

长江流域上游水文情势变化分析计算

钟斯睿, 郭生练*, 谢雨祚, 杨媛婷, 汪芸, 王俊

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: 2023年7月11日; 录用日期: 2023年8月12日; 发布日期: 2023年8月24日

摘要

长江流域上游水库陆续建设运行, 改变了天然河流水文情势。本文基于宜昌站1949~2022年实测流量序列, 应用Mann-Kendall检验法并考虑上游梯级水库建设进程, 将流量序列划分为1949~1995年、1996~2014年和2015~2022年三个时期。采用IHA-RVA法分析计算长江流域上游水文情势变化, 在气候变化和上游梯级水库联合运行调度背景下, 1996~2014年长江上游整体水文改变度为49.2%, 呈中度改变; 近年由于乌东德、白鹤滩等大型水库建成运行, 2015~2022年整体水文改变度上升至74.2%, 呈重度改变; 月均流量、极端流量和流量变化率分类指标均发生重大变化。

关键词

梯级水库, 水文情势, IHA-RVA法, 长江上游, 宜昌水文站

Analysis of Hydrological Regime Alteration in the Upper Yangtze River Basin

Sirui Zhong, Shenglian Guo*, Yuzuo Xie, Yuanting Yang, Yun Wang, Jun Wang

State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Jul. 11th, 2023; accepted: Aug. 12th, 2023; published: Aug. 24th, 2023

Abstract

As the construction and operation of the cascade reservoirs in the upper Yangtze River basin, the hydrological regime has been altered from its natural conditions. Based on the measured flow series of Yichang hydrological station from 1949 to 2022, the flow data series is divided into three periods including 1949~1995, 1996~2014 and 2015~2022 by using the Mann-Kendall test method and considering the construction process of upstream cascade reservoirs. The IHA-RVA method is applied to analyze the hy-

作者简介: 钟斯睿(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源的研究, Email: zhongsr@whu.edu.cn

*通讯作者 Email: slguo@whu.edu.cn

文章引用: 钟斯睿, 郭生练, 谢雨祚, 杨媛婷, 汪芸, 王俊. 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. DOI: 10.12677/jwrr.2023.124039

drological regime in the upper Yangtze River basin. The results show that the overall hydrological regime alteration is a moderate change (49.2%) from 1996 to 2014, and a severe change (74.2%) from 2015 to 2022 as the construction of the upstream large-scale cascade reservoirs. The large alteration is mainly reflected in the indicators such as monthly average flow, extreme flow, and flow change rate.

Keywords

Cascade Reservoir, Hydrological Regime, IHA-RVA Method, Upper Yangtze River, Yichang Hydrological Station

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

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

长江作为亚洲第一大河，其上游径流充沛且较为稳定，天然河道落差大、流量大，水能资源丰富，水电开发条件优越。自上世纪 80 年代葛洲坝水库建成投运起，我国已在长江上游陆续规划建设一批重点大型水电电站，初步形成绿色清洁能源走廊。水库群联合调度不可避免地改变了长江流域上游的水文情势。因此，研究探讨气候变化和人类活动(水利水电工程)背景下的长江上游水文情势，是亟待回答的科学技术问题。

水文情势是指江河湖库等自然水体各类水文要素的时空变化情况，是所有庞杂的水文信息的集合汇总。为定性、定量描述水文情势，Richter 等[1]于 1996 年提出一系列水文改变指标(Indicators of hydrologic alteration, IHA)，并经由美国自然保护协会(Nature Conservancy of the United States)完善，归纳为包含流量量级、流量极值、极值时刻、脉冲历时和流量变化率在内的总计 5 组 33 个 IHA 指标[2] [3]。IHA 指标所需数据资料易获得，同时能有效定量地描述水文情势，具有较为广泛的实践应用。为进一步评估水文情势的变异性和平水文指标的改变程度，Richter 等[4]后续又提出了变化范围法(Range of variability approach, RVA)，采用 IHA-RVA 法定量分析水文情势及其改变度。

IHA-RVA 法已在国内外取得广泛的研究实践，在长江流域上游和中游也表现出良好的应用价值。李光录等[5]基于 IHA-RVA 法研究了长江源区生态水文情势变化，虽然河流源区受人类活动影响较小，但在气候变化因素为主导的背景下，长江源区环境流量组分与水文情势已发生中度改变；郭文献等[6]以金沙江下游屏山站为研究对象，研究结果表明水电开发加剧了长江上游的水文情势变化，屏山站的整体水文改变度已达 51%；冯瑞萍[7]等对寸滩、宜昌、汉口和大通四站 1950~2006 年水文情势进行分析，由于此时长江上游梯级水库群规模尚小，四站的改变均不显著；自三峡水库建成投运后，宜昌站上游形成三峡 - 葛洲坝梯级水库，进一步改变了宜昌站水文情势，其中以三峡水库的影响为主，而葛洲坝水库影响较小[8] [9] [10]；且有相关研究表明，若以 IHA-RVA 法评估洞庭湖和鄱阳湖的水文情势，整体水文改变度将分别达到 36.8% 和 38.9%，均呈中度改变[11] [12]。上述研究表明，在气候变化和梯级水库联合调度等人类活动等因素综合影响下，长江流域自源区至宜昌站，乃至长江中游，水文情势均已发生不同程度的改变。但上述研究仍然存在部分局限性：一是仅考虑了单座水库或双座水库影响下的水文情势变化，尚没有综合考虑长江上游混联梯级水库群的影响；二是囿于研究资料的缺陷，其流量序列的处理存在部分不足之处，如序列长度较短，采用模拟序列而非实测序列，序列分段没有考虑水库建设进程等。

