

doi:10.11988/ckyyb.20250711

2026,43(9):55-61

某特大型梯级水电站运行调度与坝下水位响应机制

罗 刚¹,肖 潇²,吴 迪¹,陈志伟¹,卢 俊¹

(1.中国长江三峡集团有限公司,湖北 宜昌 443100; 2.长江水利委员会水文局,武汉 430010)

摘 要:某特大型水电站是大型河流下游梯级开发的核心枢纽,研究其运行调度与坝下水位响应机制,对保障下游航运安全与生态保护具有重要意义。基于 2023 年坝下断面逐小时流量与水位观测数据,采用 Morlet 小波分析等统计分析方法,系统揭示了电站泄流与坝下水位变幅的时空响应机制。研究表明:①坝下主控断面水位变幅呈现显著时空分异特征,主汛期(7—8 月份)受防洪调度与日调节双重驱动,水位日变幅峰值达 10.94 m,时变幅峰值达 3.92 m,较下游参照断面(常年回水区)高 6~19 倍;②流量日变幅与水位日变幅呈显著线性正相关($R^2=0.8339$),流量年增加 1 000 m³/s 对应水位平均上涨约 2 m;③流量时变幅每 800 m³/s 波动可引发 1 m 瞬时水位波动。研究提出通过控制流量变幅 ≤ 800 m³/h 可将水位波动限制在 $[-1,1]$ m 阈值内,为梯级水电站协同调度与下游综合风险评估提供基础支撑。

关键词:运行调度;坝下水位;响应机制;特大型梯级水电站

中图分类号:TV697

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)09-0055-07

Discharge Regulation and Water Level Response Mechanism of A Super Large Cascade Hydropower Station

LUO Gang¹,XIAO Xiao²,WU Di¹,CHEN Zhi-wei¹,LU Jun¹

(1.China Three Gorges Corporation,Yichang 443100,China; 2.Bureau of Hydrology,Changjiang Water Resources Commission,Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] Research on the discharge regulation and downstream water-level response mechanism of a super-large hydropower station is of great significance for ensuring downstream navigation safety and ecological protection. This study aims to reveal the hydrological variation mechanism in the reservoir tail reach under ultra-high dam operation and to provide a theoretical basis for coordinated cascade reservoir operation and navigation safety assurance. [Methods] Based on hourly discharge and water level observation data at the downstream section below the dam in 2023, the standardized hourly discharge series was analyzed using Morlet continuous wavelet transform. The main periodic components of the time series were identified using wavelet variance analysis, and the regulation cycle characteristics were extracted and the discharge-water level response relationship was quantified to systematically reveal the spatiotemporal response mechanism between discharge variation and downstream water level variation. [Results] (1) The discharge of the hydropower station under study exhibited two dominant periods of 38 h and 19 h, corresponding respectively to a diurnal regulation cycle and a semidiurnal peak-valley rhythm, and the operational intensity increased significantly during the flood season and storage period. (2) The water level variation at the downstream main control section showed significant spatiotemporal heterogeneity. During the main flood season (July-August), jointly driven by flood control operation and diurnal regulation, the peak daily water level variation reached 10.94 m, and the instantaneous variation reached 3.92 m, which was 6-19 times higher than that at the downstream reference section (permanently backwater-influenced reach). (3) A significant positive correlation was observed between discharge variation and water level variation ($R^2=0.83$). An increase of 1 000 m³/s in dis-

收稿日期:2025-07-31;修回日期:2025-09-30;接受日期:2025-10-08

基金项目:中国长江三峡集团有限公司技术服务项目(0711626);国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040218)

作者简介:罗 刚(1991-),男,四川普格人,工程师,主要从事水库运行调度方面的研究。E-mail:luo_gang2@ctg.com.cn

通信作者:肖 潇(1986-),女,湖南常德人,高级工程师,博士,研究方向为水文、泥沙、河床演变分析等。E-mail:282663754@qq.com

charge corresponded to an average water level rise of about 2 m. A discharge fluctuation of $800 \text{ m}^3/\text{s}$ could induce an instantaneous water level variation of $[-1, 1] \text{ m}$. (4) A rapid attenuation of water level variation along the river was observed. In the near-dam reservoir tail reach, water level response was dominated by unsteady discharge from the studied hydropower station, whereas in the downstream reach, it was controlled by backwater effects from the downstream reservoir, showing a 6-19-fold spatial difference. [Conclusion] Water level variation can be limited to within 1 m by controlling discharge fluctuation to $\leq 800 \text{ m}^3/\text{h}$, providing theoretical basis for coordinated cascade hydropower operation and downstream comprehensive risk assessment.

