

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221023

# 基于不同改进 RVA 法的水利工程对清江流域生态水文情势综合影响分析

丁 欣<sup>1a,1b</sup>, 陈燕飞<sup>1a,1b</sup>, 郭 卫<sup>2</sup>, 喻 婷<sup>3,4</sup>

(1. 长江大学 a. 油气地球化学与环境湖北省重点实验室; b. 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100;  
2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430000; 3. 湖北省水利水电科学研究所, 湖北  
武汉 430070; 4. 湖北省水利水电科技推广中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 科学评估水文情势是开展河流生态环境健康评价的重要组成部分。采用 IHA 指标定量评估了清江流域水利工程建设期和运行期高坝洲站的水文指标改变度, 在分析 5 组不同 IHA 指标的变化规律的基础上, 通过选用基于内梅罗指数法的 RVA 法、基于欧氏距离法的 RVA 法和考虑综合权重的 RVA 法三种不同的 RVA 法分析了清江流域整体水文情势改变情况。结果表明, 工程建设期和综合利用期三种方法对清江流域水文情势分析结果分别为中度改变和高度改变, 且清江流域水文情势改变度有增大趋势, 考虑综合权重的 RVA 法评价结果与其他两种方法评价结果相近且具有合理性, 能较好地体现清江流域水利工程建设后河流水文情势变化情况。

**关键词:** 生态水文情势; 基于内梅罗指数法的 RVA 法; 基于欧氏距离法的 RVA 法; 改进的 RVA 法; 清江流域

中图分类号: TV121<sup>+</sup>.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-7709(2023)05-0022-04

## 1 概况

清江流域为湖北省境内长江中游第二大支流, 水能水资源充沛, 干流全长 423 km, 总落差 1 430 m, 流域总面积 16 714 km<sup>2</sup>, 流域雨量充沛, 年平均降雨量 1 415 mm。清江干流自下而上有高坝洲水电站、隔河岩水利枢纽、水布垭水电站和大龙潭水利枢纽共四个水利工程。其中隔河岩水利枢纽最早开工, 于 1987 年开始建设, 1996 年建成; 最晚建设的是大龙潭水利枢纽, 2003 年开始建设, 2008 年通过竣工验收。人类在河流上大量修建水利水电工程, 使得河流水文情势较易发生改变, 从而使得河流生态环境的健康受到一定的影响。因此科学评估水文情势对开展河流生态环境健康评价和维护河流生态环境具有重要意义。变异范围法(RVA)<sup>[1]</sup>通过河流的流量大小、发生时间、频率、持续时间及变化率等 5 个方面 33 个水文指标来评估河流水文情势的变化。目前, 关

于 RVA<sup>[2]</sup>法的相关研究也较多, 如史卫东<sup>[3]</sup>考虑 IHA 指标周期性影响, 结合小波分析法对 RVA 法进行改进; 朱迪等<sup>[4]</sup>基于分组赋权和改进的内梅罗指数法对 RVA 法进行改进; 顾玉娇等<sup>[5]</sup>采用主成分分析法对 IHA 法中最相关的指标进行分析; 张如强等<sup>[6]</sup>主要考虑典型年对水文情势的影响, 但鲜有研究考虑 IHA 指标权重对整体水文情势的影响。为此, 本文提出了一种改进的 RVA 法, 即在赋予 IHA 指标主客观权重的基础上, 将主客观权重相结合成综合权重, 根据综合权重及 IHA 指标水文改变度求得整体水文情势改变度, 并将该方法应用于清江流域中, 最后通过基于内梅罗指数法的 RVA 法、基于欧氏距离法的 RVA 法两种方法对综合权重法结果进行验证, 以期为河流水文情势评估提供一种科学合理的评估方法。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

高坝洲站位于高坝洲水电站坝下, 为清江流

收稿日期: 2022-05-15, 修回日期: 2022-08-04

基金项目: 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心资助项目(KF201917)

作者简介: 丁欣(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态水文学, E-mail: 2957673066@qq.com

