

李芊芊, 张翔, 吴可怡, 等. 汉江下游流域生态流量区域特征指标的优选[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 282-290. LI Q Q, ZHANG X, WU K Y, et al. Optimization of regional characteristic indicators for ecological flow in the lower reaches of Hanjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 282-290. (in Chinese)

汉江下游流域生态流量区域特征指标的优选

李芊芊^{1,3}, 张翔^{1,3}, 吴可怡^{1,3}, 陶士勇^{1,3}, 闫少锋², 邓梁堃^{1,3}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072; 2. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064;
3. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 在评价河流水文情势变化特征时, 传统水文改变指标法(indicators of hydrologic alteration, IHA)存在的指标间相关性高和数据冗余问题会造成整体评价偏差。对汉江下游流域的河流水文情势评价时, 考虑到汉江流域干支流日均流量及取水调水工程等的影响, 分别选择汉江干流上的 3 个水文站及支流流域的 3 个水文站点, 采用主成分分析法对 6 个水文站 IHA 指标进行优选, 再利用相关性分析结果进一步筛选, 优选出适用于评价汉江下游流域水文情势的 13 个代表性指标, 分别为 2 月流量、4 月流量、7 月流量、10 月流量、12 月流量、基流指数、最低流量出现日期、最高流量出现日期、低流量脉冲次数、高流量持续时间、日均流量增加率、日平均流量减少率和日均流量反转数。结果表明: 6 个水文站的代表性指标间相关性均大幅降低, 13 个代表性指标间的相关系数不超过 0.3 的占比约 70%; 经变化范围评价法(range of variability approach, RVA)验证, IHA 指标与优选出的代表性指标对汉江下游流域整体水文改变度评价结果的差值均小于 7.5 个百分点, 表明其能够对汉江下游流域提供较为全面合理的水文情势变化评价。

关键词: 汉江下游流域; 区域特征; 生态流量; 指标优选; 水文改变度

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0030

随着经济社会的发展, 人们对河流的开发利用程度越来越高。为研究河流的水文情势改变对生态系统的影响, 需要利用生态水文指标体系量化河流水文改变程度。Olden 等^[1]对美国 170 余个具有长期记录的现有水文指标进行总结, 在对水文情势进行整体评价时, 这些指标数量庞大, 且相关程度高的指标会对水文改变程度重复描述。Richter 等^[2]在 20 世纪末提出的水文变异指标体系(indicators of hydrologic alteration, IHA)是目前应用最广泛的指标体系, 共包含 32 个指标, 基于日水文流量数据, 分为流量、发生时间、频率、历时、变化率 5 类; 在此基础上, Richter 等^[3]还提出了用来评价水文情势变化程度的变化范围法(range of variability approach, RVA)。目前, IHA-RVA 法被广泛运用于我国长江、黄河和松花江等流域, 用来评价气候变化和水库建设等因素引起的河流水文情势变化^[4-5]。

由于不同研究区域的气候、植被等环境条件、

地貌特征和水文生态响应关系存在较大的差异^[6], IHA 包含的 32 个指标在评价河流水文情势变化时存在冗余或不足。因此构建针对复杂流域不同特征的水文生态指标体系是非常必要的。现已提出的用来降低指标间相关性的方法有很多, 如主成分分析法(principal component analysis, PCA)、遗传规划算法^[7]和个体生态学矩阵^[8]等方法。PCA 法在有效消除指标间相关性的同时, 便于选择反映信息量最大的指标, 运用较为广泛^[9]。江善虎等^[10]利用 PCA 法优选出 7 个生态最相关水文指标(ERHIs)来评估渭河流域水文情势变化程度及原因。周乐等^[11]利用此方法定量评估了老哈河河道径流量的改变程度。程俊翔等^[12]结合 ERHIs 改进了 RVA 法, 并将其应用在洞庭湖出口的环境流量估算中。周星宇等^[13]运用 PCA 法优选出 7 个代表性指标, 较为全面地对金沙江华弹水文站控制流域内河段的水文情势变化进行评价。河流生态最相关指标的选

收稿日期: 2023-08-15 修回日期: 2024-01-10 网络出版时间: 2024-03-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240315.1607.004>

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U21A2002); 湖北省水利科研项目(HBSLKY202310)

作者简介: 李芊芊(2004—), 女, 河南焦作人, 主要从事生态水文学研究。E-mail: liqqjdx@163.com

通信作者: 张翔(1969—), 男, 北京人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事基于生态水文的可持续水资源管理研究。E-mail: zhangxiang@whu.edu.cn

取能够有效表征河流的生态水文响应关系,是目前研究的关键与难点。现阶段研究成果主要针对单一水文站进行河段生态最相关指标的选取,本文则选取汉江下游流域干流及支流上多个水文站,关注区域尺度的河流生态水文最相关指标的选取。