Key words: discharge regulation; downstream water level; response mechanism; super-large cascade hydropower station

0 引言

随着我国水电能源开发的快速推进,大型水电站的运行调度对下游河道水文情势的影响日益显著^[1-2]。白鹤滩水电站作为金沙江下游梯级开发的重要枢纽,其运行调度不仅关系到发电效益的发挥,还对下游航运、生态及防洪安全产生深远影响^[3-4]。水电站下泄流量的非恒定变化会引发坝下水位的剧烈波动,进而影响通航河段的航道稳定性和安全^[5]。张士君等^[6]针对向家坝水电站的研究表明,考虑下游水位小时变幅限制后,下泄流量的变化量显著减少,而支流来水的叠加效应进一步抑制了水位波动。这一发现凸显了水电站调度与下游水位响应之间复杂的相互作用机制。毕明亮等^[7]针对白鹤滩蓄水期间向家坝水电站的控泄策略开展研究,提出通过日调节出库流量方案(白天 $1700 \text{ m}^3/\text{s}$,夜间 $1520 \text{ m}^3/\text{s}$)可将水位变幅控制在 0.31 m 以内,显著降低对下游航运的影响。这一成果表明水库可通过调节泄量控制坝下河段水位变幅,但白鹤滩水库成库时间不长,其坝下河段水位变化的影响因素仍需深入探讨。因此,深入研究白鹤滩坝下河段水位变化对电站运行调度的响应机制,对于优化调度策略、保障下游生态、航运等具有重要意义。

水位-流量关系是分析坝下水位响应机制的核心问题,但现有研究多针对单一影响因素展开,难以全面反映实际河流中多因素耦合作用的复杂性。丁佩等^[8]指出,传统水位-流量关系推求方法通常仅考虑洪水涨落或回水变动的单一影响,而忽略两者的综合效应,导致流量推算精度不足。为此,他们提出的综合校正法通过耦合 2 种因素,显著提高了寸滩、万县等水文站的流量整编精度。类似地,孙昭华等^[9]基于长江中游回水影响河段的研究,提出了一种多值型水位-流量关系确定方法,能够有效区分

河床调整与回水作用的贡献。冯竹玲等^[10]基于老挝南欧江二级水电站的实例分析进一步揭示,电站发电调度对下游水位-流量关系具有决定性影响,传统方法因未考虑调度引起的非恒定流效应,导致流量推算存在显著偏差。这些成果表明,水电站下游水位响应机制的研究需综合考虑非恒定流、回水效应及河床演变等多重因素。然而,目前针对大型特高坝工程的相关研究仍较为匮乏,尤其是电站运行调度对坝下水位响应的影响机制尚不明确。

此外,梯级水库群联合调度进一步增加了下游水位响应机制的复杂性。杜泽东等^[11]通过溪洛渡水电站的物理模型试验发现,坝下游河道的水位变化率与下泄流量变化率呈显著正相关,且向家坝水电站的回水顶托作用会抑制溪洛渡坝下水位波动的幅度。李文杰等^[12]对长江上游朱沱和寸滩水文站的分析也表明,三峡水库的回水影响临界条件与坝前水位密切相关,且长期河床调整导致水位呈下降趋势。这些成果为研究梯级水库运行对下游水位的累积效应提供了重要参考。

针对电站调度与坝下水位响应机制的问题,本文基于某特大型梯级水电站坝下长时间序列的高频(1 h 间隔)流量、水位观测数据,采用 Morlet 小波分析识别调度周期特征,量化泄流-水位动态响应关系,以揭示特高坝运行下库尾河段的水文变异机制,为梯级电站协同调度与航运安全保障提供理论依据。

1 研究区域与数据方法

1.1 研究区域

某特大型水电站为某大型河流梯级开发体系的关键枢纽之一,位于梯级中段位置。该电站任务以发电为主,兼顾防洪、改善航运条件及发展地方经济。下游关联电站为同一梯级开发体系的重要组成部分,与研究对象存在显著水力联系。该水电承担发电、防洪、航运等综合功能。根据该电站设计运行

规程,主汛期(7—8月份)需将水位降至防洪限制水位运行,8月初启动蓄水确保防洪安全的前提下,于9—10月份汛末将库水位抬升至正常蓄水位,为枯水期发电储备水量。

根据《内河通航标准》(GB50139—2014)及该河段航道管理部门要求,研究河段为Ⅲ级航道,通航保证率95%对应的设计最低通航水位变幅限值为:时变幅 ≤ 1.0 m,日变幅 ≤ 3.0 m。