通讯作者: 陈燕飞(1982-), 男, 博士、副教授, 研究方向为生态水文学与河流生态环境修复, E-mail: flyney@163.com

域的控制站,反映了清江流域水文情势,故选取基础资料为高坝洲水文站 1951~2019 年逐日平均流量(高坝洲水文站原名为长阳水文站)。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 传统 RVA 法

传统 RVA 法通过计算 33 个 IHA 指标偏离度评估河流水文情势变化,各分组 IHA 指标见表 1。

表 1 IHA 指标分组及相关指标

Tab. 1 IHA indicator grouping and related indicators

水文指标分组	IHA 指标
各月流量	1~12 月流量均值
年极端流量	年最大和最小 1、3、7、30、90 d 流量均值及断流天数和基流指数
极端流量发生时间	年最大和最小 1 d 流量发生时间
高低流量频率及延时	年发生高、低流量次数及平均延时
流量变化率及改变率	流量增加和减少率及流量逆转次数

单个 IHA 指标的改变化度:

$$D_i = |(N_i - N_e) / N_e| \times 100\% \quad (1)$$

其中  $N_e = rN_i$  (2)

式中,  $D_i$  为第  $i$  个 IHA 的水文改变化度;  $N_i$ 、 $N_e$  分别为水利设施兴建后第  $i$  个指标落入 RVA 阈值内的实际年数、预期年数;  $r$  为水利设施兴建前各指标落入 RVA 阈值范围内的比例;  $N_i$  为水利设施兴建后有记录的总年数。

河流的整体水文情势改变化度  $D_0$ :

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2} \quad (3)$$

式中,  $D_0$  为整体水文改变化度,一般定义  $D_i$ 、 $D_0$  值介于 0~33% 间为无或低度改变; 33%~67% 间为中度改变; 67%~100% 为高度改变。

### 2.2.2 改进的 RVA 法

(1) 基于内梅罗指数法的改进的 RVA 法。传统 RVA 法忽略高、低 IHA 指标之间差异性的影响,使得整体水文情势改变化度偏低,薛联青等<sup>[7]</sup>提出以内梅罗指数法对 RVA 法进行改进,计算方法为:

$$D' = \sqrt{(D'_{j\max}{}^2 + D_w^2) / 2} \quad (4)$$

其中  $D'_{j\max} = (D_{j\max} + D_w) / 2$  (5)

$$D_w = \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i \quad (6)$$

式中,  $D'$  为改进 RVA 法整体水文改变化度;  $D_{j\max}$  为单个 IHA 指标改变化度最大值;  $D_w$  为 33 个 IHA 指标改变化度平均值。

(2) 考虑典型年影响并基于欧氏距离的改进的 RVA 法。传统 RVA 法未考虑典型年影响,张舒羽等<sup>[8]</sup>采用欧氏距离法对 RVA 法进行改进,对丰、平、枯水年分别赋值 2、1、0,径流突变前后

典型年份的分布情况为  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  和  $(B_1, B_2, \dots, B_n)$ , 计算方法为:

$$D' = 1 - (1 - D_0)(1 - S) \quad (7)$$

其中  $S = E_D / [T \min(\sqrt{a}, \sqrt{b})]$  (8)

$$E_D = \begin{cases} \sqrt{\sum_i^a (A_i - B_i)^2} & a = b \\ \min \sqrt{\sum_i^b (A_{k+1} - B_i)^2} & a > b \\ \min \sqrt{\sum_i^a (A_i - B_{k+1})^2} & a < b \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $D'$  为改进 RVA 法整体水文改变化度;  $k = 0, 1, 2, \dots, n - k$ ;  $E_D$  为欧氏距离  $S$  为标准化后的欧氏距离。