汉江下游流域地势平坦,曲流发育,且愈近河口河道愈窄,泄洪能力差。随着干流的梯级开发和南水北调中线工程实施,汉江下游流域径流量减少,年内分配改变,鱼类繁衍所需的高流量脉冲次数减少^[14-15];一江三河沿线设置诸多控制工程,导致河湖连通性减弱^[16],汉江下游河流富营养化现象时有发生^[17-18]。因此,有必要针对汉江下游流域建立特定的生态水文指标体系,从而及时评价人类活动对河流的影响程度。目前,已有研究人员^[19-21]针对汉江下游流域河流健康评估和生态流量阈值的确定展开研究。本文基于 IHA 指标,结合汉江下游流域特点,利用主成分分析法和相关性分析法开展生态流量水文指标体系优选研究,并利用 RVA 方法对汉江下游河流水文情势变化进行评价。

1 研究区概况

研究区主要位于汉江下游流域,河段流经江汉平原。汉江是长江中游最大的支流,干流全长 1 577 km,流域面积达 15.9 万 km²^[22]。汉江下游流域以钟祥为分界点,属于副热带季风气候区,具有较强的季节性,夏季高温冬季寒冷,多年平均气温约 14 ℃,夏季最高温度可达 40 ℃。降雨量丰沛,水量年内分配不均,6—9 月降水量约占全年降水量的 70%,多年平均降水量约 880 mm^[23]。流域内水系发育、湖泊众多、连通性复杂,具有平原河网区典型水文及水资源特征。主要支流有天门河、汉北河、府河,主要的湖泊有汉湖、东西汉湖等。流域地势平坦,河流两岸有完整堤防,河道上建设有较大规模的取水、调水工程^[24]。

研究选取 6 个研究站点:皇庄站、沙洋三站和仙桃二站依次位于汉江下游干流河段;天门站位于汉北河与天门河分岔处上游河段;应城二站位于汉北河的支流大富水河段;隔蒲潭站位于汉江下游支流府河河段。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

数据主要基于汉江下游流域所选水文站的实测

逐日径流量资料,见表 1。根据日流量数据计算可以得到各水文站的 IHA 指标。

表 1 研究区水文站日流量数据序列
Tab. 1 The daily flow data series of hydrological stations

站名	水文资料序列(年份)	
	起	止
汉江干流	皇庄站	1974—2020
	沙洋三站	1973—2020
	仙桃二站	1972—2020
汉北河	天门站	1997—2020
大富水	应城二站	1970—2020
府河	隔蒲潭站	1987—2020

2.2 计算方法

2.2.1 主成分分析法

PCA 法是一种用降维思想压缩数据,利用信息损失将多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法,能够有效消除指标间相关性,同时可以对指标进行赋值^[25]。主成分为转化出的综合指标,每个主成分都是原始变量的线性组合,主成分之间互不相关,在水文学、生态学等领域都具有应用价值。利用 SPSS 软件对原始数据进行标准化处理,并建立变量之间的相关系数矩阵,计算相关系数矩阵的特征值和特征向量。并根据 Kaiser-Guttman 标准^[26],选取特征值大于 1,且所有特征值累计贡献比大于 80% 的主成分,再综合考虑选取每个主成分中载荷值最大的指标为代表性指标。利用 PCA 法分别对 6 个水文站的 IHA 指标进行优选,每个水文站均可得到一组代表性指标。

2.2.2 水文改变度计算法

Richter 提出的 RVA 法,便于定量描述 IHA 指标中单一指标的水文改变度,25%~75% 分位间的变动范围作为 IHA 指标的生态目标,单一指标的水文变异度由以下公式来计算:

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

式中: D_i 为第 i 个指标的水文改变度; $N_{o,i}$ 为受影响

后时期观测到的第 i 个指标落在目标范围内的年数; N_e 为期望年数, $N_e = P \times N_p$, N_p 为受影响后时期的总年数, P 表示受影响后时期每年各 IHA 指标统计值落在指标的生态目标范围内(即 25% ~ 75%) 的概率。

序列整体的水文改变度计算公式为

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

式中: D_0 为整体的水文改变度。将水文改变度分成 3 个等级: $0 < D_0 \leq 33\%$ 为低度改变; $33\% < D_0 \leq 67\%$ 为中度改变; $67\% < D_0 \leq 100\%$ 为高度改变。

3 结果与分析

3.1 区域代表性指标优选

将 6 个水文站的长序列日流量数据计算得出 IHA 指标, 运用 SPSS 软件进行 PCA 法分析, 得到各个站的主成分特征值和累计贡献率见图 1。结果表明: 皇庄站和沙洋三站均有 6 个主成分特征值大于 1, 仙桃二站有 5 个, 三站累积贡献率依次为 83.5%、82.1% 和 82.0%; 天门站、应城二站和隔蒲潭站均有 8 个主成分的特征值大于 1, 累积贡献率依次为 89.2%、82.0% 和 84.1%。各个水文站得到的主成分的累积贡献率均大于 80%, 符合本研究要求。