宜昌水文站作为长江上游控制站，具有相对完备的水文观测资料。基于宜昌水文站 1949~2022 年实测流量序列，在长江上游重点大型梯级水库建设投运背景下，分析长江上游水文情势变化情况。主要研究技术路线如下：首先根据梯级水库建设进程对流量序列进行分段处理，再结合 Mann-Kendall 秩相关检验验证分段处理的合

理性, 然后采用 IHA-RVA 法分析分段后各组序列的水文情势变化规律, 并定量求解水文情势改变度。

2. 研究方法

2.1. Mann-Kendall 变化趋势分析

作为一种非参数检验方法, Mann-Kendall 趋势检验法无需遵从特定的检验样本分布类型, 还可以排除个别异常值的影响, 适应性强, 便于使用, 被世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)所推荐, 不仅可以用来检验序列的趋势变化, 还可以用来检验序列的突变情况。

对于一个时间序列 X_1, X_2, \dots, X_n (n 为实测的样本序列长度), 可以构造二秩序列 S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \alpha_{ij} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_k 为数值 x_i 大于数值 x_j 的累加个数。

假定时间序列随机独立, S_k 的均值与方差表示为:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (3)$$

$$Var(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad 1 \leq k \leq n \quad (4)$$

对 S_k 作标准化, 可以得到统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (5)$$

式中: UF_1 等于 0。给定显著水平 $\alpha = 0.05$, 当 UF_k 的绝对值大于 $U_\alpha = 1.96$ 时, 说明序列有明显的趋势变化。将上述步骤应用到时间序列 X 的逆序上, 逆序列 X_n, X_{n-1}, \dots, X_1 记作 X'_1, X'_2, \dots, X'_n , 可得下式:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_{k'} \\ k = n+1-k' \quad k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

对于某个具体的时间序列, 基于 Mann-Kendall 检验法求出统计序列对应的 UF_k 和 UB_k 。若 UF_k 大于 0, 说明序列有上升的趋势; 若 UF_k 小于 0, 说明序列有下降的趋势。所有的 UF_k 值可连成一条曲线, 当其超过指定的显著性水平线时, 说明序列有显著的上升或下降趋势。若 UF_k 和 UB_k 曲线在显著性水平线区间内相交, 则交点所处的时间正是突变开始的时刻。

2.2. IHA-RVA 法

本文所选用的 IHA 指标是美国大自然保护协会在 32 个指标基础上完善后的指标, 共 33 个, 分为 5 组, 即各月均值流量大小、极值流量大小、极值流量出现时间、流量脉冲情况、流量增减变化率。

RVA 方法基于天然流量的数据, 天然流量是指还未受到工程和人类活动等诸多因素破坏的流量过程。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。本文选择天然流量下 33 个 IHA 指标的 75%、25% 分位数作为各指标的 RVA 上限和下限。若非天然状态时的流量指标超过这个范围则说明水文指标改变程度较大, 反之改变程度较小。

单个指标水文改变度可用如下公式, 对各 IHA 指标改变度 D_i 取平均即可得到不同组别和整体水文改变度。

$$D_i = \left| \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (i=1,2,\dots,33) \quad (7)$$

$$N_e = p \times N_T \quad (8)$$

式中: D_i 表示第 i 个指标的改变度; $N_{o,i}$ 表示第 i 个指标在非天然状态下落在 RVA 阈值内的年数; N_e 表示第 i 个指标在非天然状态下预期落入 RVA 阈值内的年数; 由于本文所选为 75% 和 25% 分位数, 所以 $p = 50\%$; N_T 表示非天然状态下的总年数。

设定水文指标改变程度, 选用分级方法, 按水文改变度 $0 \leq D_i \leq 33\%$ 、 $33\% \leq D_i \leq 67\%$ 、 $67\% \leq D_i \leq 100\%$ 由小到大分为轻度、中度和高度改变。

3. 研究区域及数据

宜昌水文站作为长江上游来水代表站, 同时也是三峡水库的出库控制站, 集水面积约 100.6 万 km^2 , 1877 年开始观测水位, 流量序列自 1946 年开始测流。本文选取宜昌站 1949~2022 年流量资料系列, 开展水文情势变化分析研究。

