



宜昌—城陵矶河段枯水位时空变化特征分析

汪静怡, 何阳, 舒紫默

(长江航道测量(武汉)中心, 湖北武汉430010)

摘要: 通过收集并整理长江宜昌至城陵矶河段枯水期34个水尺的水位数据, 采用皮尔逊相关分析和自相关分析, 研究各水尺之间的时空相关性, 揭示了近十年来枯水期的水位时空变化特征。研究发现: 1) 该河段大部分水尺水位呈平稳变化趋势, 其中铁铺、反嘴、城陵矶最大、最小枯水位差值在3.2 m以上; 2) 上下游水尺水位之间的相关系数最小为0.936, 表明相邻水尺位置存在较强的水文连通性; 3) 历史水位在20个时间滑动窗口即历史7 d内对当前时刻水位产生了较大影响。研究成果可为理解长江中游水文环境动态变化提供参考, 对水资源管理和防洪减灾具有重要意义。

关键词: 宜昌—城陵矶; 枯水位; 时空变化; 相关分析

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0154-07

Spatial-temporal variation characteristics of low water level from Yichang to Chenglingji section

WANG Jingyi, HE Yang, SHU Zimo

(Changjiang Waterway Bureau Survey(Wuhan)Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: By collecting and organizing the water level data from 34 water gauges during the dry seasons in Yichang-Chenglingji section of the Yangtze River, Pearson correlation analysis and autocorrelation analysis are used to study the spatial-temporal correlation among the gauges, revealing the characteristics of water level spatial-temporal changes during the dry seasons over the past decade. The research findings are as follows: 1) The water levels at most gauges in this section have shown a stable trend, with the maximum and minimum dry water level differences at Tiepu, Fanzui, and Chenglingji being more than 3.2 meters. 2) The correlation coefficient between upstream and downstream gauges is at least 0.936, indicating a strong hydrological connectivity between adjacent gauge locations. 3) Historical water levels in a 20-time sliding window, i. e., within the past 7 days, have a significant impact on the current water level. The research outcomes can provide reference for understanding the dynamic changes in the hydrological environment of the middle reaches of the Yangtze River, and are of great significance for water resources management and flood control and disaster reduction.

Keywords: from Yichang to Chenglingji; low water level; spatial-temporal variation; correlation analysis

航道的水文特性变化对航运安全、航道治理、区域生态安全及经济发展具有显著的影响。尤其是长江中游河段, 不仅地理位置优越, 而且承载着丰富的自然资源和人文历史, 其水位波动直接关系到沿岸地区防洪安全、水资源调配及航道运

输等重大问题^[1-2]。因此, 深入分析长江中游水位变化特征, 对于科学认识长江水文规律、优化水资源管理以及指导区域可持续发展具有重要的理论和实践意义。

自三峡水库投入蓄水运营以来, 其库区拦截

收稿日期: 2024-12-28

作者简介: 汪静怡(1997—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为航道测绘和信息化。

了大量泥沙,使得排入长江中下游的沙量显著降低,从而导致长江中下游河段河床在较长时间和较大距离上出现持续的冲刷和调整^[3]。蓄水后,长江中游的枯水位呈现出趋势性下降,且这一趋势没有显示出任何逆转的迹象。坝下游的长距离冲刷导致枯水河槽冲刷量占平滩河槽的比例逐年增加,枯水河槽的显著冲刷下切成为枯水位下降的主要控制因素。经过二十多年的蓄水,长江中游航道的枯水位变化总体上表现为累计性下降且下降幅度不均匀。在空间分布上,不同站点受到不同主导因素的影响,表现出差异性。在时间序列上,汛枯转换提前,枯水期有所延长。这些变化是河槽冲刷、支流来水等多种复杂因素共同作用的结果,对于葛洲坝三江下引航道的运行、下游航道的通航能力以及江湖间的相互关系均具有重要的影响^[4]。因此,自从三峡水库蓄水后,对下游枯水期水位的变化一直是研究和监测的重点^[5-6]。而宜昌—城陵矶河段作为长江中游的重要组成部分,其枯水期水位的变化特征对于揭示整个中游河段的水文响应机制具有重要意义。

