

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*

戴明龙^{2,4}, 祁俊丽³, 仇红亚¹, 秦友伟³, 张冬冬^{2**}

(1: 中国长江三峡集团有限公司, 宜昌 443133)

(2: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(3: 河海大学水文水资源学院, 南京 210024)

(4: 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 武汉 430010)

摘要: 梯级水库运行已成为人类活动中的主要影响因素, 为定量评估水库(群)运行导致的下游河道水文情势的变化, 本文基于传统 RVA 法提出了改进的水文改变度评价方法, 并以受梯级水库群影响较大的长江宜昌至大通河段为典型研究区域, 对同一时段水库运行前后各站点水文情势变化进行了分析。结果表明: 与传统 RVA 法对比, 宜昌站整体改变度增高了 8%, 为高变化度; 大通站整体改变度降低了 12%, 为低变化度; 宜昌—大通站整体改变度符合水库影响沿程逐渐减弱的规律; 水库(群)影响主要表现为蓄丰补枯, 改进水文改变度法中 18 个指标改变度较传统 RVA 法变幅更大, 能够更好地反映梯级水库运行对下游水文情势的影响。该研究可为后续研究受水库运行影响下流域水文情势分析以及流域水库生态调度提供技术支撑。

关键词: 水库运行; 改进水文改变度; 整体水文改变度; 水文情势; 长江中游

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)*

Dai Minglong^{2,4}, Qi Junli³, Qiu Hongya¹, Qin Youwei³ & Zhang Dongdong^{2**}

(1: China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, P.R.China)

(2: Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(3: Hydrology and Water Resources College, Hohai University, Nanjing 210024, P.R.China)

(4: Innovation Team of Flood and Drought Disaster Prevention of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: Operation of cascade reservoirs has become a main factor in human activities. In order to quantitatively evaluate the change of hydrological situation in downstream rivers caused by the operation of reservoirs (groups), based on the traditional RVA method, a modified evaluation method of hydrological change was proposed. The Yichang–Datong reach of the Yangtze River, which was greatly affected by cascade reservoirs, was taken as a typical research area, and hydrological situation at each station before and after the operation of reservoirs was analyzed. The results showed that the overall change degree of hydrological situation at Yichang Station increased by 8%, which was a high change degree, and that of Datong Station decreased by 12%, which was a low change degree, comparing with the traditional RVA method. The change occurred at the Yichang–Datong station was accorded with the law of gradually weaken influences by the reservoirs. The influence of reservoirs (groups) was mainly manifested in the accumulation of abundant water and the replenishment of dry water. Comparing with the traditional RVA method, values of 18 indexes

* 2023-09-20 收稿; 2024-04-30 收修改稿。

中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704221)、水利青年科技英才项目(JHYC2022210)、国家留学基金项目(202203340012)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(B220201026)联合资助。

** 通信作者; E-mail: www123qe@126.com。

produced by the modified hydrological change degree method was larger, which could better reflect the influence of cascade reservoir operation on the downstream hydrological situation. This study could provide technical supports for the follow-up study on the hydrological situation analysis of the basin affected by reservoir operation and the ecological operation of the basin reservoirs.

Keywords: Reservoir operation; modified hydrological change degree; overall hydrological change degree; hydrological situation; middle reaches of the Yangtze River

水文要素变化一直是水文水资源领域的热点研究方向,对水资源管理、水文预报、水生态环境等方面均具有重要意义。随着大规模水利水电工程的建设投运、气候变化背景下的极端水文气象事件频发使得流域内水文要素、水生态环境指标均发生相应的改变,大大加剧了研究的复杂程度^[1-2]。Richter 等^[3]于 1997 年首次提出变化范围法(range of variability approach, RVA),该方法采用水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)对河流水文情势进行分析,已被广泛应用于研究水利水电工程建设对流域水生态情势的影响。国内大量学者使用 RVA 法评估水库建设、运行对水文情势的影响^[4-8]。蔡文君等^[9]、陈春玲^[10]以三峡水库运行时间为节点,采用 RVA 法对长江中下游水文情势进行评估,结果表明三峡水库运行对长江中下游的径流影响属于中度改变。马梦梦等^[11]研究了葛洲坝、三峡大坝运行对宜昌站生态水文指标的影响,结果表明葛洲坝运行对下游水文情势的影响度较小,而三峡—葛洲坝梯级水库联合运行后为中变化度,极大程度影响了河流生态系统。Guo 等^[12]分别对长江支流岷江水系长系列径流量和输沙量的变化程度进行了分析,结果表明径流总变化为中变化度,且人类活动是影响岷江流域径流变化的主导因素;董玉婷等^[13]、Li 等^[14]、许明一等^[15]对黄河流域渭河支流北洛河上游、大汶河、若尔盖湿地的径流演变成因进行分析,改变度基本均为中变化度;Zuo 等^[16]评估了界首站上游水闸和大坝对淮河流域沙颍河水文情势的作用,结果表明水坝对水文情势影响显著;陈栋为等^[17]、高敏华^[18]分别以珠江流域东江、西江流域为研究对象,采用 RVA 法评估水利工程不同开发程度、上游水利工程投产运行对河流水文情势的作用,表明流域水文情势变化随水利工程开发程度的提高而逐渐减弱,且其径流变化主要受到上游水利工程运行的影响。以往学者使用 RVA 法常以长序列时段为研究时段,以水库投运为突变节点研究水库运行前后实测序列的变化特征,评价结果往往由人类活动和气候变化等多种因素共同影响,无法消除水文周期、气候变化等因素对水文情势的影响^[19-20]。梯级水库运行已逐渐成为人类活动中的主要影响因素,如何将该因素剥离出来单独考虑,定量评估梯级水库运行导致下游河道水文情势的变化,是当前亟需解决的一个关键技术问题。