(3) 考虑综合权重的 RVA 法。本文提出一种改进的综合权重 RVA 法,通过层次分析法<sup>[9]</sup>和空间向量法求出各 IHA 指标主客观权重,再将主客观权重相结合求得综合权重,根据综合权重求得河流整体水文情势变化。基于层次分析法<sup>[9]</sup>在考虑各指标与环境之间相互联系的基础上,通过构建 IHA 指标两两比较矩阵,求得各 IHA 指标的主观权重  $\omega_{1i}$ 。基于空间向量法,每一个 IHA 指标改变化度均可视为是河流整体水文情势改变化度的一个分量,因而,33 个 IHA 指标即构成了一个 33 个不同方向的空间向量,将 33 个 IHA 指标共同反映的水文情势视为是一个向量,因此可根据空间向量法求得每个 IHA 指标的客观权重  $\omega_{2i}$ 。参考最小相对信息熵法<sup>[10]</sup>,将主客观权重相结合,得到各 IHA 指标综合权重,具体计算公式为:

$$\omega_i = (\omega_{1i} \omega_{2i})^{0.5} / \sum_{i=1}^{33} (\omega_{1i} \omega_{2i})^{0.5} \quad (10)$$

式中,  $\omega_i$  为综合权重;  $\omega_{1i}$  为主观权重;  $\omega_{2i}$  为客观权重。

最后将各 IHA 指标与各自权重相乘求得整体水文情势改变化度,整体水文改变化度  $D'$  为:

$$D' = \sum_{i=1}^{33} D_i \omega_i \quad (11)$$

改进的 RVA 法仍采用原来 RVA 法等级划分方法。

## 3 应用

### 3.1 IHA 指标分析

根据清江流域干流水利工程建设始末时间点将清江流域 1951~2019 年径流数据分为三个时

期,第一个时期为天然时期(1951~1986年),第二个时期为水利工程建设期(1987~2008),第三个时期为水利工程综合利用期(2009~2019),本文以清江流域天然时期为基础,对建设期和综合利用期清江流域的水文情势进行分析。

第一组水文指标,高坝洲站三个时期径流年内分配见图1。由图1可知,工程建设期日均流量中度及以上改变的月份为1、2、12月,改变度分别为84.4%、61%、81.8%,综合利用期日均流量7、8、9、11月为低度改变,中高改变度指标数量较水利工程建设期有所增加;两个时期高坝洲站枯水期径流量均有不同程度的增大,汛期径流量均有不同程度减少,但年内径流分配趋于均匀化,这是由于水利工程发挥了“蓄丰补枯”的作用。对比发现综合利用期流量均匀化程度更高,这是由于综合利用期清江流域多个水利工程调蓄作用较工程建设期调蓄作用更强。

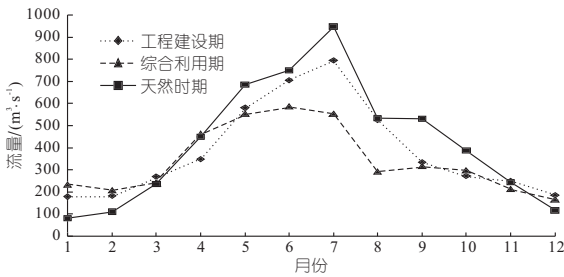


图1 清江流域径流年内分配

Fig. 1 Annual runoff distribution in Qingjiang River Basin

第二组水文指标,高坝洲站工程建设期中度及以上改变度有8个指标,无高度改变指标;综合利用期中度及以上改变指标有10个指标,其中高度改变指标有5个,分别为1d最小流量、1d最大流量、7d最小流量、90d最大流量和基流指数,其变化趋势见图2。由图2可知,各指标均值均呈下降趋势,且综合利用期各指标均值均小于工程建设期。其中综合利用期年最小1d流量和基流指数均未落入RVA阈值范围内,其改变度均为100%;工程建设期和综合利用期多数极端流量指标达到中度改变及以上。除受到水利工程的调蓄作用的影响外,还可能与清江流域降雨量的减少有关<sup>[11]</sup>。

第三组水文指标,两个时期高坝洲站年最小流量出现时间均值较天然时期分别延后99、67d,均为低度改变,两个时期最大流量出现时间均值较天然时期提前5、21d,均为中度改变。