在研究对象坝址下游河道布设2处监测断面:①坝下主控断面(距坝址 <10 km),处于该电站的库尾变动回水区;②下游参照断面(距坝址约50 km),正处于下游水电站库区的回水影响范围内(图1)。



图1 研究区域示意图

Fig.1 Sketch of study area

1.2 数据与方法

本研究采用2023年全水文年高频观测数据集,包括研究电站逐小时下泄流量数据,以及坝下主控断面和下游参照断面的同步逐小时水位观测数据。采用统计方法分析下泄流量的年内分配、日调节过程及变幅特征。选用Morlet小波分析^[13-14]对标准化后的逐小时泄流序列进行连续小波变换,通过小波方差图确定序列的主要周期,并分析各主周期分量在不同时期的能量变化特征,以揭示调度的周期性规律。

2 水电站调度特征分析

2.1 水电站调度年内分配及日调节特征

2023年研究水电站蓄水调度呈现显著时空分异特征。研究水电站主汛期中期(8月初)启动蓄水,历时约60余天,水位累计升幅超40 m,蓄水量达大型水库量级;蓄水期平均入库流量约 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 量级,出库流量约 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 量级,削峰率18%。

2023年水电站下泄流量呈典型“双峰双谷”型年际过程,如图2所示。1—3月份枯水期维持 $1\,000\sim 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的相对稳定下泄流量,流量波动主要受日调节影响;4—6月份进入汛前后流量在 $1\,000\sim 3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 波动;7—8月份主汛期响应防洪需求,下泄流量

持续抬升至 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 峰值;9—10月份进入蓄水期后减少至 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$;11月份通过生态调度恢复至 $2\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,12月份受电网负荷驱动,流量在 $2\,500\sim 7\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 范围内波动。

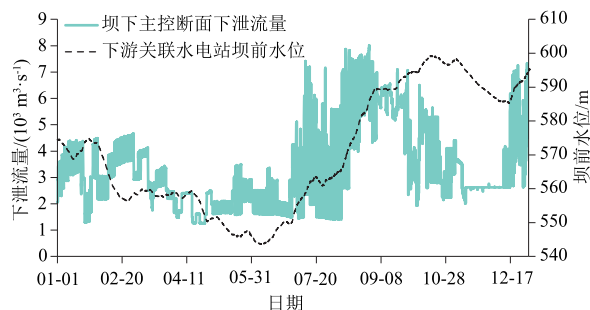


图2 2023年坝下主控断面下泄流量与下游关联水电站坝前水位过程

Fig.2 Discharge process at main control section downstream of dam and water level process at downstream related power station in 2023

水电站月均日调度呈现典型“一谷两峰”电力负荷响应特征,如图3(a)所示。凌晨3:00—6:00处于低谷期调控,下泄流量降至 $2\,200\sim 2\,800\text{ m}^3/\text{s}$,对应电网基础负荷需求低谷时段;7:00—11:00早峰形成,流量以 $400\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{h})$ 速率线性攀升至峰值区间 $2\,800\sim 3\,800\text{ m}^3/\text{s}$,匹配工业晨间生产启动与城市用电需求激增;11:00—13:00处于午间调节,出现流量小幅回落(降幅约15%),反映电网午间负荷暂态平衡;13:00—16:00处于晚峰增强阶段,二次爬坡后,于16:00—20:00形成晚峰 $3\,000\sim 4\,000\text{ m}^3/\text{s}$,满足商业用电高峰与居民生活用电叠加需求,最大峰谷差达 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 。值得注意的是,蓄水期(9—10月份)日均流量变幅较平水期扩大37%,表明库容约束会强化调峰强度。

采用Morlet小波方差检验揭示流量序列的波动能量谱特征,如图3(b)—图3(d)所示。第一主周期38 h,第二主周期19 h。第一主周期:平均周期为24 h,与水库日调度计划匹配,4月份周期震荡弱,反映消落期水库以降水位运行为主,释放库容为汛期腾空;7月份周期表现强震荡,反映汛期的日调度强度提升。第二主周期:平均周期为12 h,对应日内双峰调节的半日节律,4月份能量相位混乱,7月份相位同步性显著。

2.2 坝下主控断面流量变幅

2023年坝下主控断面流量变幅呈现显著时空分异特征,如表1所示。月最大时涨幅波动范围为 $560\sim 2\,750\text{ m}^3/\text{s}$,年内极值差异达4.9倍。其中最小值出现在4月份,该时期处于汛前消落期,时调度变化小;最大值出现在12月份,反映冬季供电高峰期

