

# 水文情势改变度计算方法比较研究

李浩威<sup>1</sup>, 郭生练<sup>1</sup>, 钟思睿<sup>1</sup>, 王何予<sup>2</sup>, 梁志明<sup>2</sup>

<sup>2</sup>中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌

<sup>1</sup>武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年5月23日; 录用日期: 2025年6月10日; 发布日期: 2025年6月27日

## 摘要

长江上游水库群的建成运行, 对河流水文情势产生了显著的影响。基于宜昌水文站1949~2022年日流量资料, 将序列分为1949~2002年、2003~2014年、2015~2022年三个不同时期; 分别采用变化范围法(RVA)、直方图匹配法(HMA)、直方图比较法(HCA)、修正变化范围法(RRVA)、综合估算法(CHAE), 计算分析宜昌站水文情势改变度, 并比较分析各种方法的优点和不足。三峡水库运行后宜昌站的整体水文情势改变度为55.10%, 随着金沙江梯级水库群的建成运行, 2015~2022年间整体水文情势改变度上升为71.33%, 即宜昌站呈现重度改变, 研究结果为长江流域水旱灾害防御、水资源开发利用和生态环境保护提供科学支撑。

## 关键词

水文情势, 水文改变指标, 梯级水库, 比较分析, 宜昌站

# Comparative Study on Estimation Methods for Hydrological Regime Alteration

Haowei Li<sup>1</sup>, Shenglian Guo<sup>1</sup>, Sirui Zhong<sup>1</sup>, Heyu Wang<sup>2</sup>, Zhiming Liang<sup>2</sup>

<sup>2</sup>China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang Hubei

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: May 23<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The construction and operation of reservoir group in the upper Yangtze River basin have significantly affected downstream hydrological regime. Based on the observed daily flow data of Yichang Hydrology Station from 1949 to 2022, the flow series was divided into three parts (*i.e.*, 1949~2002, 2003~2014 and 2015~2022). The change degree of hydrological regime of Yichang Station was calculated respectively by

作者简介: 李浩威, 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究, Email: haoweili@whu.edu.cn

文章引用: 李浩威, 郭生练, 钟思睿, 王何予, 梁志明. 水文情势改变度计算方法比较研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(3): 233-244. DOI: 10.12677/jwrr.2025.143025

using RVA, HMA, HCA, RRVA and CHAE methods, and the advantages and limitations of these methods were comparatively studied. After the operation of the Three Gorges Reservoir, the overall degree of hydrological regime alteration at Yichang Station was 55.10%. With the completion and operation of the cascade reservoirs on the Jinsha River, the overall degree of hydrological regime alteration increased to 71.33% between 2015 and 2022. This indicates that Yichang Station has experienced a significant alteration. The research results provide scientific support for the prevention and control of water and drought disasters, the development and utilization of water resources, and the protection of the ecological environment in the Yangtze River Basin.

## Keywords

Hydrological Regime, Indicators of Hydrologic Alteration, Cascade Reservoirs, Comparative Study, Yichang Station

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水利工程是人类开发利用水资源的重要手段,对社会发展发挥着积极作用,可满足防洪、发电、调水、生态环境等诸多方面的需求,但也对其下游河流水文情势造成较大影响。针对河流水文情势改变的分析评价,国内外学者进行了大量研究工作。1996年 Richter 等[1]最早提出了系统描述河流状态改变的水文改变指标(Indicators of hydrologic alteration, IHA),包含5组32个水文指标,用以定量地描述水文情势;1997年 Richter 等[2]提出了变化范围法(Range of Variability Approach, RVA),将其天然流量下的IHA指标变化划分出范围,通过干扰后水文参数落在范围内的程度,分析水文指标在受干扰前后的变化程度,进一步量化了流域水文情势变化的程度[3];美国大自然保护协会将IHA进一步扩充完善为33个指标[4],此后IHA-RVA法得到普遍使用[5]-[7];2008年 Shiau 等[8]提出了直方图匹配法(Histogram Matching Approach, HMA),其认为RVA方法仅考虑了IHA指标落在范围内的频率,忽略范围外(无论是低于下限还是高于上限)的频率值,没有考虑IHA指标外的河流水文情势(如丰水年、枯水年等),可能会导致变化程度评估误差;然而,HMA方法将受干扰前后的水文参数依照频率列出直方图,基于两直方图频率向量间的二次型距离,并通过相似性矩阵进行加权,2017年 Huang 等[9]在HMA法的基础上提出了直方图比较法(Histogram Comparison Approach, HCA),他们认为HMA方法中相似性矩阵的计算不合理,导致扩大了二次型距离的差异,且在变化度归一化过程中,采用干扰前后所有参数的最大最小值的差计算最大二次型距离,则无论干扰前直方图的频率如何分布,都不会影响其计算过程,但会导致不精确的结果;HCA方法改善了计算过程,分别考虑了逐类和跨类的对应关系,将其合成为相似度进而推导出改变度;2020年 Zheng 等[10]提出了修正变化范围法(Revised Range of Variability Approach, RRVA),提出河流的水文参数是具有形态特征的时间序列,具有年内和跨年的周期性变化,故而需要考虑水文时间序列的形态变化,故而引入Hasse矩阵描述两个不同时间序列间的形态差异,通过计算频率和形态两方面的变化,综合得出整体的水文情势改变程度;2023年王何予等[11]采用主客观法进行赋权计算,提出了水文情势改变度综合估算法(Comprehensive Hydrologic Alteration Evaluation method, CHAE),以保留水文情势的分布、频率和时空变化信息,又避免数据冗余。

随着长江上游大型水利工程的开发建设,形成了以三峡水库为核心的梯级水库群,对河流的水文情势产生了显著的影响。Gao 等[12]研究了1961~2008年长江上游的水文情势变化,引入生态指标与IHA指标进行比较分析,认为长江上游年径流量减小,可能会对流域生态系统产生负面影响,三峡的蓄水提高了枯水期的流量,