国内外学者采用多种方法对航道枯水位变化进行研究,包括时间序列分析、统计方法、一维水动力模型以及实地观测等。如韩剑桥等^[7]利用1955—2012年长江中游各水文站的水位、流量资料,采用改进的时间序列分析方法,研究三峡水库运行前后长江中游洪、枯水位变化特征。温国楠^[8]采用统计方法,分析兴隆水利枢纽运行后汉江下游枯水位变化。章广越等^[9]使用一维水动力模型,识别水位变化的临界转换流量并解释其成因。实地观测数据,如枯水位监测点的观测值和河床地形资料,也被结合数学模型用来归纳枯水位降幅的时空分布规律^[10]。雷雪婷等^[11]对长江干线中下游航道枯水位进行变异特性研究。这些方

法的综合应用为理解和预测长江航道中游枯水位变化提供了多角度的科学依据,但目前同时从时间和空间2个维度对长江航道中游多水尺水位变化的研究还相对较少。

本文通过对长江中游宜昌—城陵矶河段近10 a枯水期水位数据的收集、整理和分析,揭示该河段枯水期水位的时空变化特征。对各水尺站点水位差异及历史数据进行研究,探索不同站点的枯水位变化特定规律和特征。旨在通过此项研究,深入了解长江中游枯水期水位的变化规律,为长江流域水资源管理和生态保护提供科学依据,并为应对未来可能出现的水文极端事件提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 数据介绍

本文的研究数据来自于历年长江中下游航道泥沙原型观测项目,长江中游宜昌—城陵矶河段全长约400 km^[12],通过在该河段内设置的34个水尺进行枯水期水位观测。水尺分布见图1,每天采集08:00:00、14:00:00和18:00:00共3个时间点的水位数据。本文收集了2013—2022年共10 a的枯水期水位数据,涵盖了每年11月至次年4月的观测记录。沿程水尺编号及名称见表1。

表1 沿程水尺编号及名称

Tab. 1 Numbers and names of water gauges along the route

序号	水尺名	序号	水尺名	序号	水尺名	序号	水尺名
1 [#]	宜昌	10 [#]	毛家花屋	19 [#]	大埠街	25 [#]	石首
2 [#]	白沙脑	11 [#]	姚港	19+ [#]	六条路	26 [#]	小河口
3 [#]	红花套	12 [#]	昌门溪	20 [#]	澧市	27 [#]	调关
4 [#]	周家河	13 [#]	李家渡	20+ [#]	陈家湾	28 [#]	监利
5 [#]	宜都	14 [#]	枝江	20+1 [#]	杨家湾	29 [#]	铁铺
6 [#]	白洋	15 [#]	宝筏寺	21 [#]	沙市	30 [#]	反嘴
7 [#]	枝城	16 [#]	下曹家河	22 [#]	公安	31 [#]	城陵矶
8 [#]	车阳河	17 [#]	七星台	23 [#]	郝穴		
9 [#]	陈二口	18 [#]	罗家台	24 [#]	黄水套		