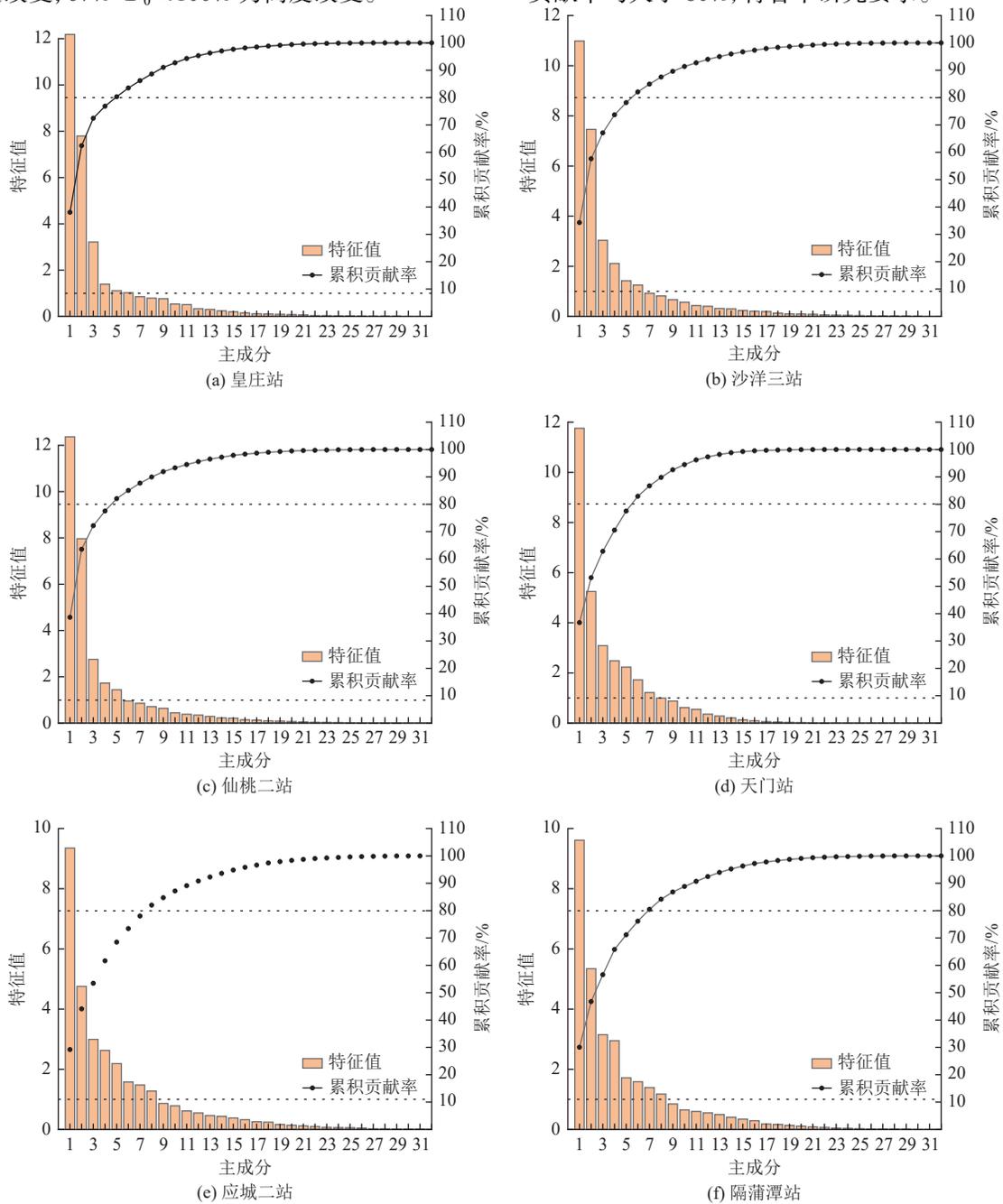


图 1 主成分分析特征值及累积贡献率

Fig. 1 Eigenvalues and cumulative contribution rates for principal component

以在相应主成分的载荷值最大为依据,优选出6个水文站的每一个主成分的代表性因子。选取6个水文站的代表性指标见表2。汉江下游干流和支流流域优选出的代表性指标有所差异。