本文针对同一时段的实测和天然流量系列,提出量化水库运行影响的水文改变度评价方法,分别计算 IHA 指标,定量评估梯级水库运行对主要控制站的水文情势改变程度。该研究成果可为长江流域梯级水库生态调度、水环境保护以及水生态修护提供可靠的技术支撑,本研究的技术路线和方法对其他河流也具有一定的适用性。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

本次研究区域为长江干流宜昌至大通河段。宜昌站为长江上游控制水文站,且宜昌以上流域已建成大型水库 117 座,总调节库容为 842 亿 m^3 ,预留防洪库容为 501 亿 m^3 ,分别占长江流域已建大型水库总调节库容的 56% 和预留防洪库容的 63%^[21],对中下游干流的水文情势影响较大。研究区域内有枝城、螺山、汉口、九江、大通等水文站,各站点水文数据见表 1。

研究区域干流河道长 1095 km,支流包括清江、湘江、资水、沅江、澧水、洞庭湖区、汉江、鄱阳湖区、赣江、抚河、饶河、信江、修水、昌江等一级重要支流及沮漳河、陆水、潞水、倒水、举水、巴水、浠水、蕲水、富水

表 1 水文数据

Tab.1 Hydrological data

站点	流域面积/ km^2	时间序列	
		改进的水文改变度法	传统 RVA 法
宜昌站	1005501	2008—2021 年逐	1950—2021 年
枝城站	1024131	日实测、天然流量	1951—2021 年
螺山站	1294911	系列、逐日降雨、	1953—2021 年
汉口站	1488036	蒸发系列	1952—2021 年
九江站*	1523041		—
大通站	1705383		1950—2021 年

* 由于九江站建库前(2003 年)实测数据系列不足 20 年,本次不采用该站进行对比。

9 条支流,还包括荆南三口松滋河、虎渡河、藕池河等分流口及其二级支流,河网水系概化见图 1。

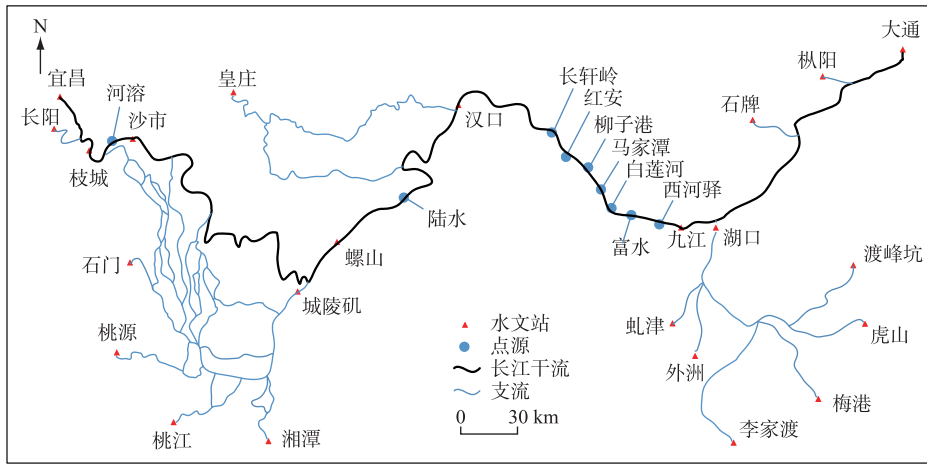


图 1 长江中下游河网水系概化示意

Fig.1 Schematic overview of the river network in the middle and lower reaches of the Yangtze River

1.2 数据来源

三峡水库于 2008 年汛后进行首次 175 m 试验性蓄水,因此本文以 2008—2021 年为研究时段,运用 Mike 模型以宜昌站的天然流量作为输入模拟其下游控制站点天然状态下的日流量过程^[22-27],其中天然流量根据水库实际调度运行资料采用水量平衡法推求。干流的宜昌、枝城、螺山、汉口、九江和大通等水文站建站至 2021 年实测日平均流量资料来自长江水利委员会水文局。断面及干流水位资料来自长江水利委员会水文局,支流流量资料和部分降雨、蒸发资料来自湖北、湖南、江西等水文部门。

2 改进的水文改变度评价方法

2.1 RVA 法

河流的水文变化过程较为复杂,往往通过建立指标体系来研究水文过程的变化特征。以往研究中较为常见的指标体系为 IHA 指标,含 33 个参数。考虑到研究区域无零流量情景,本文采用 5 组 32 个参数,各参数含义见表 2。

表 2 IHA 指标分类^[28]
Tab.2 Classification of IHA indicators^[28]

组别	IHA 指标	参数	参数序号
1	月均(中值)流量	各月流量的均值或中值	1~12
2	年均极值	年均最大(小)1、3、7、30、90 d 流量基流指数(连续 7 d 最小流量/年均流量)	13~23
3	年极值流量出现时间	年最大(小)1 d 流量出现时间	24~25
4	高低脉冲频率及历时	年发生高(低)脉冲的次数、高(低)脉冲持续时间	26~29
5	流量变化幅度及频率	流量平均增加(下降)幅度、逐年日流量逆转次数	30~32

RVA 法^[29]在 IHA 水文指标改变度的基础上,通常以各指标的平均值±标准差或频率为 25%、75% 作为指标的上、下限,计算受人工干扰后河流的各指标特征是否落在目标区间内,从而评估水利工程对河流水文情势的影响程度。计算公式如下:

$$D_i = \frac{N_i - N_c}{N_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D_i 为第 i 个水文指标改变度; N_i 为第 i 个水文指标受人工干扰后的观测年数落在目标范围内的年数; N_e 为受人工干扰后水文指标预期落在目标范围内的年数, 公式如下:

$$N_e = r \times N_i \quad (2)$$

式中, r 为受人工干扰前水文指标落入 RVA 目标内的比例, 若以各水文指标的 25% 和 75% 频率作为 RVA 目标, 则 $r=50\%$, N_i 为受人工干扰后的观测年数。

