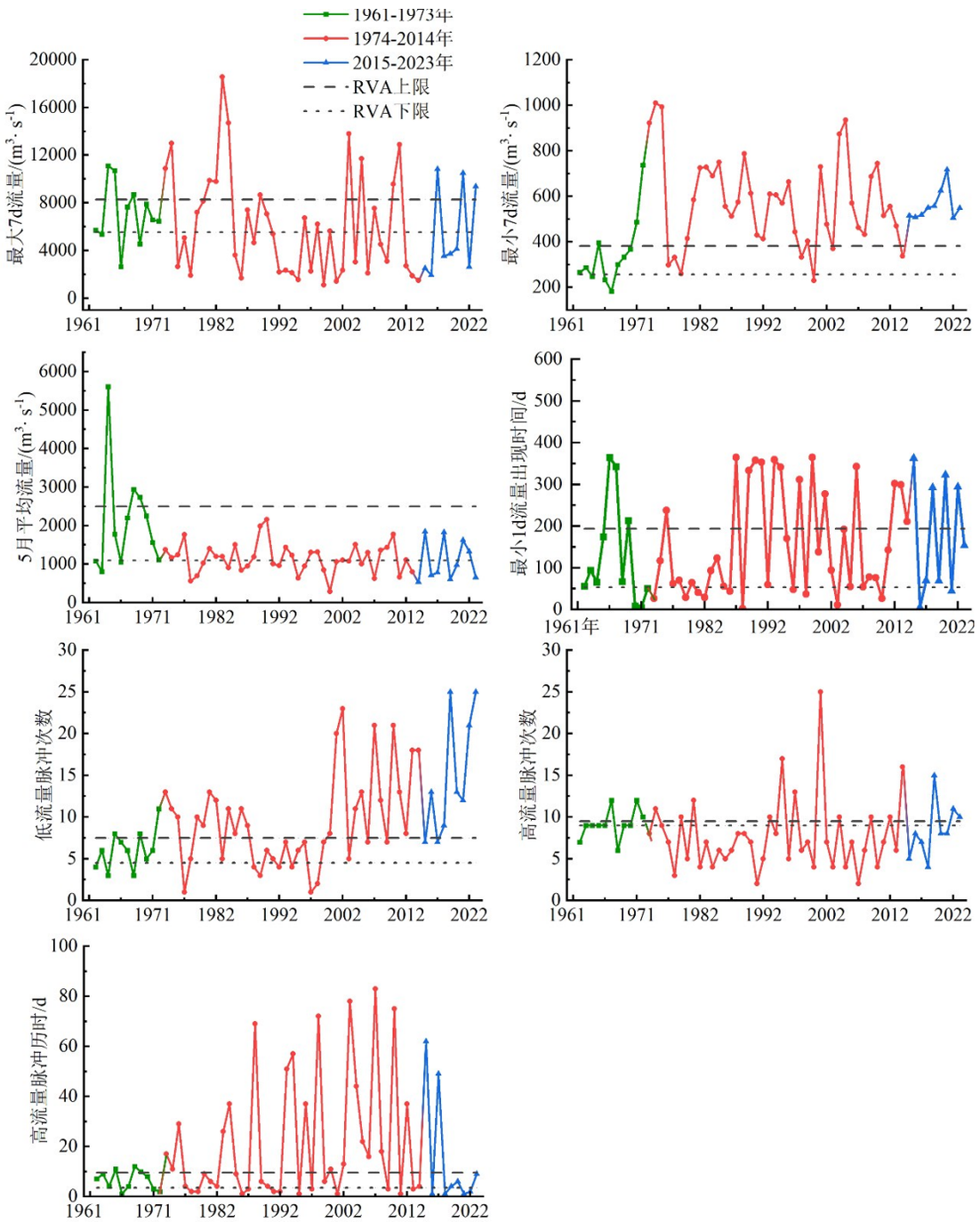


图8 皇庄站ERHIs的时间变化

Fig. 8 Temporal variation of ERHIs at Huangzhuang station

[1] PALMER M, RUHI A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration [J]. Science, 2019, 365(6459): eaaw2087.

[2] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.
MAO Zhanpo, WANG Yuchun, PENG Wenqi, et al. Advance in effects of dam construction on river ecosystems[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 134-140.

[3] 陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 793-810.
CHEN Qiuwen, ZHANG Jianyun, MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic ecoenvironment and adaptive managements[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 793-810.