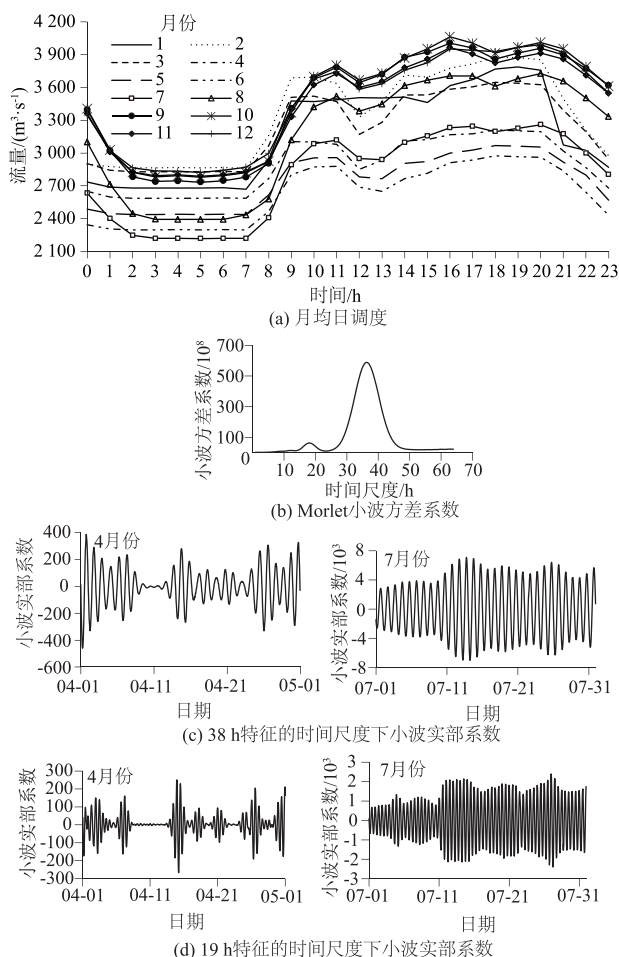


图3 2023年研究电站调度特征分析

Fig.3 Analysis of dispatching characteristics of hydropower station in 2023

表1 2023年坝下主控断面流量变幅统计

Table 1 Discharge variation of main control section downstream of dam in 2023

流量变幅/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			
月份	月均日变幅	月最大日变幅	月最大时涨幅
1	1 285	1 810	950
2	988	1 670	630
3	551	1 360	650
4	214	900	560
5	768	1 900	760
6	950	1 770	770
7	3 611	5 700	1 800
8	3 536	5 590	1 730
9	1 095	3 060	1 770
10	1 689	4 140	2 390
11	272	1 880	1 210
12	1 906	4 360	2 750

调度强度骤增。从时间分布来看,1—6月份时涨幅持续低位运行,月最大时涨幅均 $<1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,7—12月份调节强度显著提升,各月最大时涨幅超过 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,其中10月份与12月份超过 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$,反映汛后冬季供电期的剧烈调节作用。

2023年坝下主控断面流量月均日变幅214~

$3\,611\text{ m}^3/\text{s}$,最小值出现在4月份,最大出现在7月份,2—6月份及11月份日变幅 $<1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,1月份、9—10月份及12月份的日变幅在 $1\,000\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$,7—8月份主汛期日变幅 $>3\,000\text{ m}^3/\text{s}$;坝下主控断面流量月最大日变幅 $900\sim 5\,700\text{ m}^3/\text{s}$,最小值仍出现在4月份,最大值出现在7月份,较月均日变幅提高58%,表明该月受汛期防洪及夏季用电需求影响。

总而言之,主汛期7—8月份,坝下主控断面流量变幅受防洪调度及日调节双重驱动,月均日变幅强度与最大日变幅同步达到全年峰值;汛后9—12月份,时涨幅与日变幅维持高位,12月份时涨幅最大,反映了电站日调节的精细化调度;消落期1—6月份,为控制水库水位,电站出流均控制在较低区间。