2.2 改进的水文改变度

为了将水库因素从多个因素中剥离, 本文提出了量化水库运行影响的水文改变度评价方法, 即改进的水文改变度 D_n : 将研究区域水文站的流量还原至天然状态下 (即未受水库运行影响), 建立天然和受人工干扰后两种状态的 25% 和 75% 频率下两套阈值体系 ($I_{25\%}$ 、 $I_{75\%}$ 、 $I'_{25\%}$ 、 $I'_{75\%}$), 通过对比同时段受人工干扰后的阈值范围占天然状态下的阈值范围情况来研究仅受水库运行影响对河流水文情势的作用。分析受人工干扰前后 25% 和 75% 频率值组成的区间范围, 两个区间范围存在部分交叉关系、不包含关系以及相对包含关系 (合计 6 种), 6 种关系的计算公式为:

$$D_n = \frac{N_u}{N_t} = \begin{cases} \frac{I'_{25\%} - I_{25\%}}{I'_{25\%} - I'_{75\%}}; & I_{75\%} \leq I'_{75\%} \leq I_{25\%} \text{ 且 } I'_{25\%} > I_{25\%} \\ \frac{I_{75\%} - I'_{75\%}}{I'_{25\%} - I'_{75\%}}; & I_{75\%} < I'_{25\%} \leq I_{25\%} \text{ 且 } I'_{25\%} < I_{75\%} \\ 100\%; & I'_{75\%} \geq I_{25\%} \\ 100\%; & I'_{25\%} \leq I_{75\%} \\ 0; & I_{25\%} \leq I_{25\%} \text{ 且 } I'_{75\%} \geq I_{75\%} \\ \frac{(I_{75\%} - I'_{75\%}) + (I_{25\%} - I'_{25\%})}{I'_{25\%} - I'_{75\%}}; & I_{75\%} < I_{75\%} \text{ 且 } I'_{25\%} > I_{25\%} \end{cases} \quad (3)$$

式中, D_n 为改进的水文改变度, N_u 为实测 IHA 指标未落入天然状态下 IHA 指标的阈值差, N_t 为实测 IHA 指标的阈值差, $I_{25\%}$ 、 $I_{75\%}$ 和 $I'_{25\%}$ 、 $I'_{75\%}$ 分别为在天然状态下和受人工干扰后不同指标 25% 和 75% 频率下的流量值。

另外, 为比较改进的水文改变度法与传统 RVA 法所得结果的差异性, 改进的水文改变度法仍采用传统 RVA 法中的 IHA 指标及等级划分法, 定义 D_n 处于 $[0 \sim 33\%)$ 、 $[33\% \sim 67\%)$ 、 $[67\% \sim 100\%]$ 区间分别表示 IHA 不同组指标的低、中、高变化度^[28]。计算流程图见附图 I。

另外, 为综合表征河流水文情势的总体变化程度, 选用整体水文改变度指标, 将 IHA 中 32 个水文指标的 D_i 值平均赋重推求整体水文改变度 D_o ^[30], 计算公式为:

$$D_o = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (4)$$

式中, D_i 表示不同指标的水文改变度, D_o 改变程度的划分范围同 D_n 。

3 结果与分析

3.1 水文情势变化

采用改进的水文改变度法计算宜昌—大通 6 站 IHA 水文指标的改变度 (表 3), 本文仅列出距梯级水库最近的宜昌站和最远的大通站的水文改变度。总体而言, 水库运行对宜昌—大通站的改变度作用表现为随着河道距离的增加而逐站降低, 距离梯级水库越远的水文站, 其变化程度越小。

第 1 组 (月均 (中值) 流量) 指标总体表现出各站流量非汛期增大、汛期减小的现象, 这表明梯级水库对于长江中下游流量起到蓄丰补枯的作用, 径流年内分配过程差异更小。其中 5 月流量增长显著, 9—10 月流量减小最显著, 原因为 5 月上游梯级水库群为腾库度汛而快速消落, 9—10 月水库群汛末集中蓄水。受河道调蓄影响, 距梯级水库越远的水文站, 其流量改变程度越低。

第 2 组 (年均极值) 指标可以看出各站的流量特征均表现为年均最小值系列较天然状态下有所增加, 年均最大值系列较天然状态有所降低, 且随着指标统计时段的不断加长, 其变化幅度也逐渐变小。这表明梯

