

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220517

三峡建库前后宜昌水文站径流波动情势变化

王现勋¹, 郑 康¹, 许银山², 胡 挺³, 姚华明^{1,4,5}

(1. 长江大学资源与环境学院油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100;

2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 宜昌 443000;

4. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000; 5. 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 针对水库建设前后径流波动情势的变化, 基于宜昌站近70年长系列日径流过程, 使用多个波动量化评估方法, 从离散程度、趋势转变程度、陡度等角度对比分析了三峡水库建设前后不同时期下游径流波动情势的差异。结果表明, 较天然径流情势而言, 水库建设后径流的离散程度减小(主要在防洪库容预留期), 径流的趋势转变程度增大、陡度减小(主要在消落期), 总体上径流的波动情势变化复杂。

关键词: 水文情势; 波动; 水库调度; 宜昌水文站; 三峡水库

中图分类号: TV121⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0007-04

1 概况

宜昌站位于长江中游干流上段, 上游的水库群均会对其径流水文情势产生一定影响, 尤其是三峡等具有调节能力的水库。三峡水库建成前, 宜昌站上游主要水库的累计调节库容仅为宜昌站多年平均径流量的2.59%, 且距离宜昌站较远, 对其径流情势的影响有限。三峡水库建成后, 虽有溪洛渡等巨型水库投入使用, 但其主要作用于三峡水库的入库径流。由此可见, 三峡水库为对宜昌站径流水文情势影响最直接和主要的水库。水库运行不改变径流总量, 主要是调节径流, 改变其变化过程(如波动程度)。关于波动程度的刻画方法, 可分为量维类和形维类^[1], 前者从数量的角度刻画波动程度, 如一阶差分^[2]、标准差^[3]、Richard-Baker Flashiness(简称RBF)^[4]、差异系数^[5]等; 后者从形状的角度刻画波动程度, 如斜率^[6]、长度^[6]、转角^[7]、拐点个数^[8]等。现有研究表明, 量维类和形维类方法均可从某个角度定量描述波动程度, 但又无法替代彼此, 说明了波动的复杂性、多维性。近年来, XIANXUN W等^[9]尝试将量维和形维统一起来, 先后提出了 Quantitative

and Contoured 方法(简称QC方法)^[1]和 Mei-Wang Fluctuation 方法(简称MWF方法), 其中MWF方法已应用于径流^[10]和电站出力^[11]等时间序列的波动程度研究中。已有研究大多试图使用一系列指标或某一综合指标刻画径流水文情势的全貌, 而对径流波动程度变化的关注较少, 特别是水库运行引起的径流波动情势变化。鉴此, 本文以宜昌站1952年1月1日~2020年12月31日的长系列日径流过程为例, 使用多个波动量化评估方法, 从量维波动和形维波动的角度, 分析了三峡建库前后宜昌站径流波动情势的变化, 探究了水库运行对径流波动情势的影响, 以期研究水库运行对径流水文情势的影响提供参考。

2 波动量化评估方法

鉴于波动的复杂性和多维性, 本文同时使用标准差、一阶差分、差异系数、RBF共4种量维类方法及转角、斜率、拐点个数、过程线长度共4种形维类方法, 刻画宜昌站的径流波动情势。

以控制点坐标为 (x_i, y_i) 的时间序列为例, 量维类方法、形维类方法的算式见表1。

收稿日期: 2022-03-18, **修回日期:** 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1865201); 国家自然科学基金项目(51979198)

作者简介: 王现勋(1982-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水资源规划与管理, E-mail: xianxunwang@gmail.com

通讯作者: 姚华明(1963-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水资源系统工程, E-mail: huaming.yao@qq.com

表 1 量维类方法、形维类方法算式

Tab. 1 Functions of quantitative method and contoured method

方法	名称	符号	算式
量维类	标准差(SD)	α_{SD}	$\alpha_{SD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$
	一阶差分(FOD)	α_{FOD}	$\alpha_{FOD} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} y_{i+1} - y_i $
	差异系数(CV)	α_{CV}	$\alpha_{CV} = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$
	RBF	α_{RBF}	$\alpha_{RBF} = \frac{\sum_{i=2}^{N-1} 0.5(y_{i+1} - y_i + y_i - y_{i-1})}{\sum_{i=1}^N y_i}$
形维类	转角 ^[12] (RA)	β_{RA}	$\beta_{RA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\exp(\theta_i) - 1)]$ $\theta_i = \begin{cases} \arctan k_i & i=1 \text{ 或 } N \\ \arctan k_i - \arctan k_{i-1} & 2 \leq i \leq N-1 \end{cases}$ $k_i = \begin{cases} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} & 1 \leq i \leq N-1 \\ \frac{y_N - y_{N-1}}{x_N - x_{N-1}} & i=N \end{cases}$
	过程线长度(LT)	β_{LT}	$\beta_{LT} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$
	拐点个数(ND)	β_{NI}	$\beta_{NI} = \frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^{N-1} \delta_i$; $\delta_i = \begin{cases} 0 & k_i k_{i-1} > 0 \\ 1 & k_i k_{i-1} < 0 \end{cases}$
	斜率(SL)	β_{SL}	$\beta_{SL} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} k_i$