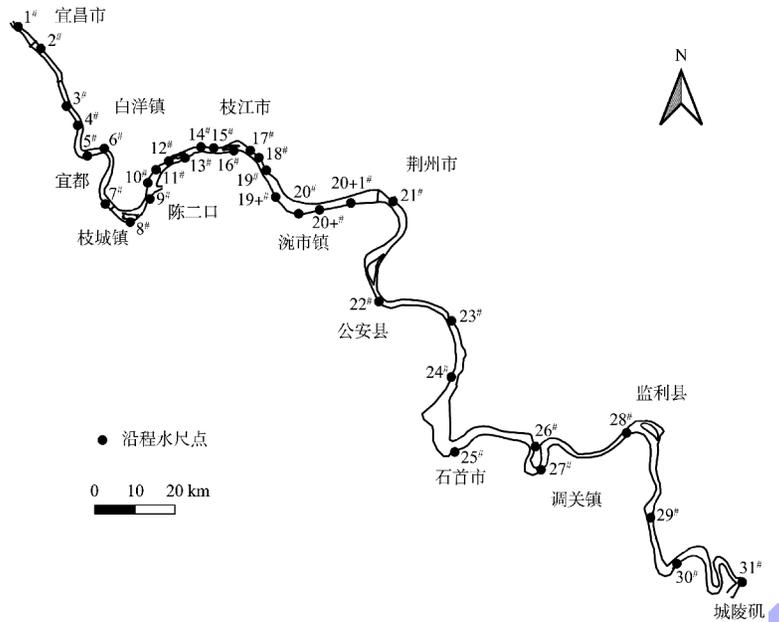


图1 研究区域观测水尺分布

Fig. 1 Distribution of water gauges in the study area

1.2 研究方法

皮尔逊相关系数 r 常被用来计算要素之间的相关性，如束龙仓等^[13]利用皮尔逊相关分析和灰色关联度方法分析水位变化与降水相关性，郭艺等^[14]利用自相关分析法分析不同含水层的地下水动态变化规律。为了研究长江中游宜昌—城陵矶河段近 10 a 枯水期水位的时空变化，本文采用皮尔逊相关系数计算当前水尺和上游水尺之间的相关性，采用自相关系数计算特定水尺当前时刻水位和前一时刻水位之间的相关性，结果使用 Python 的 Matplotlib 库进行可视化。

1.2.1 皮尔逊相关性分析

皮尔逊相关系数^[15]可以衡量 2 个变量之间线性关系强度和方向，其范围为-1~1。当该系数为 0 时，表明 2 个变量之间不存在线性关系；正值表示变量间存在正向的线性关系；负值则表明变量间存在负向的线性关系。皮尔逊相关系数的绝对值越大，表示 2 个变量之间的线性关系越强，计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中： \bar{X} 和 \bar{Y} 为每组数据的平均值； X_i 和 Y_i 为每组数据中的值； n 为每组数据的数量。

一般情况下可以认为， $|r| \geq 0.8$ 时，表示 2 个变量非常强相关； $0.5 \leq |r| \leq 0.8$ 时，表示 2 个变量强相关； $0.3 \leq |r| \leq 0.5$ 时，表示 2 个变量弱相关； $|r| \leq 0.3$ 时，表示 2 个变量之间的关系极弱，可视为非线性关系。

1.2.2 自相关分析

采用自相关系数^[16]计算特定水尺位置当前时刻水位和前一时刻水位之间的相关性，自相关系数越显著，时间相关性越强。自相关系数计算如下：

$$K_1 = \frac{\text{Cov}(y(t), y(t+k))}{\sigma_{y(t)} \sigma_{y(t+k)}} \quad (2)$$

式中： K_1 为自相关系数； $y(t)$ 和 $y(t+k)$ 分别为在时间 t 和 $t+1$ 时的水尺水位值； $\text{Cov}()$ 为计算变量之间的协方差函数； σ 为变量的标准差。

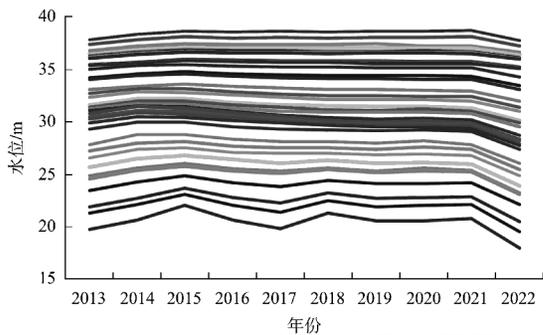
2 枯水位时空变化特征分析

2.1 年际枯水位变化特征分析

宜昌—城陵矶沿程 34 个水尺平均枯水位变化见图 2，可以作为监测长江中游水文情势变化的重要指标，通过这些数据，可以了解长江流域的水

文周期性变化, 对于水文研究和水资源管理具有重要意义。观察可知, 在 10 a 的时间里, 各水尺的枯水位平均值变化相对平稳, 趋势大体一致, 水位平均值介于 38.69~17.96 m, 沿程呈现逐级降低的特点。

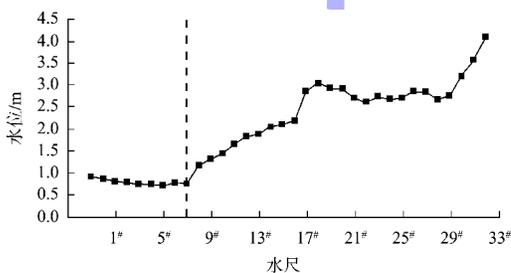
十年来每个水尺水位平均值最大、最小差值的变化曲线见图 3。从上游至下游观察, 最大、最小枯水位差值整体上呈现出逐渐增大的趋势。以陈二口为分界, 宜昌—陈二口变化平稳, 平均水位变化不超过 1 m; 陈二口—城陵矶水位差值逐渐升高。该结论与以往研究一致^[17]。特别是, 下游的铁铺、反嘴、城陵矶, 其平均枯水位差值超过了 3.2 m。