第四组水文指标,高坝洲站高、低脉冲出现次数并未有太大的改变,但两个时期低脉冲平均持续时间较天然时期分别减少9、13d,改变度分别

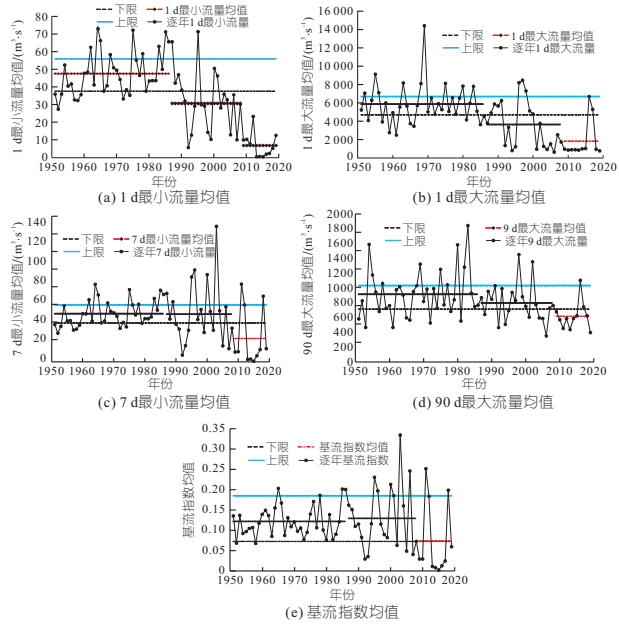


图2 清江流域1d最小、1d最大、7d最小、90d最大和基流指数变化趋势

Fig. 2 The change trend of 1 d minimum, 1 d maximum, 7 d minimum, 90 d maximum and fundamental flow index in the Qingjiang River Basin

为82.8%、100%;高脉冲平均持续时间较天然时期分别增加2、4d。

第五组水文指标,两个时期高坝洲站日均流量增加率均为63.6%,为中度改变,日均流量减少率和流量逆转次数均为高度改变,流量减小率在水利工程建设后呈显著下降趋势,且两个时期流量减小率均小于RVA下限。

对比两个时期的低、中、高改变度的IHA指标数量,发现工程建设期低、中、高度改变的IHA指标分别为16、12、5个,低度改变和中度改变的IHA指标比例较高。综合利用期低、中、高度改变的IHA指标分别为9、12、12个,中度改变、高度改变的IHA指标比例较高,说明综合利用期多个水利工程共同作用对清江流域水文情势影响较工程建设期高。

### 3.2 整体水文改变度分析

采用传统的RVA法计算高坝洲站工程建设期和综合利用期水文情势整体水文改变度分别为46.19%、64.33%,均为中度改变;三种不同的改进RVA法对清江流域两个时期水文情势改变度计算结果见表2~4。由表3、4可知,基于内梅罗指数改进的RVA法对清江流域两个时期整体水文改变度计算结果分别为50.64%、68.25%,两个时期典型年变化的欧氏距离分别为4.36、3,基于欧氏距离改进的RVA法对清江流域两个时期整体水文改变度计算结果分别为51.77%、69.19%,

两个时期清江流域分别为中度、高度改变。

表 2 考虑综合权重的 RVA 法计算结果

Tab. 2 Calculations based on the RVA method considering the comprehensive weights

组别	主观权重	客观权重		综合权重		各分组水文改变度	
		工程	综合	工程	综合	工程	综合
		建设期	利用期	建设期	利用期	建设期	利用期
第一组	0.346	0.287	0.301	0.300	0.322	13.62	17.96
第二组	0.398	0.330	0.424	0.369	0.411	15.63	31.02
第三组	0.045	0.044	0.039	0.045	0.040	1.56	1.96
第四组	0.115	0.156	0.094	0.140	0.103	7.90	5.83
第五组	0.097	0.183	0.141	0.146	0.123	11.07	11.09
水文改变度 $D'/\%$						49.78	67.85