表2 选取的代表性指标
Tab. 2 Representative indicators

指标	皇庄站	沙洋三站	仙桃二站	天门站	应城二站	隔蒲潭站
2月流量(Q_{2M})		√			√	√
4月流量(Q_{4M})		√		√	√	
7月流量(Q_{7M})		√		√	√	√
10月流量(Q_{10M})	√	√		√		
12月流量(Q_{12M})					√	√
基流指数(I_{BF})	√		√			√
最高流量出现日期($D_{F,max}$)	√	√	√			
最低流量出现日期($D_{F,min}$)			√	√	√	
低流量脉冲次数(F_{LP})	√				√	
高流量持续时间(T_{HF})	√	√	√	√	√	
日平均流量增加率(R_{FI})				√		
日平均流量减少率(R_{FD})				√		
日均流量反转数(N_{FR})	√		√	√	√	√

汉江干流的3个水文站共优选出11个代表性指标,用于描述河流丰水期的生态水文特征变化。例如,之所以选择7月和10月流量、高流量出现时间和持续时间以及流量反转数等指标,是因为汉江干流流量充沛,枯水期河道水量足以维持基本水文生态过程,而丰水期河道内水量大幅增长,时有洪涝灾害发生,涨水过程还对鱼类洄游和产卵具有刺激作用,河流的生态功能变化更强烈。

汉江支流水文站共优选出13个代表性指标,数量多于干流代表性指标,这是由于支流流域具有更为复杂的生态水文特征。所选指标主要描述枯水期河流的生态水文特征,如2月和12月流量、低流量出现日期及低流量出现的次数等。这是因为汉江支流河流日流量较小,部分河段存在断流情况,河道内流量微小变化就可能引起河流生态水文情势改变,需引起重视。

汉江下游流域地势平坦,河床宽浅,涨水期与退水期流量变化幅度大,其余时刻流量变化不明显;梯级水利枢纽建立后,河道内流量年内分配发生变化,削弱了下游河道内流量的峰值^[27]。此时,IHA指标中的5月流量、年最大和最小3日流量等部分指标在评价流域水文情势变化时影响较小,应在指标

优选过程中剔除。

根据6个水文站的代表性指标综合选择,最终本文确定选取2月流量、4月流量、7月流量、10月流量、12月流量、基流指数、最低流量出现日期、最高流量出现日期、低流量脉冲次数、高流量持续时间、日平均流量增加率、日平均流量减少率和反转数这13个指标作为研究区的代表性指标。优选出的代表性指标包含了原始IHA指标的5个组别,能够较为完善地描述水文节律的各个方面。这13个指标相互间的相关系数都较小,相关性较低,在进行水文情势变化评价时能够有效地减少指标相关性带来的影响。

为了进一步分析选取的代表性指标的合理性,将优选出的13个代表性指标数据进行相关性分析,结果见图2。其中,皇庄站、沙洋三站、仙桃二站的代表性指标中,相关性较高的为2月流量和4月流量,天门站、应城二站和隔蒲潭站相关性最高的分别为2月流量、12月流量、4月流量和高流量持续时间,相关性较高的指标集中在低、中流量过程的月平均流量值。图2分别展示了6个水文站代表性指标之间的相关系数,显然13个代表性指标之间的相关性大大减小,约70%代表性指标之间的相关系数(绝对值)都不超过0.3。

3.2 水文指标的区域变化特征分析

M-K突变检验的结果表明汉江干流流域水文站径流突变点均在1990年附近,支流流域水文站径流突变点均在2010年附近。最终选取1990年和2010年分别作为汉江流域干流水文站和支流水文站的突变年份。对6个水文站在变异年后代表性指标的变化趋势进行分析,结果见图3。

皇庄站、沙洋三站和仙桃二站位于汉江下游干流,实测流量受河流汇流及河道水利工程的影响,数值存在差异,三站实测年均流量依次减小,但总体水文情势变化规律相似。变异年后,汉江下游流域干流丰水期流量整体呈现减少趋势,皇庄站汛期平均流量(7—10月)由变异年前的 $2\ 690\ \text{m}^3/\text{s}$ 降低至 $1\ 830\ \text{m}^3/\text{s}$,平均流量降低了 $900\ \text{m}^3/\text{s}$,为中度改变;沙洋三站和仙桃二站变异年后汛期平均流量较变异年前降低约 $600\ \text{m}^3/\text{s}$,为低度改变。3个水文站的枯水期月均流量(12月—次年3月)在变异年前后差值均在 $100\ \text{m}^3/\text{s}$ 左右,河道内流量变化不明显,为低度改变。3个水文站高流量持续时间由平均 $8.5\ \text{d}$ 降至 $4.5\ \text{d}$;日均流量上涨率由 0.091 降至