注: 线条代表宜昌—城陵矶的各水尺。

图 2 各水尺平均年际枯水位变化

Fig. 2 Change in average interannual low water level of each water gauge



注: 虚线代表陈二口与毛家花屋之间的分界。

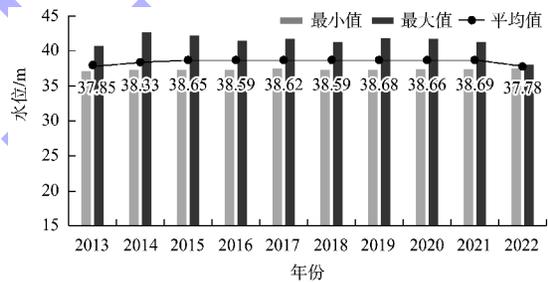
图 3 各水尺十年来枯水位差值变化

Fig. 3 Change in low water level difference of each water gauge over the past decade

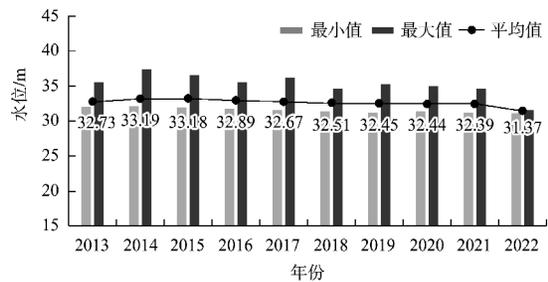
据水利部公报, 2022 年夏季长江遭遇自 1961 年以来最严重干旱气象, 汛期发生流域性严重枯水, 各主要站月最低水位均打破历年同期最低记

录。研究指出^[18], 2022 年长江流域出现严重枯水现象的主要原因包括: 1) 异常的大气环流导致流域内持续的晴朗炎热和高温少雨天气, 使得上下游的水量补给均不充分; 2) 持续的高温枯水期延长, 流域内蒸发量增大, 导致严重的水分不足; 3) 沿江地区的大量取用水进一步降低了河流的径流量。因此, 自 2021 年后, 长江宜昌—城陵矶河段各水尺枯水位整体出现明显的下降趋势。2022—2023 年铁铺、反嘴、城陵矶站点的枯水位明显下降, 导致最大、最小水位差值增大。

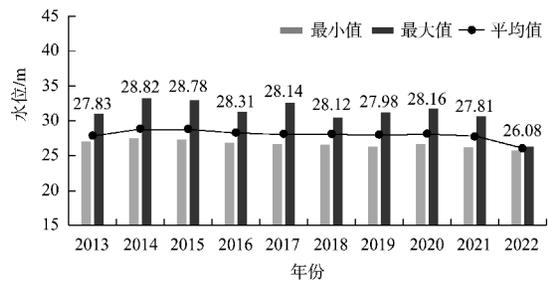
本文以宜昌、枝江、公安、城陵矶水尺站点为例, 对每年枯水位的最小值、最大值和平均值进行可视化展示, 结果见图 4。其中, 城陵矶水位变化幅度较大, 尤其在 2015—2016 年; 而枝江水位变化相对较小, 2022—2023 年的水位变化仅为 0.39 m。



a) 宜昌



b) 枝江



c) 公安

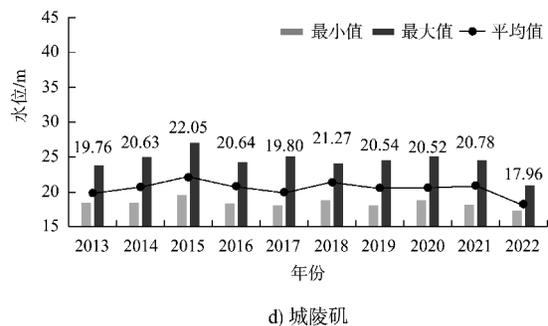


图 4 各站点水尺水位变化

Fig. 4 Water level change of water gauge at each station

2.2 枯水位时空变化分析

2.2.1 上下游水尺之间的相关性

本文计算了当前水尺与上游水尺的皮尔逊相关系数，34 个水尺共得出 33 组系数，见图 5。其中，相关系数在 0.99 以上的有 23 组；最大为白洋和枝城之间的相关性，达到 0.999；最小为陈二口和毛家花屋之间的相关性，系数为 0.936。整体来看，当前水尺与其上游水尺水位之间相关性显著，表明相邻水尺水位之间存在着较强的水文连通性。