长江上游已建成 4 万余座水库, 总库容 1633 亿 m^3 , 防洪库容 498 亿 m^3 , 总装机容量 114.24 GW, 设计年发电量 3000 多亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 其中 30 座重点大型水库的分布示意图和建库信息分别如图 1、表 1 所示。忽略其余调节能力较弱的中小型水库, 可将宜昌站 1949~1980 年的流量序列视作天然状态下的观察结果, 同时考虑到葛洲坝水库位于宜昌站上游约 6km 处, 根据其运行资料进行还原处理后, 可将天然流量序列进一步延长为 1949~1995 年; 自 1996 年后, 我国接连在长江上游建设众多重点水库工程, 于 2014 年初具规模, 迄今更进一步完善。由于水库建设和调蓄影响, 河流来水来沙情势发生了显著变化, 为分析宜昌站受上游梯级水库的建设和运行影响下的水文情势, 将资料序列划分为 1949~1995 年、1996~2014 年和 2015~2022 年, 分别代表宜昌水文站天然流量序列(即不受水库影响)和两组受水库不同程度影响的序列。

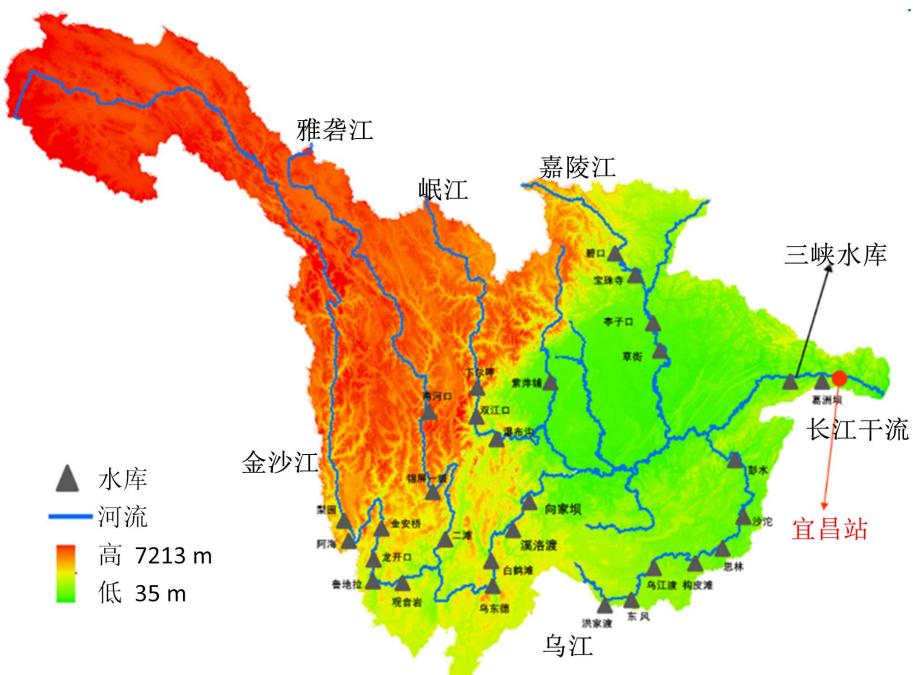


Figure 1. Distribution of key large-scale reservoirs in the upper Yangtze River basin
图 1. 长江流域上游重点大型水库分布示意图

Table 1. Key large-scale reservoir construction information in the upper Yangtze River basin**表 1. 长江流域上游重点大型水库建库信息**

水库	投运年份	总库容/亿 m ³	累计库容/亿 m ³	水库	投运年份	总库容/亿 m ³	累计库容/亿 m ³
葛洲坝	1981	15.80	15.80	沙沱	2013	9.21	777.27
东风	1996	10.25	26.05	阿海	2014	8.85	786.12
碧口	1997	2.17	28.22	龙开口	2014	5.58	791.70
宝珠寺	1998	25.50	53.72	鲁地拉	2014	17.18	808.88
二滩	1999	58.00	111.72	锦屏一级	2014	79.90	888.78
乌江渡	2003	23.00	134.72	溪洛渡	2014	126.7	1015.48
洪家渡	2005	49.47	184.19	向家坝	2014	51.63	1067.11
紫坪铺	2006	11.12	195.31	亭子口	2014	40.67	1107.78
三峡	2006	393.00	588.31	梨园	2016	8.05	1115.83
构皮滩	2009	64.54	652.85	观音岩	2016	22.50	1138.33
彭水	2009	14.65	667.50	乌东德	2021	74.08	1212.41
瀑布沟	2010	53.32	720.82	两河口	2022	108.00	1320.41
思林	2010	15.93	736.75	白鹤滩	2022	206.27	1526.68
草街	2011	22.18	758.93	双江口	在建	28.97	1555.65
金安桥	2012	9.13	768.06	下尔呷	拟建	28.00	1583.65

4. 宜昌站水文情势变化分析

基于 Mann-Kendall 检验法分析宜昌水文站流量序列在 1949~2022 年的变化趋势, 如图 2 所示。宜昌站年均径流量、汛期流量(6~8 月)、汛末流量(9~10 月)和年最大流量均有一定下降趋势, 且随着水利工程的建成投运, 近 20 年汛末流量和年最大流量趋势变化显著。枯水期流量(1~3 月)和年最小流量则呈现显著的上升趋势。汛期流量、汛末流量和年最小流量在 2004~2014 年期间内存在突变点; 年均流量和汛期流量在 2016~2021 年期间内存在突变点。上游水库运行管理直接影响径流的时程分配, 导致各项流量指标发生变化, 使得水文情势发生改变。