注: x_i, y_i 分别为时间序列控制点横、纵坐标; i 为控制点编号; N 为控制点总个数; k_i 为相邻两个控制点之间连线的斜率; 标准差、差异系数的单位与 y_i 一致, 转角的单位为 rad, 斜率的单位为 y_i 的单位与 x_i 的单位的比, 其余指标的单位均为 1; 为避免时间序列长度对结果的影响, 对一阶差分、转角、斜率、拐点个数、过程线长度进行了平均处理。

3 三峡建库前后宜昌水文站径流波动情势变化

从运行阶段、水文条件、运行任务三个角度, 研究三峡水库运行对宜昌站波动情势的影响。根据三峡水库建设和运行进度, 可将整个研究期分为建库前阶段(1952~2002年)、围堰发电阶段(2003~2006年)、初期运行阶段(2007~2010年)、正常运行阶段(2011~2020年)。根据三峡水库正常运行阶段年内不同时期的水文条件和运行任务, 可将水文年分为防洪库容预留期(6月11日~9月10日)、蓄水期(9月11日~10月31日)、消落期(11月1日~次年6月10日)。

3.1 量维波动

图 1 为不同运行阶段宜昌站径流每年的量维波动统计结果。由图 1 可知, 使用 SD、FOD、CV、RBF 刻画的量维波动结果一致, 均显示三峡水库正常运行后较建库前而言, 宜昌站径流全年量维波动呈下降趋势。其中, 宜昌站径流在全年范围的 SD 多年平均值由建库前的 10 635 m³/s 降为

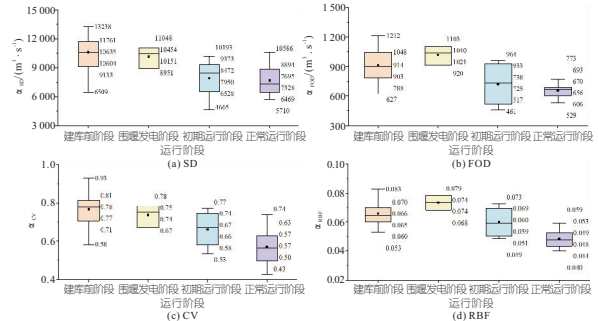


图 1 全年范围内各阶段宜昌站径流的量维波动箱线图
Fig. 1 Box plot of yearly quantitative variation of Yichang station in each stage

7 695 m³/s, FOD 多年平均值由 914 m³/s 降为 656 m³/s, CV 多年平均值由 0.78 降至 0.57, RBF 多年平均值由 0.066 降至 0.049。这表明三峡水库运行明显减小了下游宜昌站径流的量维波动(约 1/4)。究其原因应为三峡水库蓄丰补枯调节运行使丰水流量变小和枯水流量变大。由于围堰发电阶段和初期运行阶段时间相对较短, 且三峡水库的调节作用未完全发挥, 其变化趋势并不稳定。

考虑到三峡水库在年内不同时期的运行任务不同, 其水库具体调节运行方式迥异, 进一步分析了宜昌站径流的量维波动在防洪库容预留期、蓄水期、消落期特定范围内建库前阶段与正常运行阶段之间的差异。鉴于 4 种方法对量维波动的刻画结果较一致, 选择 SD 展开介绍, 结果见表 2。由表 2 可知, 宜昌站径流的量维波动在建库前阶段与正常运行阶段之间存在差异, 在防洪库容预留期较明显, 在消落期的差异相对较小。说明三峡水库在防洪库容预留期的防洪调度运行方式相对蓄水期、消落期的兴利调度运行方式而言, 对下游宜昌站径流的量维波动削减作用更明显。

表 2 防洪库容预留/蓄水/消落期范围内建库前阶段与正常运行阶段之间 SD 差异对比

Tab. 2 Comparison of SD difference between pre-storage and normal operation stage within flood control storage capacity reservation/refilling/drawdown period

项目	时期	建库前阶段	正常运行阶段	差值(正常运行-建库前)	差值百分比/%
平均值	防洪库容预留期	9 124	6 675	-2 448	-26.8
	蓄水期	5 454	4 275	-1 179	-21.6
	消落期	3 855	3 461	-394	-10.2
中位数	防洪库容预留期	9 037	6 568	-2 469	-27.3
	蓄水期	5 104	4 057	-1 046	-20.5
	消落期	3 759	3 648	-111	-3.0
最值差	防洪库容预留期	9 402	6 337	-3 065	-32.6
	蓄水期	9 944	8 855	-1 089	-11.0
	消落期	4 006	3 103	-903	-22.6