0.067, 表明河道内流量峰值变小, 涨水幅度变缓。这表
明丹江口水库和梯级水利枢纽具有很好的调

控作用, 能够在一定程度上避免洪水灾害的发生, 对于流
河段丰水期水文情势变化影响程度高。

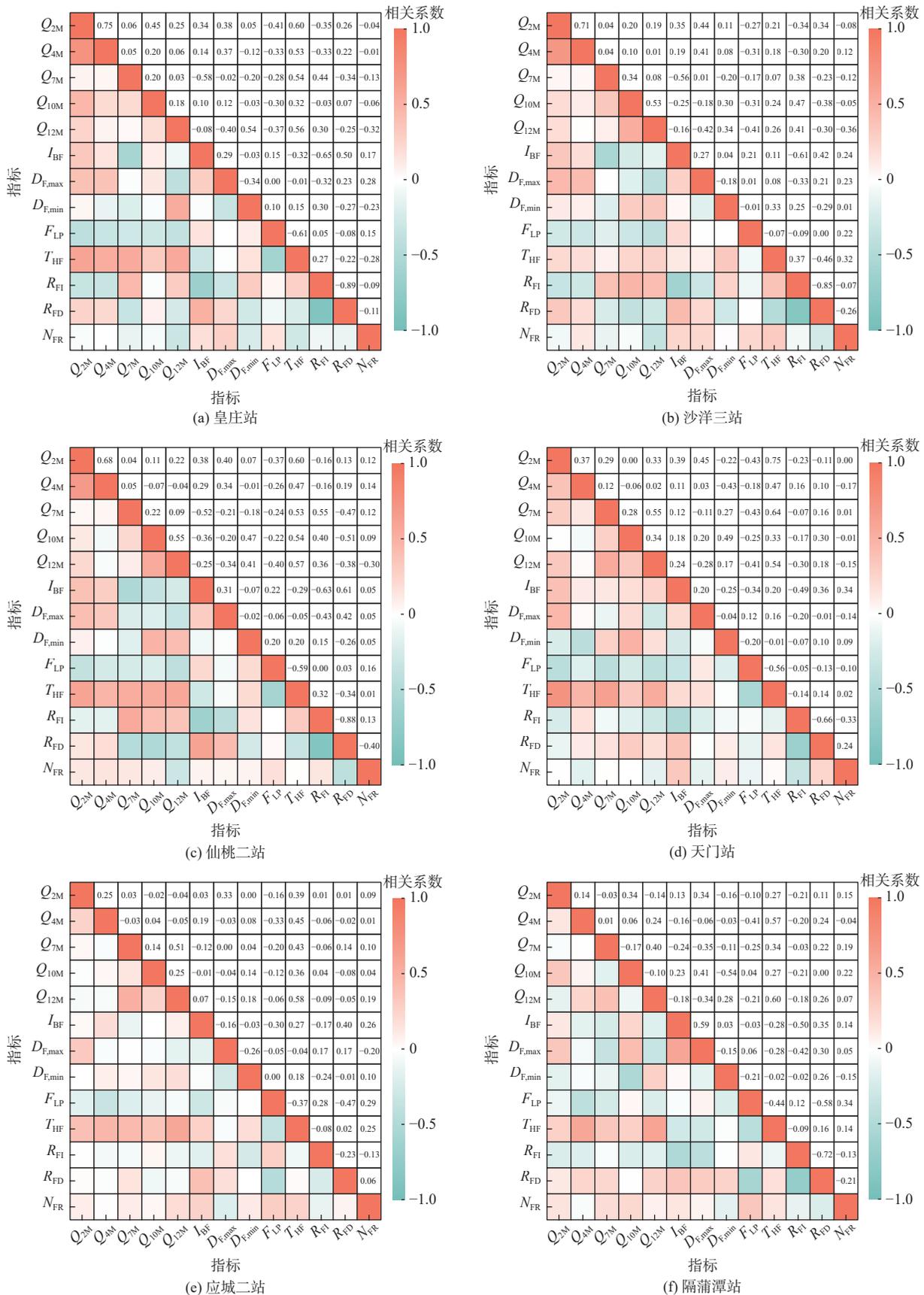


图 2 代表性指标相关性分析结果
Fig. 2 Results of representative indicators correlation analysis