降低了夏季洪峰流量；Zhang 等[13]认为三峡大坝显著改变了长江下游的水文状况，鄱阳湖和长江三角洲的生态系统受损严重；Wang 等[14]通过对长江流域共六个站点 1952~2018 年的日径流序列进行分析，研究了长江径流复杂性的空间分布和动态变化，发现其径流序列的复杂性从上游到下游呈现持续增加趋势；段唯鑫[15]等通过对宜昌站 1949~2014 年日均流量资料进行显著性分析，与长江上游水库群建设情况相结合，分析探讨了宜昌站的水文情势变化，发现枯水期的流量增大，丰水期流量减少，最小流量发生时间提前，流量逆转次数增加；钟斯睿等[16]应用 IHA-RVA 法分析计算长江流域上游水文情势的变化，认为随着上游水库群的建设，长江上游整体水文改变度早期呈中度改变，后期呈重度改变。

上述研究一方面采用了单一方法进行研究，对水文情势改变评估不够全面；另一方面由于资料序列长度有限，尚未能考虑到近年金沙江梯级水库的建设运行影响。本文基于宜昌水文站 1949~2022 年的流量数据，分别采用 RVA、HMA、HCA、RRVA 方法、CHAE 法，全面评估计算宜昌水文站的水文情势改变度，以期为长江流域水旱灾害防御、水资源开发利用和生态环境保护提供科学支撑。

2. 研究方法

IHA 指标经由美国大自然保护协会完善后，按照流量、频率、时间、延时以及变化率等分成 5 组，共 33 个指标，详见表 1。

表 1. IHA 指标及分组

| 组别             | 指标序号  | IHA 指标                              |
|----------------|-------|-------------------------------------|
| 各月平均流量         | 1~12  | 各月平均流量                              |
| 年极端流量          | 13~24 | 年最大、最小 1、3、7、30、90 日流量平均值、断流天数、基流指数 |
| 年极值流量发生时间      | 25~26 | 年最大、最小流量发生时间                        |
| 高低脉冲流量发生的频率及历时 | 27~30 | 每年发生高低脉冲流量的次数、高低脉冲的平均历时             |
| 流量改变率及频率       | 31~33 | 流量平均减少、增加率、每年流量逆转次数                 |

2.1. RVA 法

RVA 方法通过对天然流量下的指标进行处理分析找到 RVA 阈值来界定水文情势变化程度，并定义 IHA 值指标的 25%和 75%分位数为 RVA 的上下阈值范围。第  $i$  个 IHA 指标  $D_{RVA,i}$  和整体水文情势改变度  $D_{RVA}$  计算公式如下：

$$D_{RVA,i} = \left| \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad D_{RVA} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{RVA,i}^2 \right)^{1/2} \tag{1}$$

式中： $D_{RVA,i}$  为第  $i$  个 IHA 指标的水文改变度； $D_{RVA}$  为整体水文情势改变度； $N_{o,i}$  为第  $i$  个 IHA 指标受影响后仍落于天然情况下的 RVA 阈值内的个数； $N_e$  为按受影响前规律，预期受影响后的 IHA 指标落于 RVA 阈值内的个数； $N$  为 IHA 指标个数，本文中取 33。一般定义改变度值在 0%~33%间属于低度改变；33%~67%为中度改变；67%~100%为重度改变。

2.2. HMA 法

HMA 将每个 IHA 水文指标改变前后的分布用离散的直方图表示，基于受干扰前后直方图的频率向量之间的二次型距离，通过指定的相似性矩阵进行加权，计算出天然和受人类活动影响后直方图的不相似度。具体计算方法和步骤如下：

1) 确定直方图的区间数量  $n_c$ 

$$n_c = \frac{\frac{1}{n^3} \cdot r_i}{2 \cdot r_{iq}} \quad (2)$$

式中： $n_c$  是直方图的区间数量； $r_i$  是数据最大、最小值之差； $n$  是数据总数， $r_{iq}$  是四分位距，定义为 25% 分位数和 75% 分位数之间的差值。

2) 计算直方图的二次型距离  $d_Q$ 

$$d_Q(H, K) = \sqrt{(|h-k|)^T A (|h-k|)}, \quad A = [a_{ij}] \quad (3)$$

式中： $h = (h_1, h_2, \dots, h_{n_c})^T$  和  $k = (k_1, k_2, \dots, k_{n_c})^T$  分别是受干扰前、后的直方图  $H$ 、 $K$  的频率向量， $|h-k|$  是统计距离向量。 $A$  是体现区间关系的相似性矩阵，矩阵中元素的  $a_{st}$  表示区间  $s$  和  $t$  的相似度，取值范围  $0 \sim 1$ 。其计算与常数  $\alpha$  取值有关， $\alpha$  范围为 1 到  $\infty$ ， $\alpha$  越大变异性越小，保守起见本文取 1。计算如下：

$$a_{st} = \left(1 - \frac{d_{st}}{d_{\max}}\right)^\alpha, \quad d_{st} = |V_s - V_t|, \quad d_{\max} = \max(d_{st}) = |V_1 - V_{n_c}| \quad (4)$$

式中： $d_{st}$  为第  $s$  区间和第  $t$  个区间的差； $V_s$  和  $V_t$  分别是第  $s$  区间和第  $t$  个区间的平均值； $d_{\max}$  为区间的最大差，即第 1 个区间和第  $n_c$  个区间的差。

## 3) 计算水文情势改变度

计算出第  $i$  个指标的直方图不相似度  $D_{HMA,i}$  (即单个指标的水文情势改变度) 和整体水文情势改变度：

$$D_{HMA,i} = \frac{d_{Q,i}}{\max(d_{Q,i})} \times 100\%, \quad \max(d_{Q,i}) = \sqrt{2 + 2 \left(1 - \frac{1}{n_{c,i} - 1}\right)^\alpha} \quad (5)$$

$$D_{HMA} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{HMA,i}^2\right)^{1/2} \quad (6)$$