3 水电站调度与坝下游水位响应机制

3.1 坝下水位变幅特征

2023年坝下主控断面与下游参照断面水位变幅统计结果如表2所示。分析表2可知,坝下主控断面全年水位月最大时涨幅波动在 $0.66\sim 3.92\text{ m}$ 之间,极值差异达6倍,表现出强烈的非恒定流响应特征。其中最低值出现在11月份,最高值出现在7月份,与坝下主控断面的流量涨幅有较大差异。1—6、9—10月份坝下主控断面保持 $1\sim 2\text{ m}$ 相对稳定区间,7—8、12月份突破 2 m ,仅11月份回落至 1 m 以下。与之对比,下游参照断面水位月最大时涨幅波动平缓为 $0.10\sim 0.29\text{ m}$ 。其中最低值出现在2月份,最高值出现在12月份。数据显示,坝下主控断面月最大时涨幅为下游参照断面的13.5倍,两断面空间分异显著。

表2 2023年坝下主控断面和下游参照断面水位变幅

Table 2 Water level variation at main control section downstream of dam and downstream reference section in 2023

月份	坝下主控断面水位/m			下游参照断面水位/m		
	月均日变幅	月最大日变幅	月最大时涨幅	月均日变幅	月最大日变幅	月最大时涨幅
1	2.39	3.30	1.83	0.51	1.28	0.15
2	1.94	3.41	1.39	0.69	1.13	0.10
3	1.12	2.70	1.24	0.35	0.67	0.15
4	0.53	2.13	1.40	0.54	1.23	0.12
5	1.82	4.31	1.77	0.45	0.79	0.22
6	2.27	4.06	1.76	0.37	0.85	0.11
7	7.21	10.94	3.92	0.67	1.75	0.20
8	6.32	10.32	3.84	0.84	0.52	0.27
9	1.23	3.68	1.80	0.33	1.12	0.17
10	1.59	2.59	1.03	0.41	0.96	0.20
11	0.54	1.38	0.66	0.40	0.64	0.11
12	2.35	5.29	2.03	0.55	1.25	0.29

2023年坝下主控断面月均日变幅呈现极端波动特征:月均日变幅 $0.53\sim 7.21\text{ m}$,最小值出现在4月

份,最大出现在7月份,1—6、9—12月份日变幅在3 m以下,7—8月份主汛期日变幅超过6 m;坝下主控断面水位月最大日变幅1.38~10.94 m,最小值出现在11月份,最大值出现在7月份。相比之下,下游参照断面的日变幅始终维持在较低水平,月均日变幅不超过0.84 m,月最大日变幅不超过1.75 m。坝下主控断面的月均日变幅和最大日变幅是下游参照断面8.6和6.3倍。值得注意的是,坝下主控断面主汛期(7—8月份)日变幅显著放大,7月份月均日变幅达4月份的13.6倍,显示主汛期强径流效应。

坝下主控断面作为库尾河段,水力坡降大受研究电站调控,其水位动态主要受研究电站高频泄流的非恒定流波直接驱动,因此响应迅速且剧烈。7—8月份时涨幅与日变幅同步达到年度峰值,其3.92 m的时涨幅相当于下游参照断面的19.6倍。下游参照断面作为库区常年回水河段,主要受下游电站库区水位的顶托与控制,研究水电站下泄的非恒定流波在此传播过程中已被大幅衰减和平滑,全年时涨幅始终低于0.3 m,最大日变幅不足坝下主控断面同期的1/6。结合图4,可以直观看出,坝下主控断面水位时变幅曲线呈脉冲式剧烈震荡,而下游参照断面则呈现平滑缓变的特征,这进一步印证了库尾河段与受控库区完全不同的水文响应模式,空间分异系数达6~19倍。

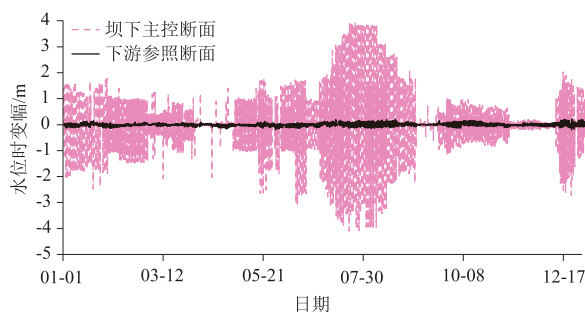


图4 2023年坝下主控断面和下游参照断面水位时变幅

Fig.4 Hourly water level variation at downstream main control and reference sections in 2023

3.2 水电站泄流与坝下水位变幅响应关系

为识别影响坝下水位变幅的主导因素,本研究首先通过断面对比分析排除次要因素。下游参照断面(距坝50 km)受下游电站回水顶托控制,其水位变幅微弱(<0.3 m)且与研究水电站泄流无显著相关,这排除了下游回水作为坝下主控断面水位波动主要驱动力的可能性。同时,研究河段无重大支流汇入,河床边界条件相对稳定。因此,在短时间尺度(日、时)上,研究电站的泄流变化是驱动坝下近区(库尾河段)水位变幅的最主要和直接的因素。