为进一步分析长江上游梯级水库群对宜昌水文站水文情势的影响, 采用 IHA-RVA 法定量评估水文过程改变程度。将实测流量长序列划分为三个时段, 即 1949~1995 年天然流量序列和 1996~2014、2015~2022 年非天然流量序列, 既考虑了长江上游梯级水库建设进程, 也兼顾了 Mann-Kendall 趋势检验分析所得两组突变点的分布状况。采用 33 个水文改变指标(IHA)和变异性范围法(RVA), 计算宜昌水文站相应时段的水文改变度, 如表 2 所示。

4.1. 月均径流

分别统计不同时段各月平均径流量如图 3 所示。自长江流域上游开始兴建水电站后, 宜昌站汛期平均径流量有所下降, 1 月~4 月枯水期则显著增加, 这与梯级水库群调度运行结果相对应, 供水期水库加大下泄流量, 增加发电效益; 汛期水库蓄水防洪, 减小洪水风险。且随水库群规模扩大, 上述趋势在 2015~2022 年更加显著。

结合表 2 可知, 宜昌站的月径流量改变程度呈现枯水期高和汛期较低的趋势, 分别以 1 月、7 月为代表, 分析变化趋势如图 4 所示。1996~2022 年非天然情况下, 宜昌站枯水期平均径流过程显著变化, 不仅波动范围变大, 径流量也显著增加, 2015~2022 年所有样本点均在天然情况界定的 RVA 上界以上, 改变度达 100%。汛期流量改变程度则相对较小, 随水库建成投运, 有一定减小趋势, 呈轻度改变。