级水库群运行对长江中下游各站的流量极值起到了一定的调节作用,基流指数也较天然情况有所增加。

表3 各站水文改变度变化情况
Tab.3 Changes in hydrological change degree at each station

水文变异指标	宜昌站				大通站			
	中位值		水文改变度		中位值		水文改变度	
	改进的 RVA 法	传统 RVA 法	改进的 RVA 法	传统 RVA 法	改进的 RVA 法	传统 RVA 法	改进的 RVA 法	传统 RVA 法
第1组: 月均流量/(m ³ /s)								
1月流量中值	5410	4190	100% (H)	85% (H)	13700	10100	24% (L)	51% (M)
2月流量中值	4740	3790	100% (H)	85% (H)	13100	10600	44% (M)	12% (L)
3月流量中值	5450	4050	95% (H)	85% (H)	18600	14700	40% (M)	44% (M)
4月流量中值	7480	5880	42% (M)	27% (L)	23700	23950	27% (L)	27% (L)
5月流量中值	10700	11300	78% (H)	12% (L)	29700	33700	36% (M)	3% (L)
6月流量中值	16300	16800	0% (L)	32% (L)	40100	38800	23% (L)	3% (L)
7月流量中值	28200	28200	6% (L)	30% (L)	53200	50600	3% (L)	41% (M)
8月流量中值	23300	26500	24% (L)	12% (L)	42800	42200	16% (L)	17% (L)
9月流量中值	23000	24800	43% (M)	12% (L)	37700	40650	21% (L)	27% (L)
10月流量中值	15700	17500	67% (H)	73% (H)	31400	33000	30% (L)	41% (M)
11月流量中值	9090	9375	24% (L)	56% (M)	21400	22400	8% (L)	32% (L)
12月流量中值	5980	5690	70% (H)	3% (L)	14900	13400	9% (L)	12% (L)
第2组: 年均极值/(m ³ /s)								
年均1日最小值	3670	3380	100% (H)	100% (H)	10800	8570	58% (M)	85% (H)
年均3日最小值	3870	3410	100% (H)	100% (H)	10900	8590	64% (M)	85% (H)
年均7日最小值	4060	3496	100% (H)	100% (H)	11100	8726	69% (H)	85% (H)
年均30日最小值	4530	3674	100% (H)	85% (H)	11900	9224	54% (M)	71% (H)
年均90日最小值	5220	4070	100% (H)	85% (H)	15200	12290	26% (L)	12% (L)
年均1日最大值	51600	51500	59% (M)	71% (H)	59800	59600	4% (L)	2% (L)
年均3日最大值	48200	50100	40% (M)	12% (L)	59600	59400	4% (L)	3% (L)
年均7日最大值	42300	44570	39% (M)	41% (M)	59100	58490	4% (L)	3% (L)
年均30日最大值	33300	35070	46% (M)	41% (M)	55100	54170	6% (L)	27% (L)
年均90日最大值	26600	28260	39% (M)	17% (L)	46600	46670	0% (L)	3% (L)
基流指数	0.30	0.25	100% (H)	85% (H)	0.39	0.30	23% (L)	100% (H)
第3组: 年极值流量出现时间/d								
年最小流量出现时间	46	52	98% (H)	49% (M)	35	27	33% (L)	56% (M)
年最大流量出现时间	227	204	5% (L)	11% (L)	206	200	1% (L)	37% (M)
第4组: 高低脉冲频率及时								
低脉冲次数	91.2	3	100% (H)	82% (H)	90.6	1	19% (L)	35% (M)
低脉冲历时/d	25.7	10	81% (H)	51% (M)	38.3	61	20% (L)	41% (M)
高脉冲次数	90.9	6	18% (L)	12% (L)	91.1	2	0% (L)	8% (L)
高脉冲历时/d	17.6	9	4% (L)	44% (M)	66.2	46	0% (L)	23% (L)
第5组: 流量变化幅度及频率								
上升幅度/(m ³ /s)	1260	480	100% (H)	37% (M)	624	400	17% (L)	10% (L)
下降幅度/(m ³ /s)	-1080	-300	0% (L)	44% (M)	-484	-400	14% (L)	16% (L)
逆转次数	130	86	0% (L)	100% (H)	69	49	32% (L)	7% (L)

表中括号内 H、M、L 分别代表高、中、低变化度,加粗表示该水文变异指标两种方法计算结果差异较大。

第3组(年极值流量出现时间)指标可以看出由于梯级水库群非汛期补水效果,各站年最小值出现时间基本由天然情况的1-2月提前至11月末-12月,总体而言,梯级水库运行导致各站年最小值出现时间平

均提前一个月以内。各站年最大值的出现时间只有个别年份较天然状态下有小幅提前,其余年份影响不大,原因是长江流域洪量较大,汛期水库防洪调度主要表现为削峰滞洪,不易剧烈改变天然洪水过程,对峰值出现时间影响较小。

第4组(高低脉冲频率及历时)指标同第2组指标,梯级水库枯期补水导致各站点的低脉冲次数及历时较天然情况均有明显减少,高脉冲次数和历时的变化相对来说较小。这表明在枯水期梯级水库通过向下游补水使得下游站点的低值流量得到有效补充。

第5组(流量变化幅度及频率)指标总体表现为各站的流量上升幅度较天然状态下均有所减少,下降幅度较天然状态下有所增加,宜昌和枝城站的逆转次数较天然状态下有所增加,而螺山—大通站则有不同程度的减少。这表明梯级水库运行对长江中下游的流量过程均化作用显著,使得持续性逐日流量上升(下降)的频率降低。

3.2 水库影响的水文改变度

除了螺山站,宜昌—大通总体上水文改变度表现为逐渐降低,其中宜昌站表现为高变化度,改变度为70%;枝城、螺山、汉口、九江站均为中变化度,分别为66%、46%、55%和51%;大通站表现为低变化度,改变度为30%(图2)。与梯级水库对水文情势的影响沿程坦化并随着流域面积的增加而逐渐减少的规律是一致的。各站不同等级改变度在各站所占比例(各等级改变度数量占IHA指标总数的比例)的变化趋势也比较明显,其中,低变化度沿程基本保持逐渐上升,所占比例为28%~75%;高变化度沿程表现为逐渐降低趋势,所占比例为47%~3%;中变化度所占比例范围为19%~38%(图3)。

另外,从图2和图3可以看出螺山站为一个特例,该站的低变化度较下游的汉口和九江站大,但低于最下游的大通站,原因可能是由于螺山站受到洞庭湖区调蓄影响,使得该站一些水文指标的改变度有所降低,从而改变度表现为低变化度较多,且整体改变度略低于下游汉口、九江两站。

图4选取了距梯级水库较近的宜昌站和枝城站,受洞庭湖区调蓄作用影响显著的螺山站以及距离较远的大通站为研究对象,可以看出不同组指标在各水文站的改变度总体上表现为随着距梯级水库距离的增加而逐渐降低的趋势。宜昌站5组指标高改变度所占比例均较高,分别为42%、55%、50%、50%和33%;枝城站5组指标高变化度所占比例分别为42%、55%、50%、25%、33%;螺山站中只有第1、2组指标存在高变化度,所占比例分别为8%和36%,其余3组指标变化度均以低、中变化度为主;大通站仅第2组有9%的高变化度,其余均以低、中变化度为主,各站高变化度所占比例逐渐降低。