[4] CHEN Q W, Li Q Y, Lin Y Q, et al. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures. Reviews of Geophysics [J]. 2023, 61:

e2023RG000819.

[5] 沈凯琦, 赵超, 刘利轲, 等. 水文情势变化下的永安溪生态风险评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(7): 1062-1072.
SHEN Kaiqi, ZHAO Chao, LIU Like, et al. Ecological risk assessment of Yong'an River under hydrological regime changes[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025, 58(7): 1062-1072.

[6] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.

[7] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.

[8] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 147-170.

[9] MASKEY M L, FACINCANI G, RALLINGS A M, et al. Assessing hydrological alteration caused by climate change and reservoir operations in the San Joaquin River Basin, California[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 765426.

[10] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 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[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6079-6090.
GU Xihui, ZHANG Qiang, KONG Dongdong, et al. Based on multiple hydrological alteration indicators evaluating the characteristics of flow regime with the impact on the diversity of hydrophily biology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6079-6090.

[11] 戴明龙, 祁俊丽, 仇红亚, 等. 一种改进的量化水库运行影响的水文改变度评价方法: 以长江中游(宜昌-大通段)为例[J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 640-650.
DAI Minglong, QI Junli, QIU Hongya, et al. A new method on hydrological change degree evaluation for quantifying the impact of reservoir operation: A case study on the middle reaches of the Yangtze River (Yichang-Datong)[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(2): 640-650.

[12] 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[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1235-1245.
CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrologic indicators and its application for environmental flow calculation in Lake Dongting[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(5): 1235-1245.

[13] 周乐, 王瑞, 江善虎, 等. 生态相关水文指标的优选及其演变归因分析[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7068-7079.
ZHOU Le, WANG Rui, JIANG Shanhu, et al. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7068-7079.

[14] 李继清, 刘佳利, 邓世浪, 等. 变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 9-18.
LI Jiqing, LIU Jiali1, DENG Shilang, et al. Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 9-18.

[15] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 丹江口水库对下游汉江径流情势的影响分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 33-35.
ZOU ZhenHua, LI Qiongfang, XIA Ziqiang, et al. Human-induced alterations in the flow regime of the Hanjiang River[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 33-35.

[16] 彭涛, 严浩, 郭家力, 等. 丹江口水库运用对下游水文情势影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(6): 22-26, 47.
PENG Tao, YAN Hao, GUO Jiali, et al. Impact of Danjiangkou Reservoir operation on downstream hydrological regime[J]. Yangtze River, 2016, 47(6): 22-26, 47.

[17] 柏慕琛, 班璇, PANAYIOTIS D, 等. 丹江口水库蓄水后汉江中下游水文时空变化的定量评估及其生态影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1476-1487.
BAI Muchen, BAN Xuan, PANAYIOTIS D, et al. Quantifying the spatio-temporal variation of flow and its ecological impacts in the middle- section of Hanjiang River following the Danjiangkou Reservoir impoundment[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1476-1487.

[18] SHIAU J T, WU F C. A histogram matching approach for assessment of flow regime alteration: application to environmental flow optimization[J]. River Research and Applications, 2008, 24(7): 914-928.

[19] JACKSON D A. Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches[J]. Ecology, 1993, 74(8): 2204-2214.

[20] OLSEN R L, CHAPPELL R W, Loftis J C. Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis-literature

review and Illinois River watershed case study[J]. Water Research, 2012, 46(9): 3110-3122.

[21] 虞鸿, 吴中如, 包腾飞, 等. 基于主成分的大坝观测数据多效应量统计分析研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(7): 830-839.
YU H, WU Zhongru, BAO Tengfei, et al. Multivariate analysis in dam monitoring data with PCA[J]. Scientia Sinica Technologica, 2010, 40(7): 830-839.

[22] 顾玉娇, 杨肖丽, 任立良, 等. 基于RVA法和PCA法评估三座店水库对下游径流的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020, 8: 177-181, 187.
GU Yujiao, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. The evaluation of the influence of Sanzuodian Reservoir on downstream runoff based on RVA and PCA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 8: 177-181, 187.

[23] 肖睿, 黄伟, 李琴, 等. 基于PCA-RF的抚河下游生态最相关水文指标优选及演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(7): 1563-1575.
XIAO Rui, HUANG Wei, LI Qing, et al. Optimization and change analysis of the ecologically relevant hydrological indicators in the lower reaches of the Fu River based on PCA-RF[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(7): 1563-1575.