## 2.3. HCA 法

HCA 考虑了区间对应和跨区间的信息，故而 HCA 法首先计算干扰前后频率直方图的相似度，然后推导出改变度，从而保留了更多信息。该方法是由 HMA 法改进而来，故而划分频率直方图区间如式(2)，其余步骤如下：

$$S_i = \sqrt{S_i^{(1)} \times S_i^{(2)}}, \quad S_i^{(1)} = \sum_{t=1}^{n_{c,i}} \min(h_{t,i}, k_{t,i}), \quad S_i^{(2)} = \sum_{w=1}^{n_{c,i}} \min(h_{w,s,i}, k_{w,t,i}) \left(1 - \frac{|s-t|}{n_{c,i}}\right) \quad (7)$$

式中： $h_i = (h_{1,i}, h_{2,i}, \dots, h_{n_{c,i},i})$  和  $k_i = (k_{1,i}, k_{2,i}, \dots, k_{n_{c,i},i})$  的定义同式(3)， $h_{w,s,i}$  和  $h_{w,t,i}$  指将原直方图的区间重新排列所得的新直方图的频率向量(按频率由大到小依次排列)。 $S_i^{(1)}$  表示同区间的相似度，区间为  $[0,1]$ ， $S_i^{(2)}$  表示跨区间的相似度，区间为  $[0,1]$ 。 $S_i$  表示干扰前后水文指标频率直方图的相似度。

则第  $i$  个指标的改变度和整体水文情势改变度为：

$$D_{HCA,i} = (1 - S_i) \times 100\% \quad D_{HCA} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{HCA,i}^2\right)^{1/2} \quad (8)$$

## 2.4. RRVA 法

RRVA 法由 RVA 方法改进而来，同时考虑水文指标的频率差异和形态差异进行综合计算。故而其分为计算

频率差异  $F_m$  和计算形态差异  $D_{H,m}$  两部分。其计算步骤如下：① 频率差异计算参照 RVA 法， $F_i = D_{RVA,i}$ ；② 形态差异计算包含定义 Hasse 矩阵和计算 Hasse 距离两步。

首先是定义 Hasse 矩阵，假设  $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$  是一个包含  $n$  个元素的序列，并且每个元素是一个包含  $m$  个变量(属性)的向量。如果对于这  $m$  个变量( $i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$ )，存在  $q_i(k) > q_j(k)$  或  $q_i(k) < q_j(k)$ ，则  $Q$  中的两个元素  $q_i$  是  $q_j$  可比的。对于这  $m$  个变量均有，当  $q_i(k) > q_j(k)$  时， $q_i > q_j$ ；当  $q_i(k) < q_j(k)$  时，有  $q_i < q_j$ 。由此可定义出序列  $Q$  的 Hasse 矩阵。

$$H_{ij} = \begin{cases} +1 & q_i(k) > q_j(k), \forall k \in [1, m] \\ -1 & q_i(k) < q_j(k), \forall k \in [1, m] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

初始的 Hasse 矩阵是一个仅由 0 和  $\pm 1$  组成的反对称矩阵，对于本文中的水文指标， $n$  为序列的年数，元素的排序位置( $k=1$ )和大小( $k=2$ )作为改进水文指标(IHA)的两个变量(即  $m=2$ )来量化形态特征。序列  $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$  表示所选的 IHA 指标(即  $q_i(1)$  和  $q_i(2)$  分别表示第  $i$  年的“位置变量”和“大小变量”)。“位置变量”即年份序列；“大小变量”的定义为，将水文时间序列依照天然状态下的 RVA 边界划分为三个等级，低于下限(25%分位数)为低值，高于上限(75%分位数)为高值，在此之间的为中值，低、中、高值分别转换为 1、2、3。进而将 Hasse 矩阵的对角元素值进行转换：

$$H_{ii} = \frac{p_i}{p_{\max}} \quad (10)$$

其中  $p_i$  即为“大小变量”的转换值， $p_i=1, 2, 3$ ； $p_{\max}$  是所有转换后的最大值(一般为 3)。

其次开始计算 Hasse 距离，依照上述方法，定义出干扰前的 Hasse 矩阵  $H^{pre}$  和干扰后的 Hasse 矩阵  $H^{post}$ ，则两矩阵的 Hasse 距离  $D_H$  如下：

$$D_H = (1-w)D_o + wD_D \quad (11)$$

$$D_D = \frac{\sum_{i=1}^n |H_{ii}^{pre} - H_{ii}^{post}|}{n} \quad D_o = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |H_{ij}^{pre} - H_{ij}^{post}|}{n(n-1)/2} \quad (12)$$

式中： $D_D$  为矩阵的对角元素产生的距离， $D_o$  为非对角元素产生的距离，其元素的取值范围均为  $[0, 1]$ ， $w$  为常数，代表位置变量和大小变量的权重，取值范围是  $[0, 1]$ ，本文取 0.5 (即认为位置和大小权重相同)。算得的 Hasse 距离越小则两时间序列的相似度越高。

可以看到上述方法仅适用于大小相同的矩阵，而水文情势扰动前和扰动后的年数( $n_1$  和  $n_2$ )通常并不相同，故而需要进行适应性变化。假设  $n_1 > n_2$ ，扰动前、后的 Hasse 矩阵分别为  $H_1$  和  $H_2$ ，大小分别为  $n_1 \times n_1$  和  $n_2 \times n_2$ ，将  $H_1$  和  $H_2$ ，使  $H_2$  (小矩阵)从  $H_1$  (大矩阵)左上角沿对角线逐次移动到右下角，该过程中，两矩阵重叠了  $n_1 - n_2 + 1$  次，计算每次矩阵重叠部分的距离， $n_1 - n_2 + 1$  个距离中最小的就是  $H_1$  和  $H_2$  之间的 Hasse 距离。

通过  $F_i$  和  $D_{H,i}$  可得第  $i$  个指标的水文情势改变度(综合了频率差异和形态差异)和整体水文情势改变度：

$$D_{RRVA,i} = 1 - (1 - F_i)(1 - D_{H,i}) \quad D_{RRVA} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{RRVA,i}^2 \right)^{1/2} \quad (13)$$

## 2.5. CHAE 法

为综合上述计算方法的优点，王何予等提出了水文情势改变度综合估算法(CHAE) [11]。由于 HCA 法完全建立在 HMA 上，RRVA 法包含了 RVA 方法，为避免单一方法结果重复影响，故仅选择 HCA 和 HMA 法的结