图5为不同水文指标对各站受梯级水库前后流量的改变程度。可以看出,梯级水库群对长江中下游的水文情势影响较为显著,32个指标中1、2、3、4、5月月均流量、9、10月月均流量、12月月均流量、年均最小流量系列、基流指数、年最小值出现时间、低脉冲次数及历时、流量上升幅度等18个指标各站均表现为随着梯级水库距离增加而降低,均由宜昌站的高、中变化度过渡至大通站的低变化度,受水库运行影响较大;年均最大流量系列除宜昌站出现中变化度,其余均为低变化度,受梯级水库运行次之;6、7、8月月均流量、11月月均流量、年最大值出现时间、高脉冲次数及历时、下降幅度及逆转次数9个指标受水库运行较小,除个别站出现特例情况基本表现为低变化度。

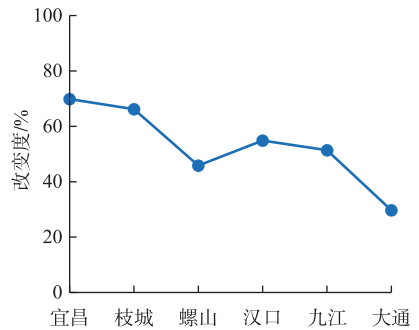


图2 各站整体改变度

Fig.2 Each station's overall change degree

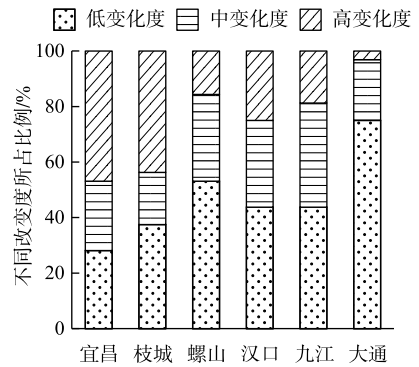


图3 各站不同改变度所占比例

Fig.3 Proportion of each station with different change degree

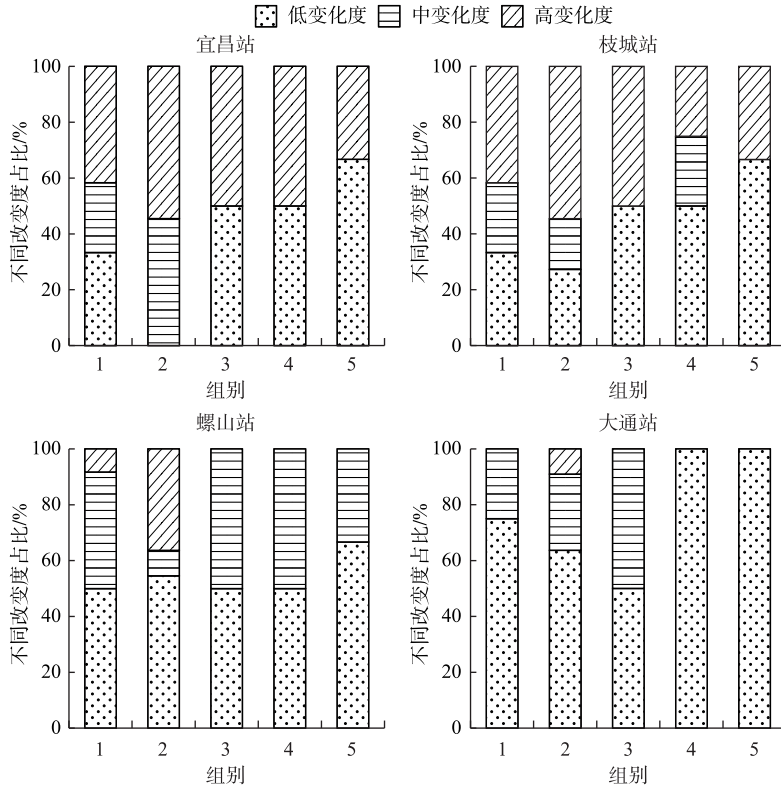


图4 不同改变度在各组指标所占比例

Fig.4 Proportion of different change degree in each group of indicators

3.3 改进效果分析

采用传统RVA法分析了2003年前后宜昌、枝城、螺山、汉口和大通站水文改变度,并与改进的水文改变度法进行对比,见图6~8。图6为各站IHA指标改变度对比图(序号对应指标详见表2),可以看出对于梯级水库影响较大的指标,改进的水文改变度法所得指标改变度高于传统RVA法,如第1组指标中5月(水库汛前消落)、9、10月(水库汛末蓄水)、12月~翌年3月(水库向下游补水)月均流量以及第2组指标中年均最小系列、第3组年最小值出现时间、第4组低脉冲次数及历时、第5组流量上升幅度等水库作用较大的指标,改进成果均等于或高于传统RVA法;对于梯级水库作用较小的指标如第1组6月和7月月均流量、11月月均流量、第2组年均最大流量系列、第3组年极大值出现时间、第4组高脉冲次数及历时、第5组流量下降幅度等,改进的水文改变度法所得结果近似或略低于传统RVA法。与水库调蓄相关的指标因子改变度变幅增大,受水库调蓄作用较小的指标因子改变度变幅与传统RVA法一致或略微减小,表明仅考虑受水库运行影响的改进的水文改变度法能够较好地凸显水库蓄丰补枯作用。

传统RVA法得到的宜昌~大通站均表现为中变化度,改变度分别为62%、64%、53%、59%和42%(图7)。距梯级水库最近的宜昌站的改变度小于下游49 km的枝城站,甚至与下游667 km且流域面积、平均流量相差甚大的汉口站接近,是不合理的。而改进结果除洞庭湖入汇后的螺山站外,其改变度逐渐减小,且宜昌站整体改变度提高了8%,由中变化度转为高变化度,符合上游已建大型水库调节库容约占年径流总量20%的事实。大通站整体改变度降低了12%,由中变化度转为低变化度,与宜昌站改变度过渡更大,能够更好地凸显梯级水库作用随距离向下游逐渐减弱这一特征。