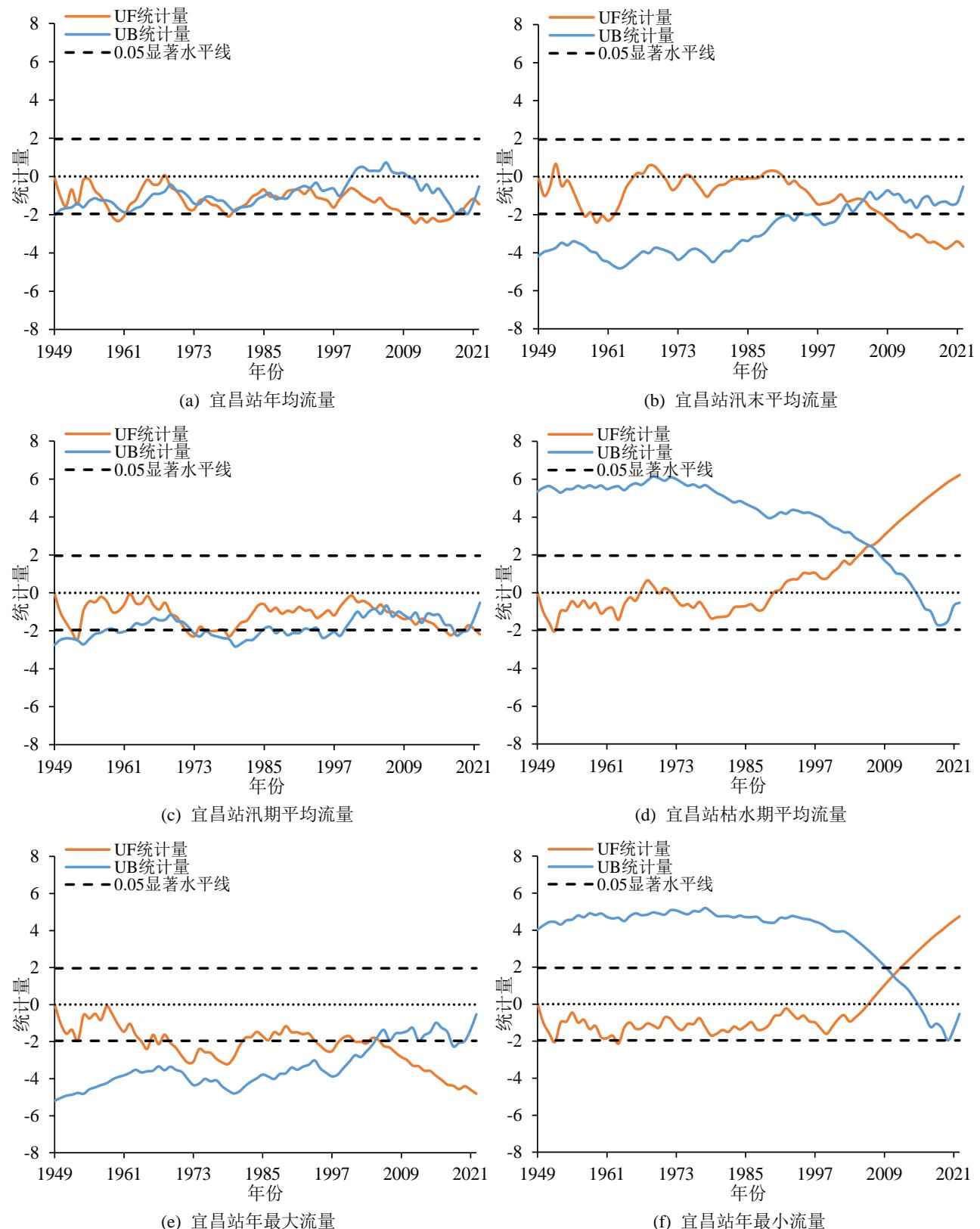


Figure 2. Mann-Kendall test for measured flow at Yichang hydrological station

图 2. 宜昌水文站实测流量 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table 2. IHA indicators and hydrological alternations at Yichang hydrological station
表 2. 宜昌水文站 IHA 指标及水文改变度

组别	IHA 指标	1949~1995			1996~2014		2015~2022	
		均值	RVA 下限	RVA 上限	均值	改变度	均值	改变度
第 1 组(m^3/s)	1 月平均流量	4206	3939	4615	4799	36.8%	7982	100.0%
	2 月平均流量	3793	3488	4078	4525	68.4%	7121	100.0%
	3 月平均流量	4191	3716	4691	5451	47.4%	8359	100.0%
	4 月平均流量	6190	5459	7277	6978	36.8%	10,912	100.0%
	5 月平均流量	11,915	9438	13,493	11,722	26.3%	15,934	50.0%
	6 月平均流量	17,877	15,110	20,688	17,370	47.4%	19,617	25.0%
	7 月平均流量	29,019	26,119	32,955	29,674	26.3%	25,694	50.0%
	8 月平均流量	26,916	22,923	30,405	25,248	5.3%	22,206	25.0%
	9 月平均流量	25,480	21,293	30,602	22,770	15.8%	17,522	50.0%
	10 月平均流量	18,526	16,673	20,158	13,731	78.9%	14,969	50.0%
	11 月平均流量	9896	9015	10,948	8335	57.9%	10,501	75.0%
	12 月平均流量	5901	5407	6494	5875	5.3%	7310	100.0%
第 2 组(m^3/s)	最小 1 d 流量	3450	3195	3645	3890	89.5%	6180	100.0%
	最小 3 d 流量	3477	3210	3675	3917	89.5%	6262	100.0%
	最小 7 d 流量	3521	3264	3741	3980	89.5%	6334	100.0%
	最小 30 d 流量	3674	3387	3966	4306	68.4%	6790	100.0%
	最小 90 d 流量	4031	3747	4400	4818	57.9%	7765	100.0%
	最大 1 d 流量	51,600	45,100	55,550	46,900	15.8%	33,550	75.0%
	最大 3 d 流量	50,100	43,100	53,617	45,700	15.8%	33,183	50.0%
	最大 7 d 流量	44,571	39,600	48,279	40,529	5.3%	32,300	75.0%
	最大 30 d 流量	35,073	30,835	37,708	32,957	15.8%	28,732	75.0%
	最大 90 d 流量	28,497	25,283	31,371	26,994	5.3%	23,562	50.0%
	基流指数	1.7	1.6	1.9	2.2	57.9%	3.2	100.0%
	断流天数(d)	0	0	0	0	0	0	0
第 3 组(d)	最小流量出现时间	52	43	72	45	5.3%	46	25.0%
	最大流量出现时间	203	192	229	212	5.3%	194	25.0%
第 4 组	高流量脉冲次数	6.0	5.0	7.0	6.0	36.8%	6.0	25.0%
	高流量脉冲历时(d)	15.0	12.9	18.2	15.2	26.3%	15.2	0
	低流量脉冲次数	4.0	3.0	5.0	7.0	47.4%	6.5	50.0%
	低流量脉冲历时(d)	22.8	18.2	30.3	13.0	47.4%	14.1	50.0%
第 5 组	流量增加率(%)	7.5	7.0	8.3	6.6	47.4%	5.0	100.0%
	流量减少率(%)	4.2	4.5	4.0	4.7	36.8%	4.5	25.0%
	流量逆转次数	76	70	95	119	89.5%	132	100.0%

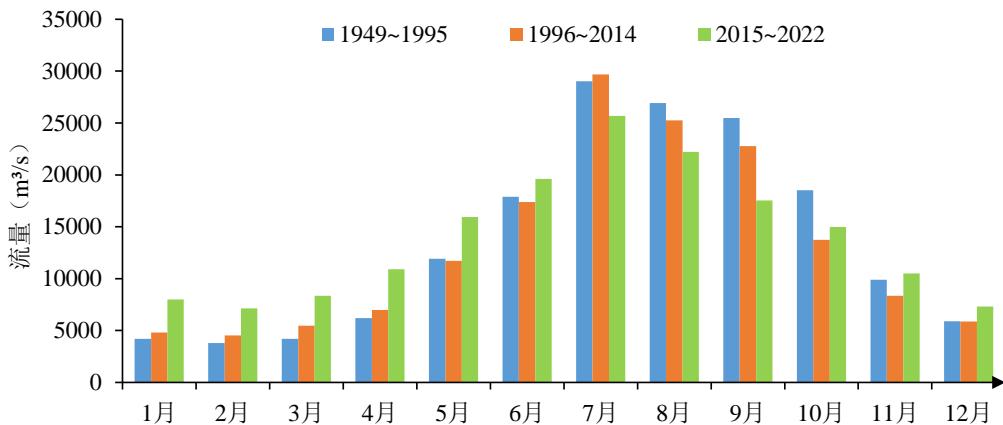


Figure 3. Diagram of average monthly runoff at Yichang hydrological station
图 3. 宜昌站月均径流统计图