表 3 基于内梅罗指数的 RVA 法计算结果

Tab. 3 Calculations based on the RVA method of the Nemer index

项目	$D_w$ (水文改变度均值)/%	$D_{jmax}$ (最大水文改变度)/%	水文改变度 $D'/\%$
工程建设期	37.55	84.42	50.64
综合利用期	56.51	100.0	68.25

表 4 基于欧氏距离法的 RVA 法计算结果

Tab. 4 Calculation based on the RVA method based on the European distance method

项目	$D_0/\%$	$E_D$ (欧氏距离)	S(标准化后的欧氏距离)	水文改变度 $D'/\%$
工程建设期	46.19	4.36	0.104	51.77
综合利用期	64.33	3.00	0.136	69.19

对比表 2、3 发现,传统 RVA 法忽略了高改变度与低改变度 IHA 指标之间差异性影响,使得计算结果低于实际结果,基于内梅罗指数法的 RVA 法考虑了高改变度指标对整体水文情势改变度的影响,基于欧氏距离的 RVA 法考虑不同典型年对整体水文情势改变度的影响,本文提出的考虑综合权重的 RVA 法计算两个时期高坝洲站水文改变度分别为 49.78%、67.85%,与两种改进的 RVA 法计算结果接近,均为中度、高度改变,评价结果具有一致性;由表 2~4 可看出,三种不同方法对清江流域整体水文改变度的计算结果均为综合利用期流域整体水文情势改变度均大于工程建设期,且清江流域整体水文情势改变度有增大趋势。

## 4 结论

a. 从工程建设期、综合利用期两个时期各 IHA 指标的改变度及其所占权重分析低度、中度、高度改变度对整体河流水文改变度的影响。建设期低度改变的指标多,但权重小,评估结果为

中度改变;综合利用期高度改变指标数量最多,且所占权重最大,评估结果为高度改变,评价结果符合客观事实具有合理性。

b. 通过对比两种不同改进的 RVA 法计算结果,发现本文考虑综合权重的 RVA 法对两个时期清江流域水文情势较两种改进的 RVA 法计算结果相近,且建设期和综合利用期评价等级相同,说明本方法较传统 RVA 法能较好地反映清江流域水文情势改变情况。

c. 采用本方法评估清江流域两个时期水文情势,评价结果具有合理性。但仍需评估更多流域水文情势以验证该方法的普适性。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李旦, 徐文, 叶长青, 等. 气候变化和人类活动干扰下万泉河流域水文情势变化特征分析 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 14-17.
- [3] 史卫东. 考虑 IHA 指标周期性的水文情势评估方法 [J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 46-49, 54.
- [4] 朱迪, 梅亚东, 吴贞晖, 等. 基于分组赋权和改进内梅罗指数的赣江中下游整体水文改变度计算 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(12): 1048-1055.
- [5] 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, 87.
- [6] 张如强, 刘俊国, 冒甘泉, 等. 基于改进 RVA 法的黑河上游水文情势变化分析 [J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 29-38.
- [7] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 189-196.
- [8] 张舒羽, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄土高原典型流域河川径流水文情势变化及其归因分析 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 1-8.
- [9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [10] 张彦霞, 肖清泰, 肖汉杰, 等. 组合权重优化的企业财务绩效可变模糊综合评价模型 [J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(3): 64-74.
- [11] 朱春红, 何明琼, 马安国. 气候变暖背景下清江流域降雨量变化特征研究 [J]. 水电与新能源, 2011(3): 49-51.