图8为不同等级改变度在各站所占比例对比图,可以看出,采用传统RVA法计算各站的低变化度基本沿程保持逐渐上升趋势,所占比例为34%~59%;高变化度表现为沿程逐渐降低趋势,所占比例为47%~

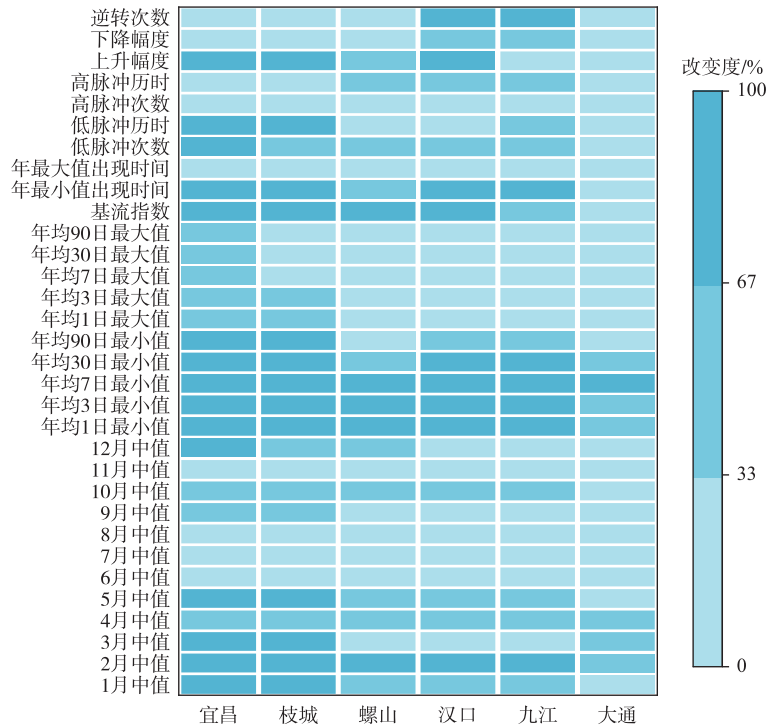


图5 各站对各指标水文改变度结果

Fig.5 Hydrological change degree results of each index at each station

16%;中变化度所占比例范围为13%~31%。与传统RVA法相比,改进的水文改变度法中宜昌站高变化度所占比例增大,其下游各站高变化度所占比例逐渐减小。

可以认为,本文提出的改进的水文改变度评价方法较传统RVA法更能客观反映水库运行对中下游水文情势的影响。

4 结论

为定量研究梯级水库运行对下游流域水文过程的影响,本文提出改进的水文改变度法,并以长江宜昌—大通河段为研究对象,研究了梯级水库运行对长江中下游水文情势改变度,得到以下结论:

1)传统RVA法针对水库(群)运行前后的实测水文系列进行分析,而运行后的实测系列既受水库群调蓄影响,也包含水文周期甚至天气变化影响,难以厘清;本文考虑水库调蓄影响还原出天然流量,针对同一时段的实测(受影响的)和天然流量系列,提出改进的水文改变度法,避免了水库运行以外的其他因素干扰。研究区域分析结果表明,消除了传统RVA法的沿程改变度不协调的现象,改进的水文改变度法评价结果更客观,更适用于评价水库运行因素对流域水文情势的影响。

2)改进的水文改变度法更能客观反映出上游水库蓄丰补枯的调蓄特征,与最小流量和水库运行调蓄相关的指标因子改变度更符合客观实际;改进的水文改变度法所得宜昌站的改变度为70%,大通站改变度为30%,中间水文站改变度在33%~67%中变化度范围之间,实现沿程由高至低变化度转变,上下游水文站改变度过渡范围变大,更符合上游水库运行影响沿程逐渐减弱的规律。