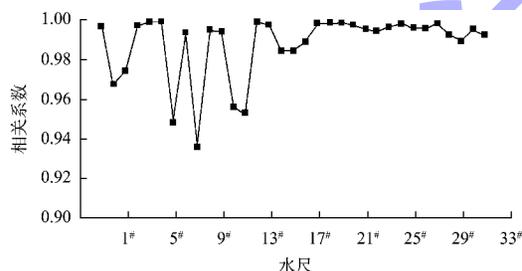


图 5 相邻水尺水位之间的皮尔逊相关系数

Fig. 5 Pearson correlation coefficients of adjacent water gauge levels

此外，本文还计算了当前水尺与其下游多个水尺之间的相关性，绘制了空间相关性热力图，见图 6，宜昌—陈二口、陈二口—城陵矶河段内水尺之间的相关性均较强。该结论与图 3 结果一致，说明水位的变化与水尺之间的相关性存在一定关联。

有统计表明^[19]，纳入长江流域联合调度的水利工程数量已从最初的 10 座增至 127 座，实现了多目标综合调度。研究水位之间的连通性有助于长江流域联合调度。

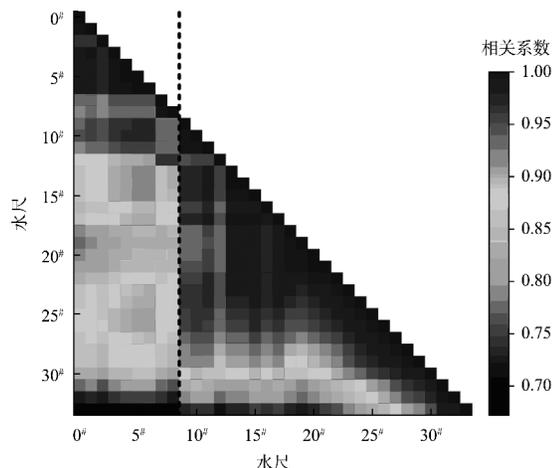


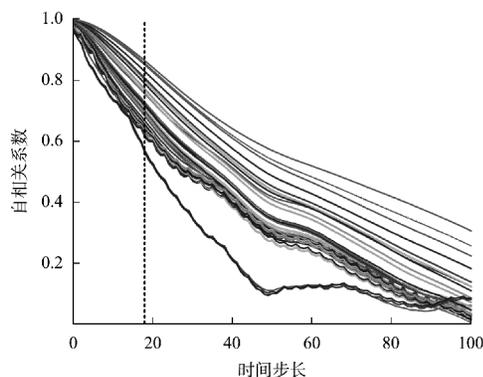
图 6 各水尺之间的空间相关性热力图

Fig. 6 Spatial correlation heatmap of each water gauge

2.2.2 当前水位与历史时刻水位的相关性

计算的当前水位与历史时刻水位的自相关系数见图 7。图 7a) 为沿程各水尺的数据，系数越大，表明当前与历史时刻水位的相关性越大。可以看出，当输入时间步长为 20(7 d) 左右时，各水尺水位的相关性较强，达到 0.6 左右。每天有 3 个时刻的水位数据，因此可以认为历史数据 7 d 内的水位与当前水位的相关性较强。

图 7b) 以宜昌、枝江、公安、城陵矶 4 个水尺为例，展示了其当前水位与历史水位的相关性变化。其中，公安水尺的历史相关性最强，城陵矶水尺最弱。提供历史水位数据与当前水位之间的相关性，有助于预测未来水位变化趋势，对洪水预警和干旱监测具有重要作用，可以为制定与水位变化相关的政策和法规提供科学依据，今后也可利用历史相关性对公安等位置的水尺进行水位预测，提高预测精度。