果进行加权计算。

采用主客观融合法[17]进行赋权。主观赋权法选用层次分析法[18],认为 HCA 和 RRVA 方法的改变度表征了不同方面的信息,这些信息同等重要,故权重均赋为 0.5;客观赋权法选择熵值法[19]进行赋权,得到 HCA 和 RRVA 各自的客观权重为 0.42 和 0.58。采用融合主客观权重时,采用基于离差平方和的最优组合赋权法,得到层次分析法和熵值法的权重系数分别为 0.49 和 0.51。故而最后 HCA 法和 RRVA 法的权重分别取 0.46 和 0.54。

则 CHAE 法第  $i$  个指标和整体水文情势改变度计算公式分别为:

$$D_{CHAE,i} = 0.46D_{HCA,i} + 0.54D_{RRVA,i} \quad D_{CHAE} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{CHAE,i}^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

### 3. 数据资料

长江作为亚洲第一大河,全长约 6300 km,水流量高,河道落差大,具有极大的开发利用价值。长江流域先后陆续建成了大量水利工程,其中三峡水库是治理长江重要的控制性水库,三峡水库自 2003 年建成运行以来,在防洪、发电、航运等领域发挥着重要作用,同时也改变了长江中下游的水文情势。2014 年以来,雅砻江两河口、金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库陆续建成,河流的水文情势持续性发生着改变。

宜昌水文站是三峡水库的出库控制站,地处长江中上游分界处,集水面积约 100.6 万 km<sup>2</sup>,自 1877 年开始观测水位,1946 年开始测量流量,水文数据连续详实。本文采用 1949~2022 年间的日流量序列,开展水文情势改变度的分析研究。考虑流域内水利工程的开发建设进程,分别以三峡水库 2003 年蓄水和金沙江下游梯级水库 2014 年建成作为界,将流量序列划分为 1949~2002 年(代表天然流量序列)、2003~2014 年、2015~2022 年三个时期,计算分析宜昌站水文情势改变度。

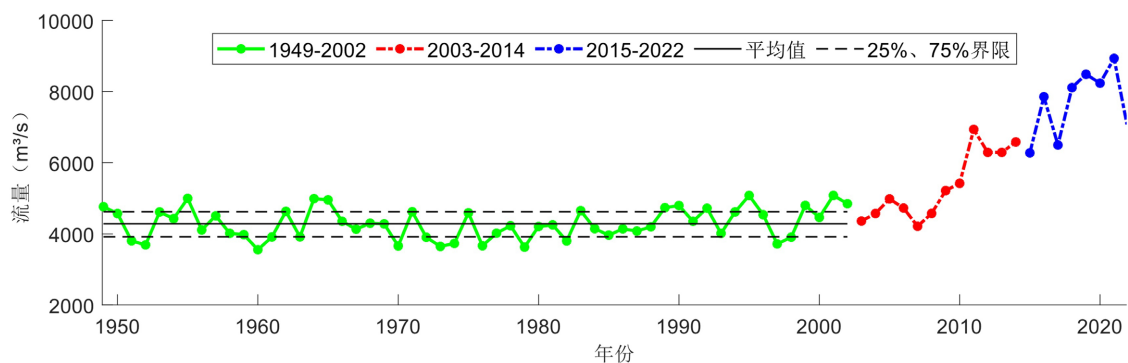
### 4. 计算结果比较分析

采用 33 个 IHA 指标和上述多种方法计算宜昌站水文情势改变度,结果见表 2。从总体上看,RVA 法算得的水文情势改变度要小于 RRVA 算得的改变度,HMA 法的水文情势改变度要小于 HCA 算得的改变度。不同计算方法的具体结果虽有所不同,但其趋势基本一致,不同算法算得的改变度基本属于同一区间内,同时 2015~2022 年间相较于 2003~2014 年间,水文情势改变度有明显提升。

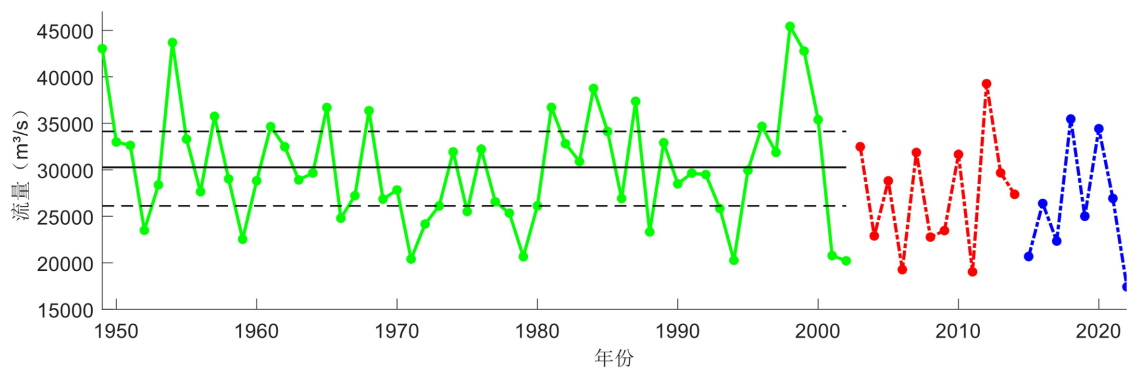
各种方法中,RVA 法部分结果与其他方法差异较大。如 RVA 法算得的 2003~2014 年间的 7、8、9 月平均流量改变度为 0,明显小于其他几种方法,这是由于 RVA 法仅从落在天然流量的 25%、75%分位数区间内的频率角度考虑,只要落在该区间的水文数据占半数,就认为改变度为 0,而其他方法计算时不同程度地考虑了水文序列的绝对值、形态分布、变化趋势等因素,故而不同于 RVA 法。图 1(a)为宜昌站 1 月平均流量变化过程,每年 1 月属枯水期,天然情况下的平均流量仅为 4282 m<sup>3</sup>/s,而在两段受影响序列中,水库起到了蓄丰补枯作用,平均流量显著增大,金沙江下游梯级水库稳定运行后的流量也更加稳定。三峡水库运行后(2003~2014 年间)前几年 1 月平均流量还落在天然流量的 RVA 区间内,自 2008 年起,1 月平均流量相较于天然流量陡然提高,全都落在天然流量的 RVA 区间外,水文情势剧烈变化。然而根据 RVA 法,仅从落在天然流量的 RVA 区间内的频率角度考虑,算得 2003~2014 年间水文情势改变度仅为 33.33%,但水文序列的绝对值,形态分布,变化趋势都发生明显变化,故而考虑了更多信息的 HMA、HCA、RRVA 法的计算结果较大。此外,因为 RVA 法仅从落在目标区间的频率角度出发计算,故还需要资料序列足够长,否则算得的水文情势改变度合理性不足,如 2015~2022 年的序列较短,RVA 法算得改变度就只有 0%、25%、50%、75%、100%五种,且出现了大量 0 和 100%这种极端结果,较短序列包含的信息过少,且极易受到干扰,例如 2015~2022 年序列,若某一年的水文指标实际恰好在上下限附近,该数据的微小误差(如观测误差,计算的舍入误差等)可使得其恰好落在或不落在天然流量的 RVA 区间内,改变度发生的变化可达 25%,仅从频率出发,评价的维度过于单一,有时难以全面反映水文情势的改变。