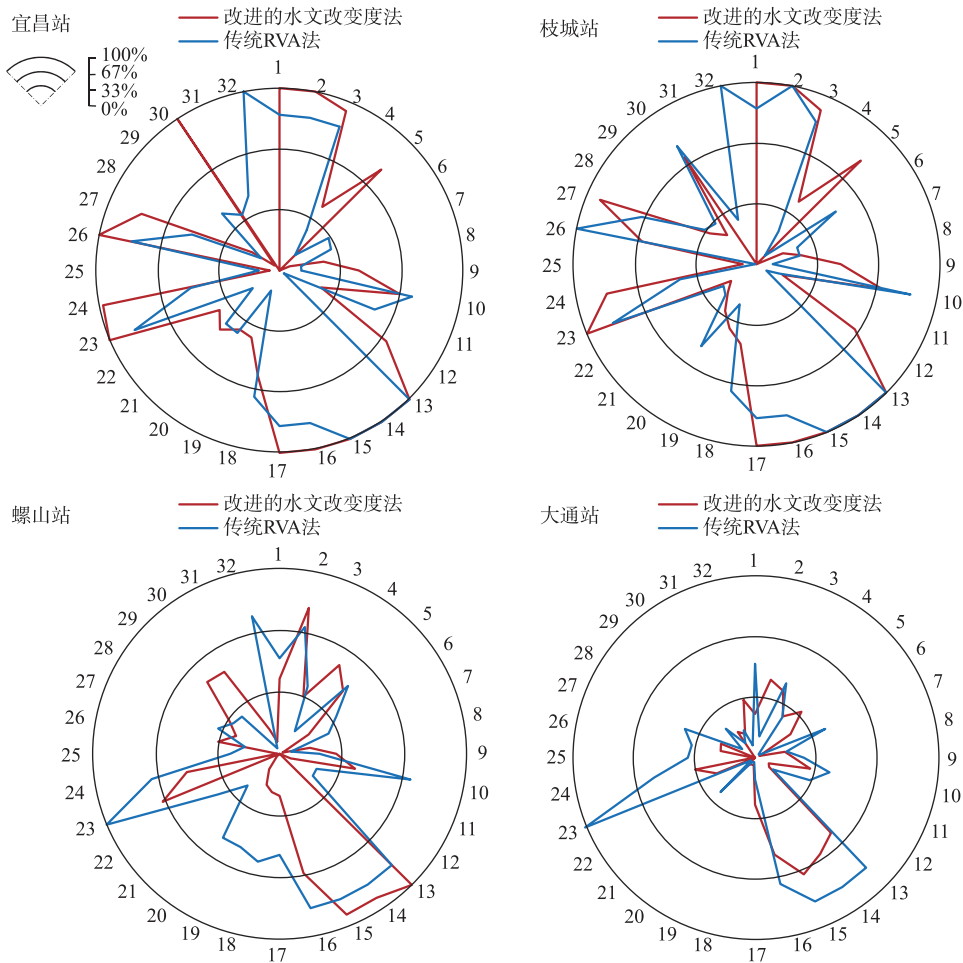


图 6 不同方法计算结果对比

Fig.6 Comparison of results calculated by different methods

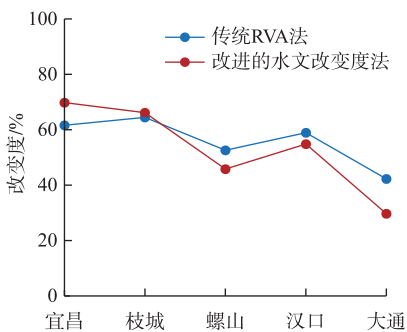


图 7 各站整体改变度

Fig.7 Each station's overall change degree

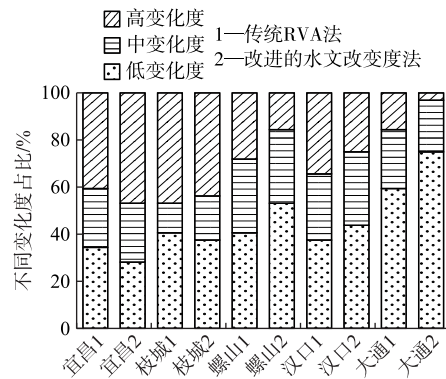


图 8 不同方法不同变化度所占比例

Fig.8 Proportion of different methods with different change degree

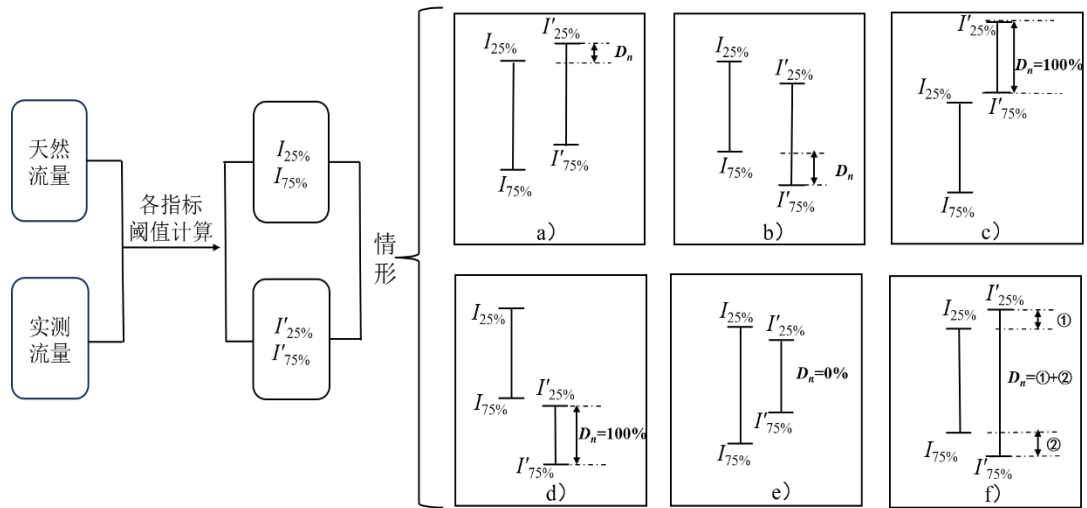
5 附录

附图 I 见电子版(DOI: 10.18307/2025.0244)。

6 参考文献

- [1] Guo WX, Li Y, Zhuo ZY *et al.* Impact assessment of Three Gorges Reservoir on hydrological regimes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Water Power*, 2019, **45**(5): 22-27. [郭文獻, 李越, 卓志宇等. 三峡水库对长江中下游河流水文情势影响评估. 水力发电, 2019, **45**(5): 22-27.]
- [2] Zhang X, Dong ZC, Gupta H *et al.* Impact of the Three Gorges Dam on the hydrology and ecology of the Yangtze River. *Water*, 2016, **8**(12): 590. DOI: 10.3390/w8120590.
- [3] Richter B, Baumgartner J, Wigington R *et al.* How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, **37**(1): 231-249. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x.
- [4] Duan WX, Guo SL, 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. DOI: 10.3390/w8060218.
- [5] Zhang HB, Wang YM, Huang Q *et al.* Effects of reservoir engineering based on RVA upon river flow regime. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2008, **24**(3): 262-267. [张洪波, 王义民, 黄强等. 基于 RVA 的水库工程对河流水文条件的影响评价. 西安理工大学学报, 2008, **24**(3): 262-267.]
- [6] Wang HX, Ma YC, Yang H *et al.* Quantitative evaluation of the impact of climate change and human activities on Jialing River runoff changes in the past 60 years, China. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, **14**(2): 590-609. DOI: 10.2166/wcc.2023.452.
- [7] Guo Q, Meng YK, Fan LF *et al.* Study on ecological water level variation of Poyang Lake based on IHA and RVA method in recent years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1691-1701. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201907019. [郭强, 孟元可, 樊龙凤等. 基于 IHA/RVA 法的近年来鄱阳湖生态水位变异研究. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1691-1701.]
- [8] Zhang ZG, Jin Y, Li KF *et al.* RVA method-based study on river ecological baseflow hydrograph. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, **48**(9): 155-160. [张志广, 金羿, 李克锋等. 基于 RVA 法的河流生态基流过程研究. 水利水电技术, 2017, **48**(9): 155-160.]
- [9] Cai WJ, Yin JX, Wang H. Influence of operation of Three Gorges Reservoir on flow regime in mid-lower reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2012, **43**(5): 22-25. [蔡文君, 殷峻暹, 王浩. 三峡水库运行对长江中下游水文情势的影响. 人民长江, 2012, **43**(5): 22-25.]
- [10] Chen CL. Analysis on changes of eco-hydrological regime in Dongjiadang Hydrological Station of Hudu River based on IHA-RVA method. *Hunan Hydro & Power*, 2022, (4): 53-55. [陈春玲. 基于 IHA-RVA 法的虎渡河董家垱水文站生态水文情势变化分析. 湖南水利水电, 2022, (4): 53-55.]
- [11] Ma MM, Ai P, Bian SZ *et al.* Hydrological regime impact analysis of Yichang Station based on range of variability approach. *Water Resources and Power*, 2018, **36**(3): 14-17. [马梦梦, 艾萍, 边世哲等. 基于变动范围法的宜昌站水文情势影响分析. 水电能源科学, 2018, **36**(3): 14-17.]
- [12] Guo WX, Zhou HT, Jiao XY *et al.* Analysis of alterations of the hydrological situation and causes of river runoff in the Min River, China. *Water*, 2022, **14**(7): 1093. DOI: 10.3390/w14071093.
- [13] Dong YT, Wang SY, Mu XM *et al.* Assessment on impact of ecological management on runoff evolution based on IHA-RVA method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(2): 193-200. [董玉婷, 王双银, 穆兴民等. 基于 IHA-RVA 法的生态治理对径流演变情势的影响评估. 水土保持研究, 2023, **30**(2): 193-200.]