日~5月20日,K-means 聚类法的结果为1月11日~5月10日。集对分析法与 K-means 聚类法两种方法计算结果一致,系统聚类法的融雪期时段相对滞后。

b. 结合流域积雪深度与积雪覆盖率数据对分期结果的合理性分析表明,丹巴以上流域枯季径流过程可大致分为三个阶段,前期地表积雪增加,未产生融雪径流;中期积雪开始融化,此时以融雪径流为主;后期临近汛期,流域降水逐渐增多,流量增幅较大,以降雨径流为主,但仍有部分融雪径流。因此,最终确定的大渡河流域主融雪期为1月11日~5月10日。

c. 本文仅选取了11年枯季资料进行融雪期分析,结论具有一定的不确定性。未来随着资料的累积应做进一步的分析论证。

参考文献:

[1] 田琳. 中温带地区春季融雪径流研究[D]. 长春: 吉林

林大学,2019.

[2] AGGARWAL C C, REDDY C. Data clustering: algorithms and applications[M]. Chapman & Hall/CRC, 2013.

[3] 陈守煜, 赵瑛琪. 汛期的模糊集模式及其应用[J]. 水电能源科学, 1989,7(3): 211-219.

[4] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J]. 水文, 2005(1): 18-23.

[5] 谢飞, 王文圣. 集对分析在汛期分期中的应用研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011,9(1): 60-63.

[6] 蒋海艳, 莫崇勋, 魏炜, 等. 灰色定权聚类法在水库汛期分期中的应用[J]. 水力发电, 2012,38(12): 8-10.

[7] 刘浅奎, 王文圣, 余思怡, 等. 熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 16-22.

[8] KAUFMAN L, ROUSSEEUW P J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis [M]. John Wiley & Sons, 2009.

### Classification of Snowmelt Periods in Daduhe River Basin

LI Bin-quan, RONG Wei-guang, WU Ya-qi, LIANG Zhong-min

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

**Abstract:** In order to accurately judge the start and end time of snowmelt period, the upstream of the Danba basin, the main source of snowmelt runoff in Daduhe River, was taken as an example. Based on hydrometeorological data from 2009 to 2020, set pair analysis method, systematic clustering method and K-means clustering method were used to calculate the snowmelt period in the dry season (November to the next May), and the rationality of the staging results was evaluated. The division scheme of final snowmelt period in the basin was determined. The results show that the main snowmelt period is from January 11 to May 10, the preceding period is from November 1 to January 10, and the following period is from May 11 to May 31, which is the beginning period of rainfall runoff (there is still some snowmelt runoff). The research results can provide reference for the classification of snowmelt periods in high latitude areas.

**Key words:** set pair analysis; hierarchical clustering; K-means clustering; snowmelt period; Dadu River Basin

\*\*\*\*\*  
(上接第 25 页)

### Influence Analysis of Water Conservancy Engineering on Ecohydrological Regime in Qingjiang River Basin Based on Improved RVA Methods

DING Xin<sup>1a,1b</sup>, CHEN Yan-fei<sup>1a,1b</sup>, GUO Wei<sup>2</sup>, YU Ting<sup>3,4</sup>

(1a. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment; 1b. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430000, China; 3. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China; 4. Hubei Water Resources and Hydropower Science and Technology Promotion Center, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Scientific assessment of the hydrological regime is an important part of the assessment of the health of the river ecological environment. The IHA indicators were used to quantitatively evaluate the change of hydrological indicators of Gaobazhou Station during the construction period and operation period of water conservancy projects in the Qingjiang River Basin. On the basis of analyzing the change law of five different IHA indicators, the overall hydrological situation change of Qingjiang River was analyzed by selecting three different RVA methods, which include the Nemero index method, the RVA method based on the European distance method and the RVA method considering the comprehensive weight. It shows that the results of the analysis of the hydrological situation in the Qingjiang River Basin by the three methods during the construction period and the comprehensive utilization period are moderate and highly changed, respectively, and the hydrological situation change in the Qingjiang River Basin has an increasing trend. The evaluation results of the RVA method considering comprehensive weights are similar to the previous two methods and are reasonable, which can better reflect the changes in the river hydrological situation after the construction of the water conservancy project in the Qingjiang River Basin.

**Key words:** ecohydrological regime; RVA method based on Nemero exponential method; RVA method based on European distance method; improved RVA method; Qingjiang River Basin