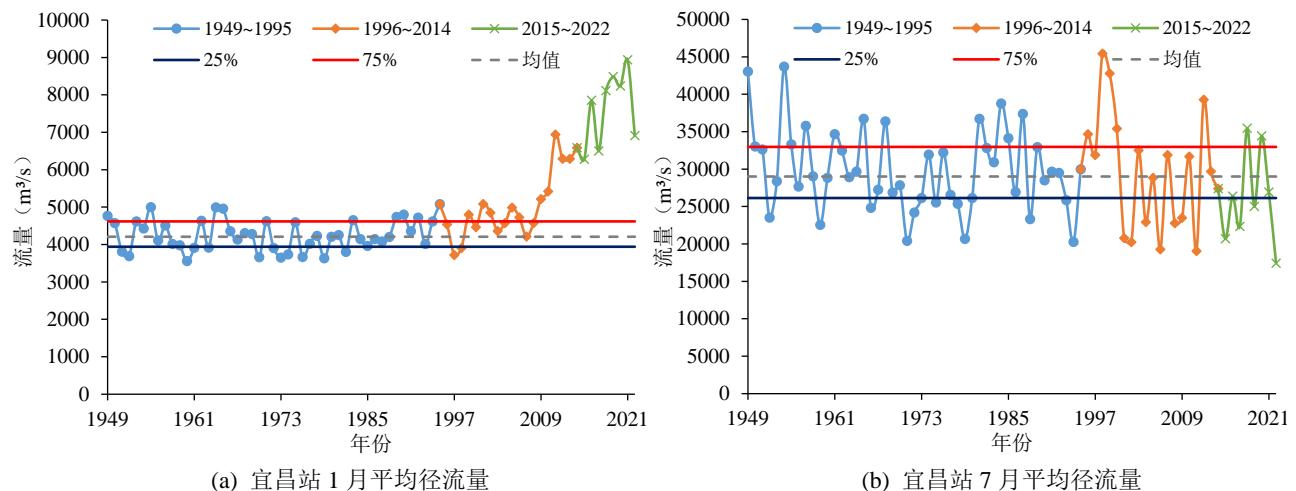


Figure 4. Diagram of average monthly runoff in different periods at Yichang hydrological station (The RVA range and mean in the figure are under natural conditions from 1949 to 1995)
图 4. 宜昌站不同时段月均径流统计图(图中 RVA 阈值范围和均值为 1949~1995 年天然状态下的上下限)

4.2. 极值流量

由表 2 所展示的极值流量可见, 宜昌站流量最小值指标基本为重度改变, 1996~2014 年最大流量指标呈轻度改变, 2014~2022 年最大流量指标则呈中、重度改变, 其中最大 1 d 流量和最小 1 d 流量如图 5 所示。这与水库“削峰填谷”的特点相洽, 也体现出梯级水库联合运行调度对径流过程的改变更加显著。

梯级水库的联合运行改变了径流的时空分配, 不仅影响年极值流量大小, 对极值流量的出现时间同样存在影响。1996~2022 年宜昌站最小 1 d 流量和最大 1 d 流量出现平均时刻仍处于天然序列的 RVA 界限内, 改变度均不高于 25%, 属轻度改变。

4.3. 流量脉冲

高(低)流量脉冲定义为流量值大于(小于)同年日流量序列 75% 上界(25% 下界)的流量过程。宜昌站流量脉冲指标如表 3 所示。由表 2 和表 3 可见, 在流域气候变化和水库运行调度等人类活动综合作用下, 高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; 低流量脉冲次数显著增大, 平均单次历时大幅度下降, 1996~2014 年低流量脉冲指标改变度均为 47.4%, 2014~2022 年则均为 50%, 两段流量序列均呈中度改变。