2023年电站泄流过程中,坝下主控断面流量变幅变化与主控断面、下游参照断面水位之间的响应关系如图5所示。分析表明,主控断面流量的日变幅与主控断面水位日变幅呈显著线性正相关($R^2 = 0.8339$),当日流量每增加1 000 m^3/s 时,主控断面水位平均抬升2 m。在小时尺度上,下泄流量时变幅与主控断面水位时变幅呈现良好的正相关关系($R^2 = 0.772$),每800 m^3/s 的流量波动可产生约1 m的瞬时水位波动。该响应关系的建立为电站优化泄洪调度提供了重要依据。通过控制流量变幅 $\leq 800 \text{ m}^3/\text{h}$,可有效将水位波动幅度限制在 $[-1, 1] \text{ m}$ 范围内,有利于下游航运安全和生态保护。相比之下,电站下泄流量与下游参照断面水位之间未见明显相关关系。该断面水位日变幅 $\leq 1.75 \text{ m}$,时变幅水位 $\leq 0.21 \text{ m}$,受下泄流量波动的影响较小。

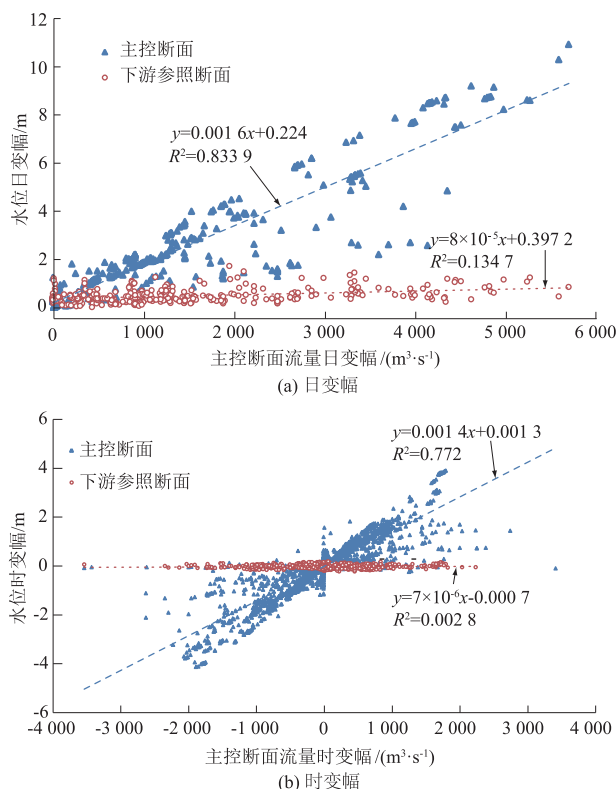


图5 2023年坝下主控断面流量变幅与主控断面、下游参照断面水位变幅响应关系

Fig.5 Relationship between discharge variation and water level response at downstream main control and reference sections in 2023

2023年坝下主控断面流量和水位时变幅统计结果,如图6所示。流量时变幅呈现明显非对称分布特征。具体而言,流量正向波动(涨幅)主要集中于 $[0, 1000] \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内(累计占比67%),负向波动(降幅)在相同量级内的占比为29%,剧烈波动($\geq \pm 1000 \text{ m}^3/\text{s}$)仅占4%。对应水位时变幅则表现

出更集中的分布规律:在小时尺度上,约 52%的时段水位涨幅 ≤ 1 m,39%的时段水位降幅 ≤ 1 m,仅 9%的时段出现超过 1 m 的显著波动。下游参照断面水位时变幅均在 0.21 m 范围内,且 93%的时段变幅主要集中在 $[-0.1, 0.1]$ m 范围内,下游约 50 km 处的参照断面,其水位动态由下游电站的库区回水效应主导,研究电站的短期泄流变化对其影响甚微。