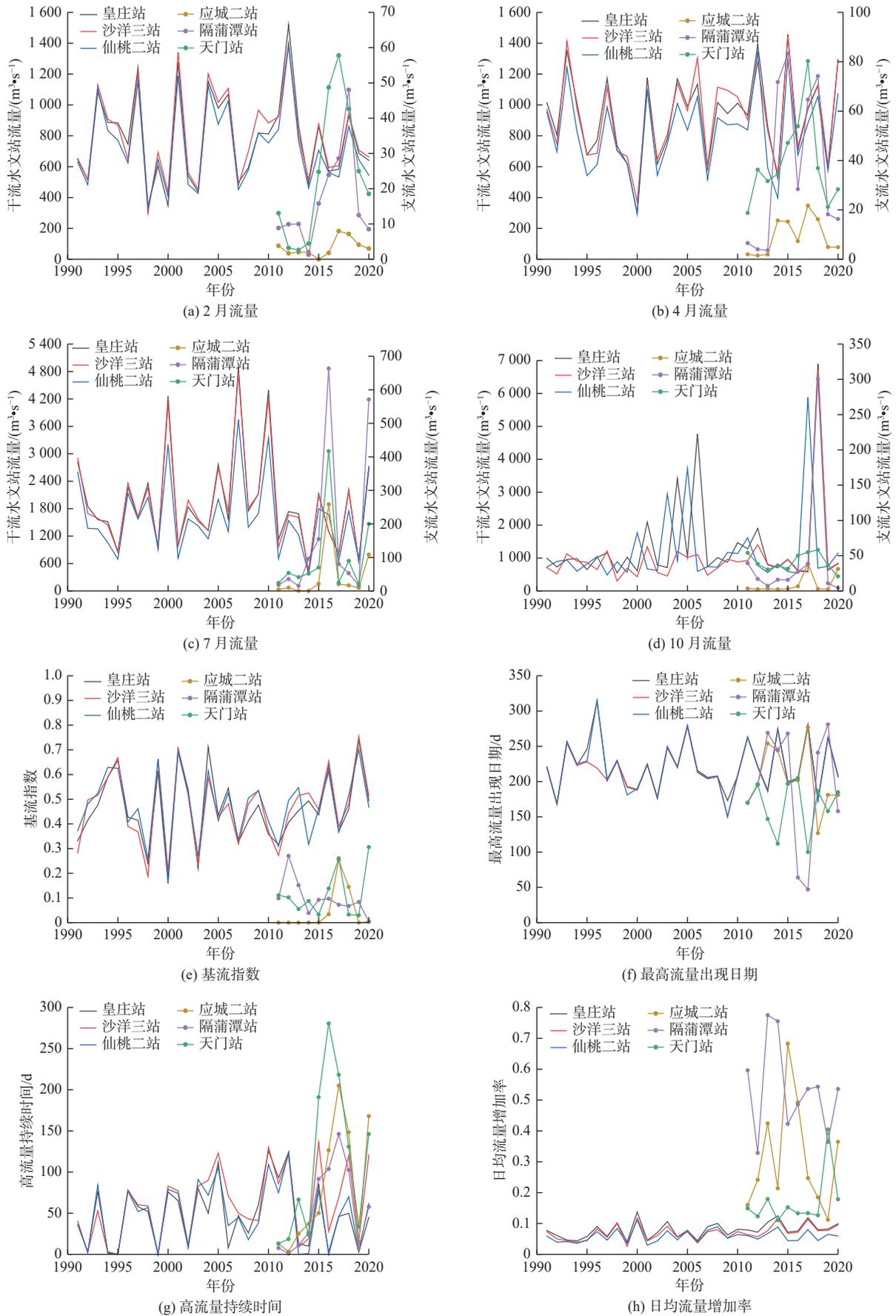


图3 变异年后代表性指标变化趋势

Fig. 3 Variation trend of representative indicators after the variation year

天门站、应城二站和隔蒲潭站位于汉江下游流域支流上,受河道断面的形状、汇水面积及河道整治工程等影响,支流 3 个水文站的生态水文特征存在较大差异,变异年前后代表性指标的改变程度均为中度改变。水文情势变化最大的为应城二站,其次为隔蒲潭站,最小的是天门站。

天门站上游来水量稳定,变异年后月均流量变化为低度改变,小于其他 2 个支流水文站。变异年后应城二站和隔蒲潭站的月均流量均小于变异年前,应城二站的月均流量由 $14.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $6.56 \text{ m}^3/\text{s}$;隔蒲潭站的月均流量由 $76.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $28.54 \text{ m}^3/\text{s}$,均为中度改变。枯水期时河道内流量有所减少,水生生物面临的干旱压力增加,不利于维持河道生物多样性^[28]。支流水文站的平均低流量脉冲次数由 91 次/a 增加至 173 次/a,表明河道边滩及河漫滩裸露增加,河流横向连通性变低,不利于维持部分植物的生长环境需求。汉江支流水文站的流量反转数呈现下降趋势,由平均 186 次/a 降低为 103 次/a,整体变化度均为中度改变,表明水生生境的变化程

度减少,适合本地物种的生存^[29]。由此可见,汉江支流流域的干旱程度较变异年前增加,枯水期的流量变化对区域水文情势变化程度影响高,支流流域选取的代表性指标更关注于枯水期生态水文响应关系。

3.3 整体水文改变度分析

汉江下游的 6 个水文站的 IHA 指标以及优选代表性指标的水文改变度见表 3。由表可知,皇庄站代表性指标的整体改变度为低度改变,其余各站的整体改变度均为中度改变,表明汉江下游流域在气候变化和人类活动的影响下,整个区域改变程度达到了中等程度。各水文站用两种指标体系计算得到的水文整体改变度差值分别为 5.45、1.55、4.09、1.52、1.41 和 7.26 个百分点,相差值均较小;汉江下游流域的 IHA 指标整体改变度为 40.14%,代表性指标整体改变度为 39.53%,差值为 0.61 个百分点。结果表明代表性指标对汉江下游流域河流及区域水文情势改变程度的评价结果与传统 IHA 指标基本一致。