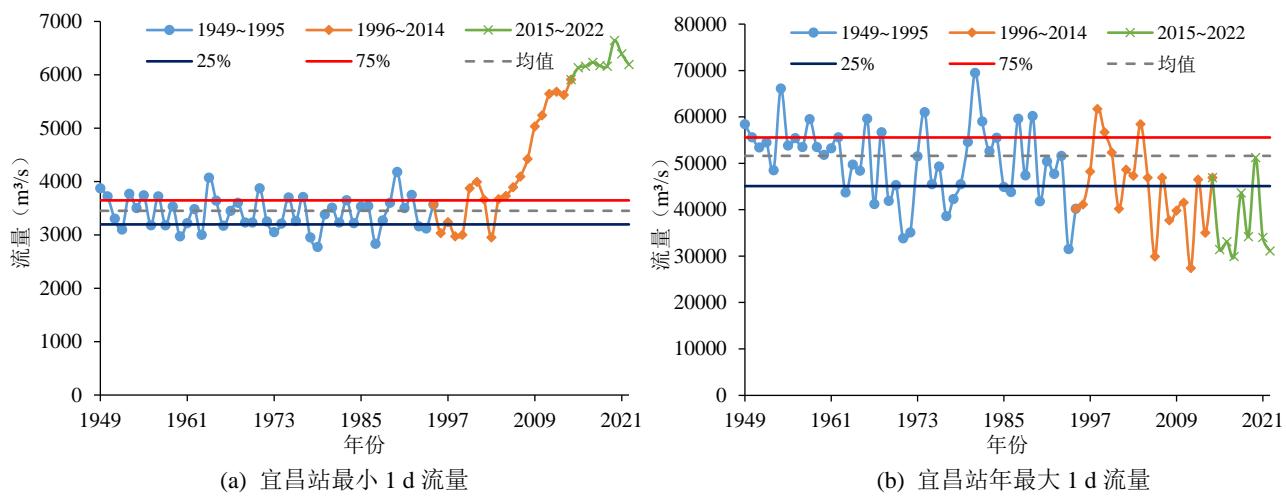


Figure 5. Diagram of annual extreme flow at Yichang hydrological station
图 5. 宜昌站年极值流量统计图

Table 3. Flow pulse indicators at Yichang hydrological station

表 3. 宜昌站流量脉冲指标

IHA 指标 时段	高流量脉冲次数	高流量脉冲平均历时(d)	低流量脉冲次数	低流量脉冲平均历时(d)
1949~1995	6	15.0	4	22.8
1996~2014	6	15.2	7	13.0
2015~2022	6	15.2	6.5	14.1

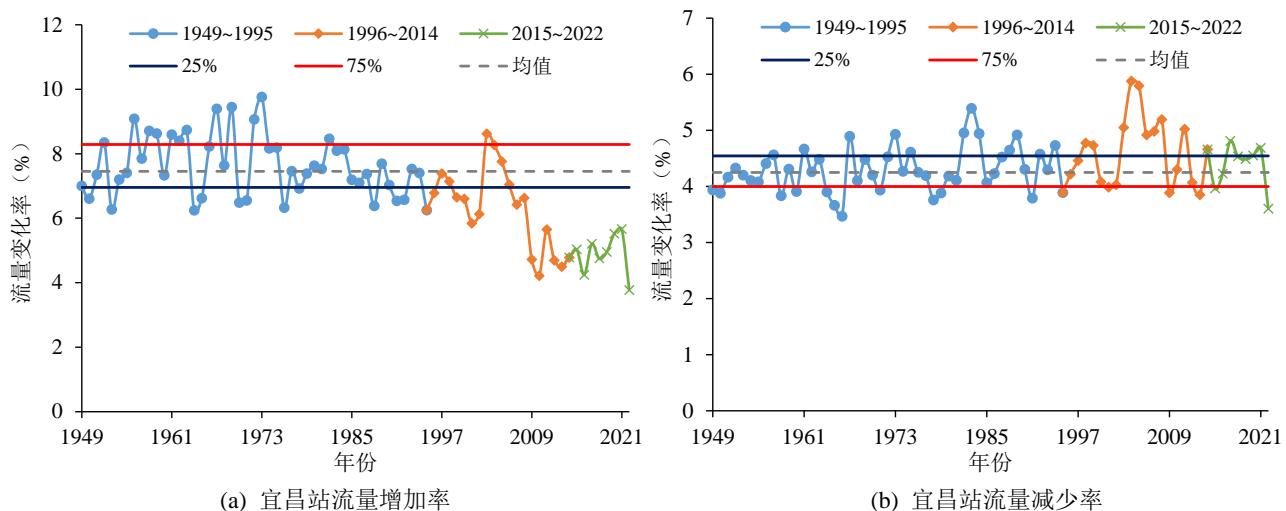


Figure 6. Diagram of flow change rate in different periods at Yichang hydrological station
图 6. 宜昌站不同时段流量变化率统计图

4.4. 流量变化率

流量变化率表示当前时段流量相对前一时间段的增减比例。结合表 2 和图 6 可见，整体而言，非天然状态下流量增加率低于天然状态下平均增加率，流量减少率则基本符合天然状态的分布规律。其中 2003~2006 年，流量增加率和减少率均处于较高水平，考虑到宜昌上游三峡水库于 2003 年首次蓄水，2006 年全机组投运，期间

在水库调度等人为因素和气候变化因素综合作用下，宜昌站观测流量频繁变化，最终导致流量增加率指标改变度偏高，流量减少率则改变度相对较低。

逆转次数表示日流量由增变减或由减变增的次数总和。1996~2014 年和 2014~2022 年，宜昌站逆转次数由天然状态下年均 76 次分别提升至为 119 和 132 次，改变度分别为 89.5% 和 100%。自长江上游梯级水库施工建设后，流量变化更加明显。