注: 建库前阶段、正常运行阶段、差值(正常运行-建库前)单位为 m³/s。

3.2 形维波动

图 2 为不同运行阶段宜昌站径流每年的形维波动统计结果。由图 2 可知, 使用 RA、SL、NI、

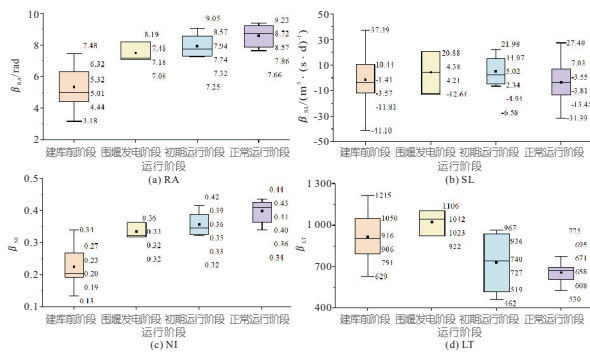


图 2 全年范围内各阶段宜昌站径流的形维波动箱线图
Fig. 2 Box plot of yearly contoured variation of Yichang station in each stage

LT 四个指标刻画的形维波动结果不完全一致。RA 指标刻画的是时间序列波动方向转变程度; NI 指标反映了波动方向由正/负向转为负/正向的情况(纵轴向上为正); SL 指标刻画的是时间序列波动的方向和速率; LT 指标刻画的是时间序列波动的陡度。在建库前后不同阶段之间对比, RA、NI 指标呈上升趋势, SL、LT 指标则呈下降趋势。可知三峡建库后宜昌站径流的波动方向转变程度有所上升;建库后宜昌站径流波动的整体

表 3 防洪库容预留/蓄水/消落期范围内建库前阶段与正常运行阶段之间 RA、LT 差异对比

Tab. 3 Comparison of RA and LT difference between pre-storage and normal operation stage within flood control storage capacity reservation/refilling/drawdown period

项目	时期	β_{RA}				β_{LT}			
		建库前 阶段/rad	正常运行 阶段/rad	差值(正常运 行-建库前)/rad	差值百 分比/%	建库前 阶段	正常运 行阶段	差值(正常运 行-建库前)	差值百 分比/%
平均值	防洪库容预留期	5.44	7.80	2.36	43.5	2 109	1 263	846	40.1
	蓄水期	4.77	7.16	2.40	50.3	1 112	856	256	23.0
	消落期	5.39	9.13	3.74	69.3	377	358	20	5.2
中位数	防洪库容预留期	5.36	7.91	2.55	47.5	2 047	1 182	865	42.3
	蓄水期	4.74	7.61	2.87	60.7	1 080	803	277	25.7
	消落期	4.75	9.07	4.32	91.1	369	373	-4	-1.0
最值差	防洪库容预留期	4.23	3.82	-0.41	-9.8	1 831	537	1 294	70.7
	蓄水期	5.49	6.07	0.58	10.6	2 195	1 482	712	32.5
	消落期	5.84	2.29	-3.55	-60.8	382	207	175	45.7

4 结论

三峡水库调节运行后下游径流量维波动变小,即离散程度降低,尤其是在防洪库容预留期防洪调度运行方式下;其形维波动亦变化明显,其中转角、拐点个数的指标变大,斜率、过程线长度的指标变小。进一步说明了径流波动情势的复杂性和多维性,后续将针对水库发电等某一项具体任务开展深入研究。

参考文献:

[1] 王现勋,梅亚东,肖伟华,等. 基于量维和形维的风水联合出力波动量化评估[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 103-107,132.

方向为负向,且速率在加快;建库后宜昌站径流波动的陡度有所减缓。表明形维波动的刻画是复杂的,现有常见方法尚不能描述其全貌,更说明三峡建库前后确实引起了径流形维波动的变化。

在结果显示上升趋势的指标中选择 RA、在结果显示下降趋势的指标中选择 LT 进一步分析宜昌站径流形维波动在防洪库容预留期、蓄水期、消落期特定范围内建库前阶段与正常运行阶段之间的差异,见表 3。由表 3 可知:①宜昌站径流的 RA 指标值在建库前阶段与正常运行阶段之间的差异在消落期较为明显,平均值增加了 69.3%,中位数增加了近一倍(91.1%),最值差减少了 60.8%。②宜昌站径流的 LT 指标与 RA 指标有所不同,虽然在整体上呈正常运行阶段指标值小于建库前阶段的趋势,但其差别主要体现在防洪库容预留期(RA 指标的差别主要体现在消落期)。进一步说明了径流的形维波动的复杂性,需从不同角度刻画径流的形维波动情势,也再次表明三峡水库防洪、发电供水等运行方式对径流波动情势影响明显。

[2] 王开艳,罗先觉,吴玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.