表 2. 不同方法计算的水文情势改变度

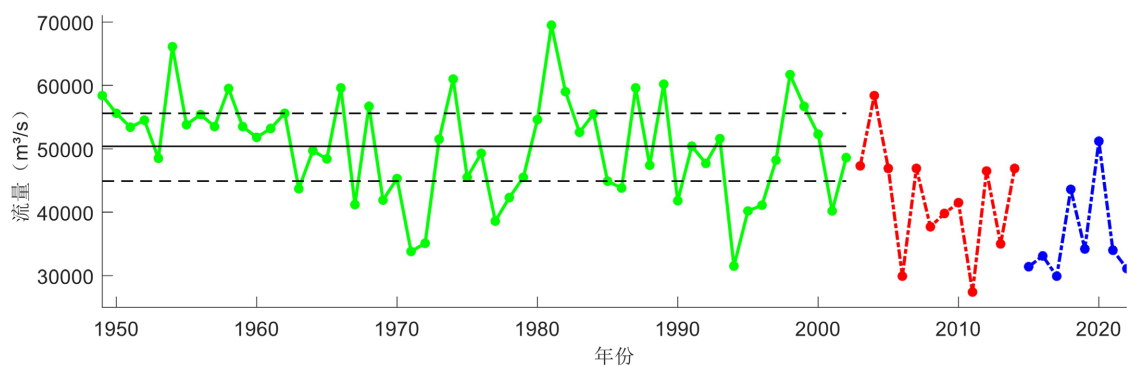
| IHA 指标                                       | 1949~2002<br>均值 | 2003~2014 |        |        |        |        | 2015~2022 |        |        |        |        |
|----------------------------------------------|-----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|                                              |                 | RVA       | HMA    | HCA    | RRVA   | CHAE   | RVA       | HMA    | HCA    | RRVA   | CHAE   |
| 1 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 4282            | 33.33%    | 36.34% | 48.84% | 43.52% | 45.97% | 100%      | 78.24% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 2 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 3844            | 100%      | 62.42% | 67.45% | 100%   | 85.03% | 100%      | 77.46% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 3 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 4320            | 66.67%    | 46.23% | 56.61% | 71.68% | 64.75% | 100%      | 80.57% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 4 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 6605            | 33.33%    | 37.14% | 38.64% | 41.33% | 40.09% | 100%      | 75.69% | 83.85% | 100%   | 92.57% |
| 5 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 11,628          | 33.33%    | 14.35% | 28.19% | 42.26% | 35.79% | 50%       | 43.92% | 47.52% | 56.25% | 52.23% |
| 6 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 18,131          | 33.33%    | 35.32% | 43.73% | 41.5%  | 42.53% | 25%       | 23.27% | 30.98% | 31.47% | 31.24% |
| 7 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 30,265          | 0         | 21.91% | 31.00% | 15.53% | 22.65% | 50%       | 27.12% | 30.82% | 57.29% | 45.11% |
| 8 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 27,497          | 0         | 16.66% | 18.30% | 13.38% | 15.64% | 25%       | 34%    | 34.88% | 32.81% | 33.76% |
| 9 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )    | 25,507          | 0         | 14.15% | 20.39% | 9.72%  | 14.63% | 25%       | 32.02% | 37.65% | 30.8%  | 33.95% |
| 10 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )   | 18,122          | 83.33%    | 56.64% | 57.42% | 85.33% | 72.49% | 50%       | 44.81% | 48.41% | 56.4%  | 52.72% |
| 11 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )   | 10,054          | 50%       | 42.16% | 44.65% | 55.30% | 50.40% | 75%       | 44.49% | 49.24% | 75%    | 63.15% |
| 12 月平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )   | 5881            | 50%       | 41.77% | 49.38% | 56.50% | 53.22% | 100%      | 59.86% | 61.24% | 100%   | 82.17% |
| 最小 1 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 3412            | 100%      | 51.05% | 65.24% | 100%   | 84.01% | 100%      | 76.61% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 最小 3 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 3439            | 83.33%    | 52.54% | 61.29% | 86.43% | 74.87% | 100%      | 76.77% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 最小 7 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 3493            | 100%      | 47.87% | 58.78% | 100%   | 81.04% | 100%      | 76.69% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 最小 30 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 3677            | 83.33%    | 61.78% | 69.82% | 86.34% | 78.74% | 100%      | 77.03% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 最小 90 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 4128            | 66.67%    | 51.31% | 56.25% | 72.01% | 64.76% | 100%      | 77.83% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 最大 1 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 50,389          | 16.67%    | 46.79% | 48.99% | 26.45% | 36.82% | 75%       | 59.33% | 67.54% | 78.94% | 73.70% |
| 最大 3 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 48,657          | 16.67%    | 41.28% | 41.99% | 28.77% | 34.85% | 50%       | 59.37% | 66.25% | 55.8%  | 60.61% |
| 最大 7 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )  | 44,134          | 16.67%    | 30.64% | 33.06% | 27.61% | 30.12% | 75%       | 61.14% | 65.32% | 77.46% | 71.88% |
| 最大 30 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 35,011          | 33.33%    | 35.70% | 36.37% | 43.86% | 40.41% | 75%       | 30.9%  | 34.74% | 77.16% | 57.65% |
| 最大 90 d 流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 28,546          | 16.67%    | 22.81% | 29.49% | 25.08% | 27.11% | 50%       | 37.94% | 36.31% | 56.40% | 47.16% |
| 基流指数                                         | 1.77            | 66.67%    | 58.4%  | 69.38% | 72.18% | 70.89% | 100%      | 80.95% | 100%   | 100%   | 100%   |
| 断流天数(d)                                      | 0               | 0         | 0      | 0      | 0      | 0      | 0         | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 最小流量时间(d)                                    | 56.52           | 33.33%    | 34.16% | 35.47% | 43.94% | 40.04% | 25%       | 30.60% | 34.50% | 33.04% | 33.71% |
| 最大流量时间(d)                                    | 212.67          | 0         | 30.22% | 33.80% | 8.59%  | 20.19% | 25%       | 19.80% | 28.03% | 34.38% | 31.46% |
| 低流量脉冲次数                                      | 6.17            | 33.33%    | 24.33% | 28.71% | 39.39% | 34.48% | 25%       | 47.85% | 48.62% | 31.47% | 39.36% |
| 低流量脉冲历时(d)                                   | 16.33           | 33.33%    | 18.85% | 18.86% | 43.27% | 32.04% | 0         | 32.81% | 32.71% | 6.85%  | 18.75% |
| 高流量脉冲次数                                      | 3.85            | 83.33%    | 65.40% | 68.23% | 85.63% | 77.63% | 50%       | 50.46% | 57.9%  | 54.91% | 56.29% |
| 高流量脉冲历时(d)                                   | 28.06           | 83.33%    | 65.26% | 64.49% | 85.86% | 76.03% | 50%       | 55.07% | 52.76% | 56.55% | 54.81% |
| 流量增加率(%)                                     | 7.49            | 50%       | 41.84% | 46.49% | 54.23% | 50.67% | 100%      | 75.19% | 77.55% | 100%   | 89.67% |
| 流量减少率(%)                                     | 4.29            | 66.67%    | 45.17% | 45.67% | 71.51% | 59.62% | 0         | 33.30% | 39.91% | 7.74%  | 22.54% |
| 流量逆转次数                                       | 84.13           | 100%      | 68.64% | 73.29% | 100%   | 87.71% | 100%      | 83.71% | 91.25% | 100%   | 95.98% |
| 整体改变度                                        |                 | 57.73%    | 43.37% | 48.48% | 61.46% | 55.10% | 72.56%    | 57.92% | 68.66% | 74.33% | 71.33% |