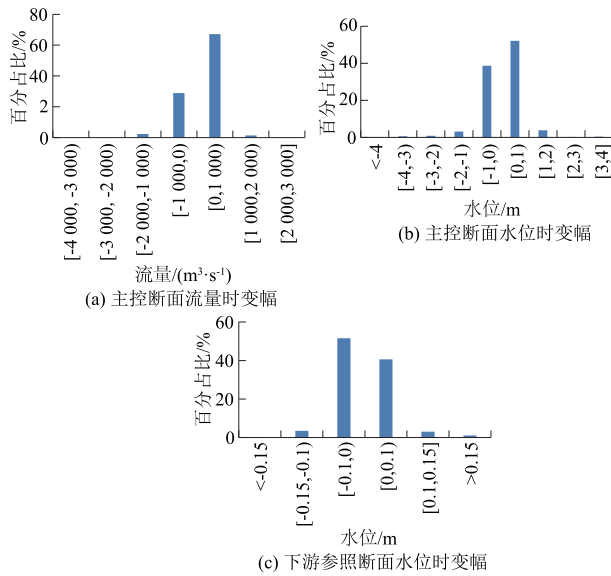


图6 2023年坝下主控断面和参照断面的流量变幅与水位变幅统计结果

Fig.6 Statistical results of variations in discharge and water level at downstream main control and reference sections in 2023

电站泄流变化通过非恒定流波传播驱动坝下近区水位急剧波动,而下游回水顶托效应则抑制波动传播,形成“近区剧变-远区平稳”的空间分异格局。

4 结 论

(1)通过小波分析,识别出研究电站泄流存在 38 h 与 19 h 两个主控周期,分别对应日调节循环与半日峰谷节律,且调度强度在汛期和蓄水期显著增强。

(2)研究明确了坝下库尾河段是水位波动的核心影响区,其最大日变幅超 10 m,时变幅近 4 m。量化日变幅流量每增加 1 000 m³/s 对应水位抬升 2 m;时变幅流量每增加 800 m³/s 波动引发 1 m 水位变幅。

(3)研究揭示了水位波动沿程急剧衰减的现象,并明确了其主导机制:坝下近区(库尾)的水位响应由本研究水电站的泄流非恒定流主导,而下游参照断面的平稳水位则由下游电站的库区回水顶托效应控制。两者水文响应模式迥异,空间分异系数达 6~19 倍。

参考文献(References):

- [1] 戴明龙,祁俊丽,仇红亚,等.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(宜昌一大通段)为例[J].湖泊科学,2025,37(2):640-650.(Dai Minglong, Qi Junli, Qiu Hongya, et al. 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) [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(2): 640-650. (in Chinese))
- [2] 尚文绣,彭少明,王煜,等.面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究[J].水利学报,2020,51(3):367-377.(Shang Wenxiu, Peng Shaoming, Wang Yu, et al. Research on the ecological integrity-oriented environmental flow regime of the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 367-377. (in Chinese))
- [3] 胡光洋,杨中华,白凤朋,等.金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析[J].湖泊科学,2025(1):293-303.(Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Bai Fengpeng, et al. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [J]. Journal of Lake Sciences, 2025(1): 293-303. (in Chinese))
- [4] 吕瑞茹,邓安军,张帮稳,等.白鹤滩水库场次洪水特征分析[J].泥沙研究,2024,49(6):22-29.(Lyu Ruiyu, Deng Anjun, Zhang Bangwen, et al. Analysis of flood characteristics in the baihetan reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2024, 49(6): 22-29. (in Chinese))
- [5] 马海涛,王新,张首元.溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流传播规律研究[J].水运工程,2024(11):146-152.(Ma Haitao, Wang Xin, Zhang Shouyuan. Propagation law of unsteady flow in downstream channel of Xiluodu Hydropower Station [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(11): 146-152. (in Chinese))
- [6] 张士君,王渺林.考虑下游水位小时变幅限制的向家坝电站下泄流量变化分析[J].水电与新能源,2025,39(2):20-23.(Zhang Shijun, Wang Miaolin. Analysis of the discharge flow variation in Xiangjiaba Hydropower Station considering the hourly variation limits of downstream water level [J]. Hydropower and New Energy, 2025, 39(2): 20-23. (in Chinese))
- [7] 毕明亮,潘增,邢龙,等.白鹤滩蓄水期向家坝控泄对下游航道影响分析[J].水运工程,2022(4):81-87.(Bi Mingliang, Pan Zeng, Xing Long, et al. Influence of Xiangjiaba discharge control on downstream channel during impoundment period of Baihetan [J]. Port & Waterway Engineering, 2022(4): 81-87. (in Chinese))
- [8] 丁佩,罗小峰,刘星璐,等.受回水变动与洪水涨落综合影响的水位流量关系研究[J].水文,2022,42(6):7-12.(Ding Pei, Luo Xiaofeng, Liu Xinglu, et al. Study on stage discharge relationship affected by the comprehensive