表 3 IHA 指标与优选指标对汉江下游水文站水文改变度评价结果对比
Tab. 3 Comparison of IHA index and preferred index on the evaluation of hydrological change degree of hydrological stations in the lower reaches of the Hanjiang River

项目	皇庄站	沙洋三站	仙桃二站	天门站	隔蒲潭站	应城二站	汉江下游流域
IHA 指标整体改变度	35.75	38.13	37.35	40.50	42.03	47.10	40.14
优选指标整体改变度	30.30	39.68	33.26	38.98	40.62	54.36	39.53

将优选出的 13 个代表性指标运用到汉江下游流域河流水文情势的评价中,考虑了平原区河网水系特征,剔除对评价结果影响较低指标,保留与河流生态水文特征变化和响应最相关的指标,简化评价步骤,提高评价效率,为了解汉江下游流域生境的改变提供了极大的便利。

4 结论

传统 IHA 指标之间具有高相关性,本研究利用主成分分析法,对汉江下游流域内的 6 个水文站的 IHA 指标优选得到 13 个代表性指标,并分析整体水文改变度,对汉江下游流域的水文情势改变进行了简要评价。研究结果如下:

13 个代表性指标分别为 2 月流量、4 月流量、7 月流量、10 月流量、12 月流量、基流指数、最低流量出现日期、最高流量出现日期、低流量脉冲次数、高流量持续时间、日平均流量增加率、日平均流量减少率和反转数。汉江干流水文站优选出的

指标多关注于河流丰水期的生态水文特征;支流水文站优选出的代表性指标主要关注枯水期河流的生态水文特征。

汉江下游流域干流丰水期流量整体呈现减少趋势,为中、低度改变,一定程度上避免了洪水灾害的发生;支流流域河段流量受气候及上游来水量的影响呈现减少的趋势,河流连通性减弱,不利于维持河道生物多样性。

优选出的 13 个代表性指标对汉江下游 6 个水文站整体改变度评价与传统 IHA 指标评价结果相近。该指标体系在汉江下游水文情势变化分析的应用,考虑了干流流域和支流流域不同的流域生态特点,能够通过较少的水文指标来描述水文生态系统对水文情势的变化响应关系,对生态系统保护和水资源规划都具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow

- regimes[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121. DOI: 10.1002/rra.700.
- [2] 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. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [3] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need?[J] *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249.
- [4] 康泽璇,王芳,刘扬,等.基于IHA-RVA法的大通河上中游水文节律变化[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1065-1075. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0105.
- [5] 涂玉律,李英海,王永强,等.基于中断时间序列分析和IHA-RVA法的水文情势综合评价[J].*水电能源科学*, 2022, 40(10): 26-30. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212631.
- [6] 杨爱民,唐克旺,王浩,等.中国生态水文分区[J].*水利学报*, 2008, 39(3): 332-338. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.03.012.
- [7] 孙颖.改进遗传算法在辽东山区水文地质参数反演中的应用[J].*水利技术监督*, 2021, 167(9): 197-200. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2021.09.053.
- [8] SUEN J P, HERRICKS E E. Investigating the causes of fish community change in the Dahan River (Taiwan) using an autecology matrix[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 568(1): 317-330. DOI: 10.1007/s10750-006-0209-x.
- [9] 李艳双,曾珍香,张闽,等.主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J].*河北工业大学学报*, 1999, 28(1): 96-99.
- [10] 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): 9-14,70. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.002.
- [11] 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. DOI: 10.5846/stxb202108232345.
- [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. DOI: 10.18307/2018.0507.
- [13] 周星宇,黄晓荣,赵洪彬.基于主成分分析法的河流水文改变指标优选[J].*人民长江*, 2020, 51(6): 101-106. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.06.018.
- [14] 左其亭,王妍,陶洁,等.南水北调中线水源区水文特征分析及其水资源适应性利用的思考[J].*南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 42-49. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0095.
- [15] 费启航,彭涛,由星莹,等.基于四大家鱼栖息地模拟的汉江下游生态流量研究[J].*人民长江*, 2023, 54(10):35-43. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.006.
- [16] 卜久贺,李春晖,王烜,等.长江流域典型区河-库水文网络连通综合评估[J].*水生态学杂志*, 2020, 41(5): 55-62. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.007.
- [17] 景朝霞,夏军,张翔,等.汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J].*环境科学研究*, 2019, 32(1):104-115. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2018.07.25.
- [18] 何术锋,胡威,杨早立,等.汉江中下游藻类水华暴发特征及其生态流量阈值[J/OL].*中国环境科学*,2023, 1-9[2023-09-24]. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230823.015
- [19] 曾凌,陈金凤,刘秀林.南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析[J].*水文*, 2022, 42(6): 13-18, 30. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210462.
- [20] 李新成.汉江中下游水文情势变化及水环境评价[D].武汉:中南民族大学, 2022. DOI: 10.27710/d.cnki.gznm.2022.000538
- [21] 朱才荣,张翔,穆宏强.汉江中下游河道基本生态需水与生径比分析[J].*人民长江*, 2014, 45(12): 10-15. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.12.011.
- [22] 王何予,郭生练,田晶,等.一种新的水文情势改变度综合估算法[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 447-456,479. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0045.
- [23] 郑继利.汉江中下游水生态环境演变情况研究[D].荆州:长江大学, 2019.
- [24] 吴可怡,张翔,闫少锋,等.平原河网生态流量计算方法及其适宜性研究[J].*水资源研究*, 2023, 12(1): 1-9. DOI: 10.12677/jwrr.2023.121001.
- [25] 娄银霞,程铭,文高进,等.基于FCM和遗传算法的图像模糊聚类分析[J].*计算机工程与应用*, 2010, 46(35): 173-176, 195. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.35.050.
- [26] JACKSON D A. Stopping rules in principal components analysis: A comparison of heuristical and statistical approaches[J]. *Ecology*, 1993, 74(8): 2204-2214. DOI: 10.2307/1939574.
- [27] 王何予,田晶,邓乐乐,等.基于IHA-RVA法分析汉江中下游水文情势变化[J].*水资源研究*, 2021, 10(4): 350-361. DOI: 10.12677/JWRR.2021.104038.
- [28] SUEN J P. Potential impacts to freshwater ecosystems caused by flow regime alteration under chang-