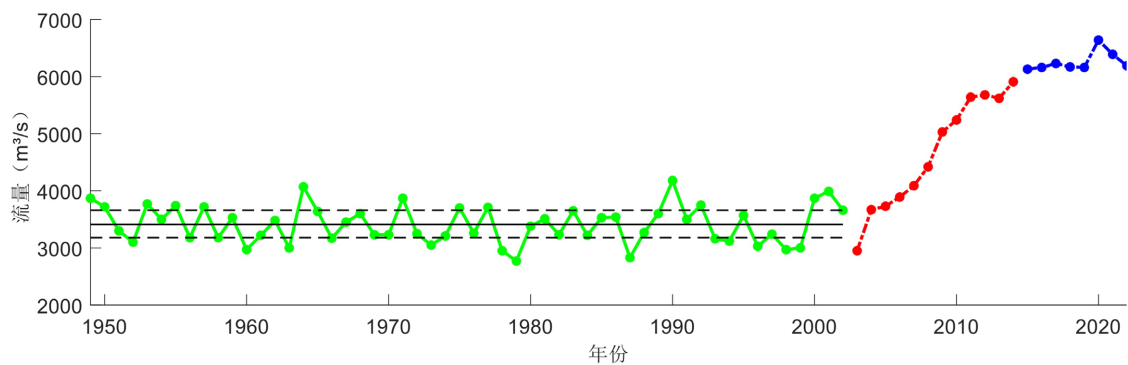
(a) 宜昌站 1 月平均流量变化过程



(b) 宜昌站 7 月平均流量变化过程



(c) 宜昌站最大日流量变化过程



(d) 宜昌站最小日流量变化过程

图 1. 宜昌站部分 IHA 因子变化过程



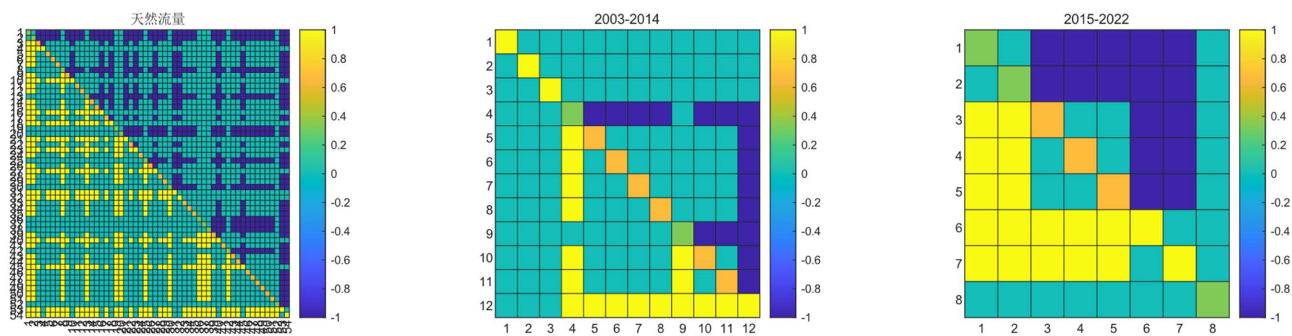


图 2. 宜昌站最大流量出现时间 Hasse 图

HMA、HCA、RRVA 法均在一定程度上解决了上述问题。HMA 改变了计算思路，通过直方图遍历了资料序列中的所有数值，以计算直方图的二次型距离代替了单纯频率的计算，并通过相似性矩阵体现了不同区间的关系，避免了信息丢失，降低了极端值对计算结果的影响。HCA 则进一步修正 HMA 方法，着重解决了后者未充分考虑跨区间变化的问题，通过相似性间接推求改变度，所求结果更符合实际。RRVA 法虽然与 RVA 法一脉相承，但多考虑了数据序列的形态差异，通过定义 Hasse 矩阵并计算 Hasse 距离推求水文情势改变度。