a) 沿程各水尺

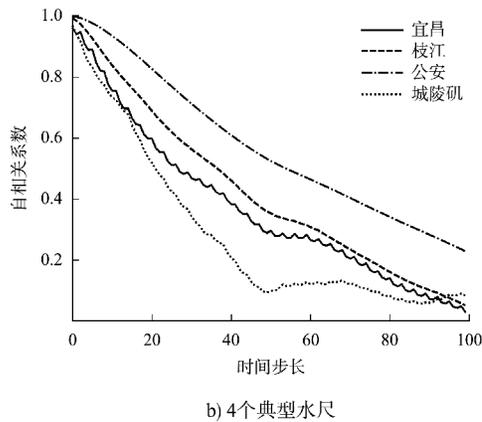


图 7 沿程各水尺当前与历史时刻水位的自相关系数

Fig. 7 Coefficient of current and historical water levels at each water gauge

3 结论

1) 通过对宜昌—城陵矶河段 34 个水尺在过去 10 a 的枯水位变化进行分析, 结果表明, 该河段各水尺点枯水位 10 a 平均值变化相对平稳, 各水尺整体变化趋势一致。河段最大水位在 2021 年宜昌水尺站, 为 38.69 m; 最小水位在 2022 年城陵矶水尺, 为 17.96 m。水位从宜昌至城陵矶逐级降低, 其中陈二口以上区域水位变化较小, 不超过 1 m, 而陈二口以下至城陵矶的枯水位变化幅度逐渐增大, 尤其是铁铺、反嘴、城陵矶 3 个水尺, 枯水位最大、最小差值超过了 3.2 m。

2) 通过对 34 个水尺的皮尔逊相关系数分析, 发现大多数水尺间存在显著的水位相关性, 其中 23 组系数超过 0.99, 显示出强烈的水文连通性。特别是白洋和枝城之间的相关性高达 0.999, 而陈二口和毛家花屋之间的相关性最低, 为 0.936。此外, 通过空间相关性热力图分析, 进一步证实了宜昌—陈二口和陈二口—城陵矶河段内水尺间的强相关性, 这与结论 1) 中水位变化的观察结果相一致, 表明水位变化与水尺间的相关性密切相关。水位的连通性分析有助于理解不同水域之间的水文联系, 对于实现防洪、供水、发电、生态、航运等多目标综合调度具有重要意义。

3) 通过对当前时刻和历史时刻水位的自相关分析, 发现各水尺在时间步长为 20 的历史时间窗口水位即 7d 内的历史水位数据与当前水位的相关性较为显著, 自相关系数达到 0.6, 水尺之间的相

关性可以作为水位预测的特征因素之一, 提高水位预测的准确性, 保障航道安全与通航效率, 方便航道维护。

参考文献:

- [1] 周金辉, 李伟林, 周兴. 长江干线宜昌—黄石段航道水位变化分析研究[J]. 中国水运·航道科技, 2019(30): 13-17.
ZHOU J H, LI W L, ZHOU X. Analysis and study on the change of water level in section from Yichang to Huangshi of the Yangtze River trunk line [J]. China water transport (science & technology for waterway), 2019(30): 13-17.
- [2] 温泉, 余珍. 长江中游水位短期预测预报研究[J]. 中国水运·航道科技, 2017(2): 46-52.
WEN Q, YU Z. Study on short-term prediction of water level in the middle reaches of the Yangtze River[J]. China water transport (science & technology for waterway), 2017(2): 46-52.
- [3] 许全喜, 董炳江, 张为. 2020 年长江中下游干流河道冲淤变化特点及分析[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 1-8.
XU Q X, DONG B J, ZHANG W. Characteristics and analysis on scouring and silting changes in main stream of middle and lower reaches of Changjiang River in 2020[J]. Yangtze River, 2021, 52(12): 1-8.
- [4] 韩剑桥, 孙昭华, 李义天, 等. 三峡水库蓄水后宜昌至城陵矶河段枯水位变化及成因[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(6): 685-690, 695.
HAN J Q, SUN Z H, LI Y T, et al. Changes and causes of lower water level in Yichang-Chenglingji reach after impounding of Three Gorges Reservoir [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2011, 44(6): 685-690, 695.
- [5] 秦智伟, 陈玺. 三峡水库蓄水后坝下游干流枯水期水位变化研究[J]. 人民长江, 2018, 49(23): 10-15.
QIN Z W, CHEN X. Study on downstream water level change of Three Gorges Reservoir impounding in dry season[J]. Yangtze river, 2018, 49(23): 10-15.
- [6] 唐国民, 袁晓玲, 张磊. 三峡蓄水后宜昌水位流量关系变化分析[J]. 中国水运·航道科技, 2016(6): 20-23.
TANG G M, YUAN X L, ZHANG L. Analysis on the relationship between water level and discharge in Yichang after impoundment of the Three Gorges Project[J]. China water transport (science & technology for waterway), 2016(6): 20-23.