ing climate conditions in Taiwan[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 649(1): 115-128. DOI: [10.1007/s10750-010-0234-7](https://doi.org/10.1007/s10750-010-0234-7).

[29] 金耀广. 长江生态水文变异及其鱼类影响[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023. DOI: [10.27144/d.cnki.ghbsc.2022.000188](https://doi.org/10.27144/d.cnki.ghbsc.2022.000188)

Optimization of regional characteristic indicators for ecological flow in the lower reaches of Hanjiang River

LI Qianqian^{1,3}, ZHANG Xiang^{1,3}, WU Keyi^{1,3}, TAO Shiyong^{1,3}, YAN Shaofeng², DENG Liangkun^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design, Wuhan 430064, China; 3. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponde City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: People's development and utilization of the river are increasing because of power generation, navigation, and irrigation, at the same time, the hydrological regime of the river and the ecological environment has also caused a certain impact. When evaluating the changing characteristics of river hydrological alterations, utilizing the ecohydrological index system is often necessary to quantify the degree of river hydrological changes. Due to the large differences in climatic conditions, geomorphological features, and hydrological-ecological response relationships in different study areas, problems of correlation between indicators and data redundancy in the traditional hydrological alteration index method (IHA) may cause the overall evaluation bias.

The evaluation of the hydrological regime of the river in the lower reaches of the Hanjiang River was carried out considering the influence of the average daily flow, the shape of the river cross-section, and water intake and diversion projects of the main and tributary streams in the Hanjiang River basin. For this purpose, three hydrological stations on the main river basin of the Hanjiang River and three hydrological stations in its tributary basins were selected, and the IHA indexes of the six hydrological stations in the basin were optimized by the principal component analysis method, and then further screened based on the results of the correlation test method.

The results showed that: Thirteen representative indicators were February flow, April flow, July flow, October flow, December flow, base flow index, lowest flow occurrence date, highest flow occurrence date, number of low-flow pulses, high flow duration, average daily flow increase rate, average daily flow reduction rate and reversal numbers. The correlation test analysis showed that the correlation of the thirteen representative indicators of the six hydrological stations was greatly reduced, and the correlation coefficients between 70% of representative indicators did not exceed 0.3. The difference between IHA indicators and the representative indicators on the overall hydrological alteration degree of the lower Hanjiang River basin was less than 7.5 percentage points verified by the RVA method.

Considering the different hydrological situations of the rivers in the mainstream and tributary basins of the lower reaches of Hanjiang River basin, different hydrological stations are optimized for representative indicators, which can evaluate the hydrological situation of the entire lower reaches of Hanjiang River basin. The representative indicators can provide a more comprehensive and reasonable evaluation of the hydrological regime of the entire lower reaches of Hanjiang River basin, which is convenient for evaluating the degree of impacts of human activities on the river promptly.

Key words: lower reaches of Hanjiang River; regional characteristics; ecological flow; indicator selection; degree of hydrological alteration