图 2 为宜昌站最大流量出现时间 Hasse 图，图中矩阵均为反对称矩阵，颜色越深代表绝对值越大，通过元素的大小及正负可以展现水文指标随时间变化的趋势。例如，从图 2 可以看出最大流量出现时间的改变，而 RVA 法算得 2003~2014 该指标改变度为 0，体现了 RRVA 法对 RVA 法的修正。不过，由于 RRVA 建立在 RVA 之上，且计算直接用到了 RVA 法的结果( $F_i$  即 RVA 法算得的水文情势改变度)，故而只要某指标用 RVA 法算得结果为 100%，则 RRVA 法的结果也必为 100%，这样就无法体现 RRVA 所额外考虑的信息带来的影响。

CHAE 法通过赋权平均，融合不同方法的优势，结合了 HCA 和 RRVA 的计算结果，得到综合水文改变度，以保留各水文改变指标的分布情况、形态和时空差异信息。以下重点分析 CHAE 法的计算结果。图 3 展示了各时期宜昌站平均每月径流量，自水库兴建以来，12 月至次年 5 月的平均流量普遍有所提升，7 月至 10 月的平均流量则普遍有所下降。而在随着水库建设的不同阶段，具体的变化又有所不同，一些月份(1 月、7 月等)在 2003~2014 年、2015~2022 年的变化趋势一致(流量持续提高或降低)；10 月的平均流量则在 2003~2014 年间有所下降，而 2015~2022 年间又有所回升；每年平均流量最大的是 7 月，在水库兴建以来的两段时期内连续下降，7 月份流量变化过程如图 1(b)所示，7 月份流量极值出现在 1998 年的特大洪水，得益于水库的建设运行，2003~2014 年间 7 月流量呈现平均值降低，最大值减小，波动性降低的特点，用 RVA 法算得其改变度为 0 显然并不合理；宜昌站最大日流量的变化如图 1(c)所示，呈显著降低的趋势，体现了水库调洪的功能；宜昌站最小日流量的变化如图 1(d)所示，呈显著增加的趋势，特别是金沙江下游梯级水库建成后，最小日流量变为天然情况下的近两倍，且非常稳定，体现了水库枯枯的功能。表 3 和图 4 分别给出各组及整体水文改变度，各种方法结果趋势基本一致，揭示的规律也基本相同。

表 3. 各组及整体水文改变度(%)

| IHA 指标组别 | 2003~2014 |       |       |       |       | 2015~2022 |       |       |       |       |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|          | RVA       | HMA   | HCA   | RRVA  | CHAE  | RVA       | HMA   | HCA   | RRVA  | CHAE  |
| 月均值流量    | 50.69     | 38.60 | 44.52 | 55.00 | 49.86 | 73.60     | 55.75 | 66.05 | 75.43 | 70.78 |
| 年极端流量    | 61.24     | 44.86 | 51.45 | 64.65 | 58.09 | 82.60     | 64.14 | 79.45 | 83.90 | 81.56 |
| 极端流量出现时间 | 23.57     | 32.25 | 34.65 | 31.66 | 31.71 | 25.00     | 25.77 | 31.43 | 33.72 | 32.60 |
| 流量脉冲情况   | 63.46     | 48.69 | 49.99 | 67.32 | 59.21 | 37.50     | 47.29 | 48.91 | 42.57 | 44.92 |
| 流量变化率    | 75.16     | 53.24 | 56.62 | 77.58 | 67.86 | 81.65     | 67.75 | 72.88 | 81.77 | 76.94 |
| 整体改变度    | 57.73     | 43.37 | 48.48 | 61.46 | 55.10 | 72.56     | 57.92 | 68.66 | 74.33 | 71.33 |

可以看到月均值流量、年极端流量、流量变化率的改变程度较大。各月平均流量中，枯水期流量普遍增大，汛期流量普遍减小，体现了水库有效的调节作用，2015~2022 年间改变度要比 2003~2014 年间改变度大，这与诸多水利设施陆续建成，逐步形成梯级水库群，调蓄能力增强的事实是相符的。在极值流量中，年最大流量减小，年最小流量增大，2003~2014 年间改变程度相对较小，基本介于中度和重度改变之间。在 2015~2022 年间各项指标基本都发生了重度改变，最小流量的改变程度要显著高于最大流量，最小 1d、3d、7d、30d、90d 流量改变程度均达 100%，水库兴建后可以显著改善下游枯水期的用水问题。水库还影响了径流的时间分配，2015~2022 年最小、最大流量出现时间均缩短，两个指标均发生中度改变，时间分配更加均匀。此外低流量脉冲指标平均值几乎没有变化，改变度均呈中轻度改变；高流量脉冲次数显著增大，平均单次历时大幅度下降。流量变化率的变化比较显著，流量减少率均值变化不大，但在 2003~2014 年间为中度改变，2015~2022 年间为轻度改变，说明流量减少率的波动性发生了较大改变。流量增加率均值显著下降，在两段时期内均为重度改变，说明流量增加时过程更加平缓，变化的幅度减小，受人为调控明显。同时流量逆转次数显著增加。