- [14] Li Y, Zhao L, Zhang Z *et al.* Research on the hydrological variation law of the dawen river, a tributary of the lower Yellow River. *Agronomy*, 2022, **12**(7): 1719. DOI: 10.3390/agronomy12071719.
- [15] Xu MY, Su L. Study of hydrological regime in Zoige Wetland Based on IHA-RVA Method. *Yellow River*, 2023, **45**(4): 35-39, 101. [许明一, 苏柳. 基于 IHA-RVA 法的若尔盖湿地水文情势研究. 人民黄河, 2023, **45**(4): 35-39, 101.]
- [16] Zuo Q, Liang S. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, **368**: 275-280. DOI: 10.5194/piabs-368-275-2015.
- [17] Chen DW, Chen XH, Li C *et al.* Research on accumulated effect of hydraulic structures on river regime alteration based on RAV method: A case study of Dongjiang River Basin. *Journal of China Hydrology*, 2011, **31**(2): 54-57. [陈栋为, 陈晓宏, 李翀等. 基于 RAV 法的水利工程对河流水文情势改变的累积效应研究——以东江流域为例. 水文, 2011, **31**(2): 54-57.]
- [18] Gao MH. Research on the hydrological regime of the Gaoyao section in the lower reaches of Xijiang River by IHA/RVA method. *Pearl River*, 2022, **43**(9): 69-77, 97. [高敏华. 基于 IHA/RVA 法西江下游高要段水文情势研究. 人民珠江, 2022, **43**(9): 69-77, 97.]
- [19] Wang HX, Ma YC, Hong FT *et al.* Evolution of water-sediment situation and attribution analysis in the Upper Yangtze River, China. *Water*,

- 2023, **15**(3): 574. DOI: 10.3390/w15030574.
- [20] Zhang RQ, Liu JG, Mao GQ *et al.* Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(1): 29-38. DOI: 10.13866/j.azr.2021.01.04. [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. 干旱区研究, 2021, **38**(1): 29-38.]
- [21] 水利部长江水利委员会. 2023 年长江流域水工程联合调度运用计划. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2023.
- [22] Xing L, Zhang DD, Li S. Influence of Three Gorges Reservoir on flood regime of mid-lower reaches of Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2019, **37**(9): 44-46. [邢龙, 张冬冬, 李帅. 三峡水库运行对长江中下游洪水情势的影响. 水电能源科学, 2019, **37**(9): 44-46.]
- [23] Zhang Q, Singh VP, Chen XH. Influence of Three Gorges Dam on stream flow and sediment load of the middle Yangtze River, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, **26**(4): 569-579. DOI: 10.1007/s00477-011-0466-8.
- [24] Huang Y, Yao SM, Lu JY. Impact of TGP operation on the hydrologic regime in the downstream main channel of the dam. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, **28**(7): 76-81. [黄悦, 姚仕明, 卢金友. 三峡水库运用对坝下游干流河道水文情势的影响研究. 长江科学院院报, 2011, **28**(7): 76-81.]
- [25] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- [26] Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, **10**(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [27] Dole WP, Jackson DL, Rosenblatt JI *et al.* Relative error and variability in blood flow measurements with radiolabeled microspheres. *The American Journal of Physiology*, 1982, **243**(3): 371-378. DOI: 10.1152/ajpheart.1982.243.3.H371.
- [28] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J *et al.* A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**(4): 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [29] Richter BD, Baumgartner JV, Braun DP *et al.* A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, **14**(4): 329-340. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E.
- [30] Liu GH, Zhu JX, Xiong MY *et al.* Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at Meigang Station of Xinjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(1): 51-57. [刘贵花, 朱婧瑄, 熊梦雅等. 基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究. 水文, 2016, **36**(1): 51-57.]



附图 I 改进的水文改变度 D_n 的计算流程

Attached Fig.I Calculation flow of the improved hydrological alteration degree D_n