- [7] 韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征 [J]. 湖泊科学, 2017, 29 (5): 1217-1226.
HAN J Q, SUN Z H, YANG Y P. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) [J]. Journal of lake sciences, 2017, 29(5): 1217-1226.
- [8] 温国楠. 兴隆水利枢纽运行后汉江下游枯水位变化及长江顶托关系调整 [J]. 水运工程, 2024(7): 117-123.
WEN G N. Changes in low water level of lower reaches of Han River and adjustments of the Yangtze River water level uplift relationship after operation of Xinglong hydraulic complex [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 117-123.
- [9] 章广越, 谈广鸣, 张为, 等. 三峡水库运行后汉口—九江河段水位变化特征及成因 [J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 85-97.
ZHANG G Y, TAN G M, ZHANG W, et al. Characteristics and causes of the water level variations following the operation of the Three Gorges Dam with special reference to the Hankou: Jiujiang reach of the Middle Yangtze River [J]. Advances in water science, 2024, 35(1): 85-97.
- [10] 杨云平, 张明进, 孙昭华, 等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究 [J]. 地理学报, 2017, 72(5): 776-789.
YANG Y P, ZHANG M J, SUN Z H, et al. The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD) [J]. Actageographica sinica, 2017, 72(5): 776-789.
- [11] 雷雪婷, 王辉, 陈柯兵, 等. 长江干线中下游航道枯水位变异特性研究 [J]. 水运工程, 2024(6): 148-153.
LEI X T, WANG H, CHEN K B, et al. Variation characteristics of low water level in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 148-153.
- [12] 王华琳, 郑珊, 谈广鸣, 等. 三峡水库运行后宜昌—城陵矶河段冲刷重心下移与时空演变 [J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1470-1481.
WANG H L, ZHENG S, TAN G M, et al. Spatio-temporal channel evolution and the migration of erosion center in Yichang-Chenglingji Reach after the operation of the Three Gorges Project [J]. Journal of hydraulic engineering, 2021, 52(12): 1470-1481.
- [13] 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析 [J]. 水利学报, 2022, 53(6): 644-654.
SHU L C, XU LL, YUAN Y J, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain [J]. Journal of hydraulic engineering, 2022, 53(6): 644-654.
- [14] 郭艺, 郭兰洲, 刘丽. 邢台市地下水动态变化特征及对降水的响应 [J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(1): 58-63.
GUO Y, GUO L Z, LIU L. Dynamic characteristics of groundwater in Xingtai City and its response to precipitation [J]. Journal of Hebei GEO University, 2021, 44(1): 58-63.
- [15] 徐维超. 相关系数研究综述 [J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(3): 12-17.
XU W C. A review on correlation coefficients [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29 (3): 12-17.
- [16] JANACEK G. Time series analysis forecasting and control [J]. Journal of time series analysis, 2010, 31(4): 229-303.
- [17] 周日顺. 长江中游坡陡流急河段枯水位变化及航运流量调度方案研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
ZHOU R S. Study on the variation of low water levels and shipping flow scheduling scheme in steep slope and rapid reach of the middle reaches of Yangtze River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [18] 官学文, 曾明. 2022 年长江流域枯水特征分析与启示 [J]. 人民长江, 2022, 53(12): 1-5, 36.
GUAN X W, ZENG M. Characteristics and enlightenment of low water in Yangtze River Basin in 2022 [J]. Yangtze river, 2022, 53(12): 1-5, 36.
- [19] 岳鹏宇, 张虎. 联调联控, 同向发力, 长江流域水工程统一联合调度成效显著 [EB/OL]. (2024-12-18) [2024-12-20]. http://www.cjw.gov.cn/xwzx/cjyw/202412/t20241218_54130.shtml.
YUE P Y, ZHANG H. Joint regulation and control, unified joint dispatching of water projects in the Yangtze River basin achieves significant results [EB/OL]. (2024-12-18) [2024-12-20]. http://www.cjw.gov.cn/xwzx/cjyw/202412/t20241218_54130.shtml.