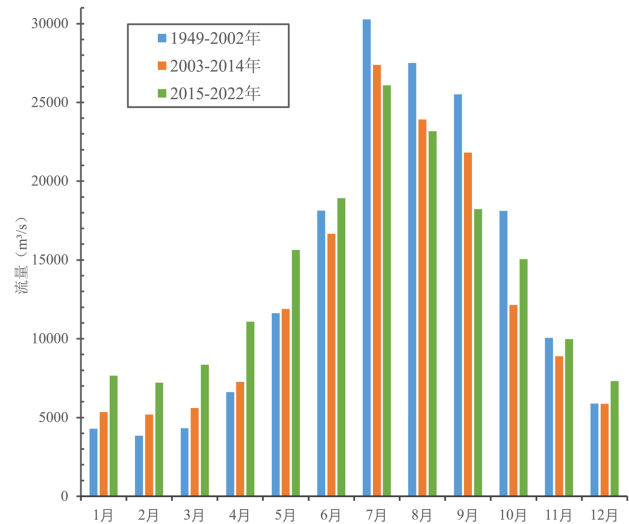


图 3. 宜昌站月均径流量统计图

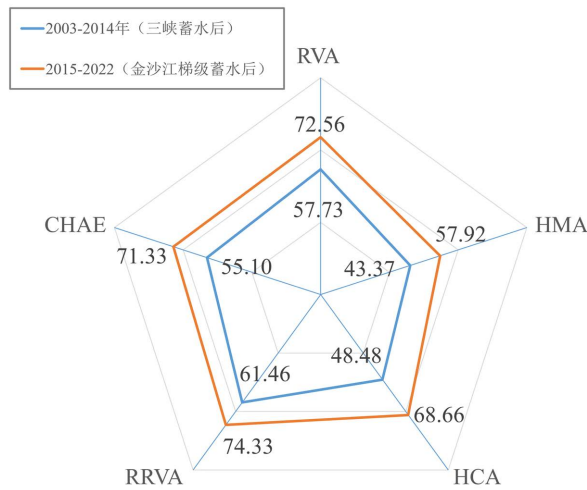


图 4. 不同计算方法的整体水文情势改变度雷达图(%)

结合上述分析,水文情势的改变方向与水库年内调节,削峰填谷,拦蓄洪水的功能是一致的。若以三峡水库开始蓄水为界限,2003~2014 年整体水文情势均为中度改变,CHAE 法得到的改变度为 55.10%。若考虑长江上游水库群的建设进程,以金沙江下游梯级水库建成运行为界限,则 2015~2022 年间的整体水文情势改变度明显变大,仅 HMA 法为中度改变,其他方法中均属于重度改变,CHAE 法的改变度为 71.33%。

## 5. 结论

本文基于宜昌水文站的 1949~2022 年间的日流量数据,通过 RVA、HMA、HCA、RRVA、CHAE 五种方法,定量比较分析了宜昌站的水文情势改变度,主要结论如下:

1) 单一的水文情势改变度的评价方法存在局限性,部分计算结果不够合理,综合多种方法有助于全面对水文情势改变度进行评估。

2) 宜昌站水文情势受长江上游水库群建设进度影响。采用三峡水库蓄水前 1949~2002 年水文资料为天然流量序列。依据 CHAE 法计算结果,三峡水库蓄水后(2003~2014 年)水文情势呈中度改变(55.10%);金沙江下游梯级水库建成运行后(2015~2022 年),宜昌站水文情势发生了重度改变(71.33%)。

3) 各组水文情势改变度,充分反映了水库削峰填谷、蓄洪补枯的作用,即汛期流量减少,枯水期流量增多。低流量脉冲历时显著减低,极端流量出现时间减少,流量变化率放缓,流量逆转次数明显增加。

## 基金项目

中国长江电力股份公司项目(Z242402005)和国家自然科学基金长江联合基金(U2340205)资助。

## 参考文献

- [1] RICHTER, B., BAUMGARTNER, J., POWELL, J., et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- [2] RICHTER, B., BAUMGARTNER, J., WIGINGTON, R., et al. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
- [3] OLDEN, J. D., POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- [4] DUAN, W., GUO, S., WANG, J., et al. Impact of cascaded reservoirs group on flow regime in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Water*, 2016, 8(6): 218. <https://doi.org/10.3390/w8060218>
- [5] 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. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00306-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00306-1)
- [6] PETTIT, N. E., FROEND, R. H. and DAVIES, P. M. Identifying the natural flow regime and the relationship with riparian vegetation for two contrasting western Australian rivers. *Regulated Rivers Research & Management*, 2001, 17(3): 201-215. <https://doi.org/10.1002/rrr.624>
- [7] MAINI, J. K., MARSH, S. E. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1): 53-79. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0860>
- [8] SHIAU, J. T., WU, F. C. A histogram matching approach for assessment of flow regime alteration: Application to environmental flow optimization. *River Research and Applications*, 2008, 24(7): 914-928. <https://doi.org/10.1002/rra.1102>
- [9] HUANG, F., LI, F., ZHANG, N., et al. A histogram comparison approach for assessing hydrologic regime alteration. *River Research and Applications*, 2017, 33(5): 809-822. <https://doi.org/10.1002/rra.3130>
- [10] ZHENG, X., YANG, T., CUI, T., et al. A revised range of variability approach considering the morphological alteration of hydrological indicators. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 35(9): 1783-1803. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01926-6>
- [11] 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*, 2023, 21(3): 447-456, 479.
- [12] GAO, B., YANG, D., ZHAO, T., et al. Changes in the eco-flow metrics of the upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 2012, 448-449: 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.045>
- [13] ZHANG, X., DONG, Z., GUPTA, H., et al. Impact of the Three Gorges Dam on the hydrology and ecology of the Yangtze River. *Water*, 2016, 8(12): 590. <https://doi.org/10.3390/w8120590>

- [14] WANG, Y., TAO, Y., SHENG, D., et al. Quantifying the change in streamflow complexity in the Yangtze River. *Environmental Research*, 2020, 180: 108833. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108833>
- [15] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 120-130.
- [16] 钟斯睿, 郭生练, 谢雨祚, 等. 长江流域上游水文情势变化分析计算[J]. *水资源研究*, 2023, 12(4): 347-357.
- [17] 陈伟, 夏建华. 综合主客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. *数学的实践与认识*, 2007(1): 17-22.
- [18] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2021, 19(1): 67-74.
- [19] 曾浩, 申俊, 江婧. 长江经济带资源环境承载力评价及时空格局演变研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 89-96.