[3] ZIMMERMAN J K H, LETCHER B H, NISLOW K H, et al. Determining the effects of dams on sub-daily variation in river flows at a whole-basin scale [J]. River research and applications, 2010, 26(10): 1246-1260.

[4] BAKER D B, RICHARDS R P, LOFTUS T T, et al. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams [J]. JAWRA journal of the American water resources association, 2004, 40(2): 503-522.

[5] 闻昕,孙圆亮,谭乔凤,等. 考虑预测不确定性的风-光-水多能互补系统调度风险和效益分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 32-41.

[6] BEVELHIMER M S, MCMANAMAY R A, O'CONNOR B. Characterizing sub-daily flow regimes: implications of hydrologic resolution on ecohydrology studies[J]. *River research and applications*, 2015, 31(7):867-879.

[7] 王现勋, 梅亚东, 段文辉, 等. 抽水蓄能电站运行优化模型[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2008(2):1-3.

[8] KERN J D, PATINO-ECHEVERRI D, CHARACKLIS G W. The impacts of wind power integration on sub-daily variation in river flows downstream of hydroelectric dams[J]. *Environmental science & technology*, 2014, 48(16):9844-9851.

[9] XIANXUN W, YADONG M, HAO C, et al. A new fluctuation index: characteristics and application to hydro-wind systems[J]. *Energies*, 2016, 9(2), 114.

[10] XIANXUN W, EDGAR V, LIHUA C, et al. New index for runoff variability analysis in rainfall driven rivers in southeastern United States[J]. *Journal of hydrologic engineering*, 2019, 24(12):05019031-1-05019031-11.

[11] ZHANG X, MA G, HUANG W, et al. Short-term optimal operation of a wind-PV-hydro complementary installation: Yalong River, Sichuan Province, China[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 868.

[12] XIANXUN W, LIHUA C, QIJUAN C, et al. Model and analysis of integrating wind and PV power in remote and core areas with small hydropower and pumped hydropower storage[J]. *Energies*, 2018, 11(12):1-24.

Differences of Runoff Fluctuation Regime of Yichang Hydrologic Station After Construction of Three Gorges Reservoir

WANG Xian-xun¹, ZHENG Kang¹, XU Yin-shan², HU Ting³, YAO Hua-ming^{1,4,5}

(1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. China Three Gorges Corporation, Yichang 443000, China; 4. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China; 5. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the difference of the runoff fluctuation regime after the construction of reservoir, this paper adopted several fluctuation quantification methods to analyze the difference of downstream runoff fluctuation regime after the construction of Three Gorges reservoir from the dispersion, tendency and steepness change degrees on the basis of nearly 70-year long time series of runoff data at Yichang hydrologic station. Compared with the natural runoff regime, the results show that the dispersion degree of runoff decreases (mostly in flood control storage capacity reservation period), the tendency change degree of runoff increases and the steepness reduces (mainly in drawdown period), and totally the fluctuation regime changes intricately.

Key words: hydrology regime; fluctuation; reservoir regulation; Yichang hydrological station; Three Gorges Reservoir

(上接第 18 页)

Numerical Simulation of Dynamic Change of Groundwater Level in Linfen Basin

DUAN Xu-dong¹, LI Hai-ming¹, QIU Ya-qin², XIAO Han³, LV Xiang-lin², DONG Hao², ZHENG Hao¹
(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300450, China; 2. National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100078, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the GMS software, a numerical model of groundwater flow in the Linfen Basin was established to predict the groundwater level under different driving factor scenarios, and the impact of different driving factors on groundwater level changes was quantified. The results show that only in the precipitation scenarios (dry, normal, and wet), the variation of shallow groundwater is greater than that of confined groundwater. When the precipitation is from 458.8 mm to 568.0 mm, the absolute value of the difference in the annual average water level change rate of the shallow groundwater is 0.11 m; Only under the pressure extraction scenario (extraction volume in 2018 as the benchmark), both shallow groundwater and confined groundwater have great changes. When the pressure extraction increases from 0% to 50%, the absolute value of the annual average water level change rate difference between shallow groundwater and middle-deep confined water is 0.16 m and 0.25 m, respectively; Under the situation of the rising water level of the Fenhe River, only the shallow groundwater on both sides of the river will be affected to a certain extent. The research results can provide a certain scientific basis for the rational utilization of groundwater in the Linfen Basin.

Key words: groundwater numerical simulation; groundwater level; GMS; Linfen Basin