- influence of backwater and flood[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(6): 7–12. (in Chinese))
- [9] 孙昭华, 周歆玥, 范杰玮, 等. 考虑回水影响的河道水位流量关系确定方法[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 259–270. (Sun Zhaohua, Zhou Xinyue, Fan Jiewei, *et al.* Stage-discharge rating method considering backwater effect in river channel[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 259–270. (in Chinese))
- [10] 冯竹玲, 邓瑶. 电站发电调度对下游水位流量关系的影响分析[J]. *科技创新与应用*, 2016, 6(26): 16–17. (Feng Zhuling, Deng Yao. Analysis of the influence of power generation dispatching on the relationship between downstream water level and flow[J]. *Technology Innovation A*, 2016, 6(26): 16–17. (in Chinese))
- [11] 杜泽东, 董先勇, 秦蕾蕾, 等. 溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流特性研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(1): 200–205. (Du Zedong, Dong Xianyong, Qin Leilei, *et al.* Study on unsteady flow characteristics in downstream channel of Xiluodu Hydropower Station[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(1): 200–205. (in Chinese))
- [12] 李文杰, 余成凤, 肖毅, 等. 基于时间序列的朱沱和寸滩水位变化特征分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(6): 1377–1388. (Li Wenjie, Yu Chengfeng, Xiao Yi, *et al.* Characteristics of water level variation at Zhutuo and Cuntan Stations based on time series analysis[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(6): 1377–1388. (in Chinese))
- [13] 张灵, 吴恩捷, 潘浩桦, 等. 1960—2020年珠江流域跨季节尺度干旱时空变化[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(13): 77–84. (Zhang Ling, Wu Enjie, Pan Haohua, *et al.* Spatiotemporal variations of cross-seasonal drought in the Pearl River Basin of China from 1960 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(13): 77–84. (in Chinese))
- [14] 谢萍, 张双喜, 汪海洪, 等. 利用交叉小波技术分析三峡水库蓄排水过程对库区降雨量的影响[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(6): 821–829, 907. (Xie Ping, Zhang Shuangxi, Wang Haihong, *et al.* Cross wavelet analysis on the influence of the Three Gorges Dam impounding on the reservoir precipitation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(6): 821–829, 907. (in Chinese))

(编辑:黄玲)

(上接第36页)

- [23] 尤龙凤. 基于水资源优化配置的太原市引黄供水工程规划研究[J]. *水利技术监督*, 2023(7): 55–58. (You Longfeng. Research on water diversion project planning of Taiyuan City based on optimal allocation of water resources[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2023(7): 55–58. (in Chinese))
- [24] 张富康, 冯民权. 基于熵权综合污染指数法的汾河中游水质分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(5): 109–114, 120. (Zhang Fukang, Feng Minquan. Analysis of spatial-temporal characteristics of water quality in Fenhe River by entropy weight comprehensive pollution index method[J]. *Yellow River*, 2022, 44(5): 109–114, 120. (in Chinese))
- [25] 吴伟伟, 王昊, 贾艳. 晋中地区2001—2020年水资源时空演化特征分析[J]. *水资源开发与管理*, 2023, 9(9): 12–21. (Wu Weiwei, Wang Hao, Jia Yan. Analysis of the spatio-temporal evolution characteristics of water resources in Jinzhong Region from 2001 to 2020[J]. *Water Resources Development and Management*, 2023, 9(9): 12–21. (in Chinese))
- [26] 李静文, 李振涵, 吴海滨, 等. 汾河流域水资源承载力评估及生态敏感性分析[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(2): 359–370. (Li Jingwen, Li Zhenhan, Wu Haibin, *et al.* Carrying capacity of water resources assessment and ecological sensitivity analysis in Fen River Basin[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(2): 359–370. (in Chinese))

(编辑:罗玉兰)

(上接第54页)

- [22] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital Elevation Models[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 309–319.
- [23] 刘学军, 卢华兴, 卞璐, 等. 基于DEM的河网提取算法的比较[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1134–1141. (Liu Xuejun, Lu Huaxing, Bian Lu, *et al.* Comparison of algorithms for extracting drainage network from grid-based digital elevation model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1134–1141. (in Chinese))
- [24] 康大宁, 孙霞, 卢明三, 等. 唐白河水系降水特性分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2010, 39(7): 22–23, 28. (Kang Daning, Sun Xia, Lu Mingsan, *et al.* Analysis of precipitation characteristics in the Tangbai River System[J]. *Water Resources & South to Northwater Diversion*, 2010, 39(7): 22–23, 28. (in Chinese))

(编辑:罗玉兰)