4.5. 整体水文改变度

将各项 IHA 指标的水文改变度，按照类别分类并求得每一类别的平均改变度和整体改变度，如表 4 所示。宜昌站水文情势改变是下垫面条件改变和上游水库运行管理直接影响的综合作用结果。整体而言，宜昌站 IHA 指标呈中度、重度改变，且重点体现在月均流量、极端流量和流量变化率相关指标。1996~2014 年流域整体水文情势呈中度改变，改变度为 49.2%，2015~2022 年呈重度改变，改变度为 74.2%。

Table 4. The group average and overall hydrological regime alteration at Yichang hydrological station

表 4. 宜昌站各组平均和整体水文情势改变度

IHA 指标	1996~2014		2015~2022	
	改变度	改变程度	改变度	改变程度
各月均值流量	43.9%	中	74.7%	重
极端流量	57.4%	中	86.3%	重
极值流量出现时间	5.3%	轻	25.0%	轻
流量脉冲情况	40.4%	中	37.5%	中
流量变化率	62.2%	中	82.9%	重
整体水文改变度	49.2%	中	74.2%	重

5. 结论

为探讨长江上游梯级水库建成投运对流域中下游水文情势的影响，本文基于宜昌水文站 1949~2022 年日均流量资料，选用 Mann-Kendall 检验法分析各时期径流量变化趋势，并采用 IHA-RVA 方法定量评估长江流域上游梯级水库群对宜昌站的水文情势改变程度，得到研究结论如下：

1) 宜昌站水文情势受上游梯级水库联合运行调度影响，1996~2014 年水库群初具规模时，整体水位改变度为 49.2%，呈中度改变。随着 2015~2022 年上游水库进一步建设与投运，整体改变度上升至 74.2%，呈重度改变。

2) 宜昌站水文情势变化符合水库“蓄洪补枯”的运行规律，如枯水期流量显著增加，汛期流量相对减少，流量最小值指标重度改变，流量最大值指标中、重度改变，流量脉冲频率和流量变化频率显著增加等，且上述改变将随上游水库群规模扩大进一步加剧。

基金项目

国家十四五重点研发计划课题(2022YFC3202801)；中国长江三峡集团有限公司(0799254)。

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: 1163-1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- [2] GAO, Y., VOGEL, R. M., KROLL, C. N., et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of*

- Hydrology, 2009, 374(1): 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] 李光录, 樊立娟. 基于 IHA-RAV 法的长江源区生态水文情势变化[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 37-42+50.
LI Guanglu, FAN Lijuan. Study on ecohydrological regime change in headwaters of the Yangtze River by using indicators of hydrologic alteration and range of variability approach. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 37-42+50. (in Chinese)
- [6] 郭文献, 陈鼎新, 李越, 等. 基于 IHA-RVA 法金沙江下游生态水文情势评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 155-162.
GUO Wenwen, CHEN Dingxin, LI Yue, et al. IHA-RVA-based assessment of eco-hydrological regime of Lower Jinshajiang River. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(8): 155-162. (in Chinese)
- [7] 冯瑞萍, 常剑波, 张晓敏, 等. 长江干流关键点流量变化及其生态影响分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 57-62.
FENG Ruipin, CHANG Jianbo, ZHANG Xiaomin, et al. Flow variation and ecological impact analysis in the critical sections of the Yangtze River mainstream. Environmental Science & Technology, 2010, 33(9): 57-62. (in Chinese)
- [8] 李翀, 廖文根, 彭静, 等. 宜昌站 1900~2004 年生态水文特征变化[J]. 长江流域资源与环境, 2007(1): 76-80.
LI Chong, LIAO Wengen, PENG Jing, et al. Assessment of eco-hydrological alternation (1900~2004) in Yichang Station of the Yangtze River. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2007(1): 76-80. (in Chinese)
- [9] 王俊娜, 李翀, 廖文根. 三峡-葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 84-90+95.
WANG Junna, LI Chong and LIAO Wengen. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream eco-hydrology. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 84-90+95. (in Chinese)
- [10] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡梯级水库对长江中下游水文情势影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(12): 7-10.
GUO Wenwen, WANG Hongxiang, XU Jianxin, et al. Effects of Three Gorges Cascade Reservoirs on river hydrological regimes of the middle and lower reaches of the Yangtze River. China Rural Water and Hydropower, 2009(12): 7-10. (in Chinese)
- [11] 高芮, 吕殿青, 李景保. 三峡水库蓄水对长江与洞庭湖汇流区生态水文的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 93-103.
GAO Rui, LV Dianqing and LI Jingbao. Influence of Three Gorges Reservoir impoundment on ecohydrology in the confluence area of Yangtze River and Dongting Lake. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022, 31(1): 93-103. (in Chinese)
- [12] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1691-1701.
GUO Qiang, MENG Yuanke, FAN Longfeng, et al. Study on ecological water level variation of Poyang Lake based on IHA and RVA method in recent year. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2019, 28(7): 1691-1701. (in Chinese)