

王鹏翔, 殷兆凯, 张子平, 等. 基于水位低通滤波的入库流量反推方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 134-143. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.011

WANG Pengxiang, YIN Zhaokai, ZHANG Ziping, et al. Study on reverse deduction method of reservoir inflow based on water level low-pass filtering[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 134-143. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.011

# 基于水位低通滤波的入库流量反推方法研究

王鹏翔<sup>1</sup>, 殷兆凯<sup>1</sup>, 张子平<sup>2</sup>, 许红断<sup>2</sup>, 马安国<sup>2</sup>, 黄迪<sup>2</sup>, 翟然<sup>1</sup>, 梁犁丽<sup>1</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199;

2. 湖北清江水电开发有限责任公司, 湖北宜昌 443000)

**摘要:**【目的】准确的入库流量数据是水库调度运行及水文预报依赖的重要基础数据, 但经由水量平衡法直接推求的入库流量过程通常呈锯齿震荡且存在大量异常负值, 现有通用方法在平滑效果及适用性方面还有待进一步提升。【方法】从造成入库流量锯齿震荡的直接原因入手, 采用低通滤波方法, 除去掺杂在水位数据中影响水位库容计算的高频噪声, 减少其对入库流量推求的影响。【结果】结果显示: (1) 对于整个流量过程, 水位低通滤波方法计算所得入库流量数据中的负值占比仅为3.20%, 负值均值仅为 $-29.76 \text{ m}^3/\text{s}$ , 平滑改善度为0.77, 表现最佳, 滑动平均法次之, 五点三次法最差; (2) 对于不同量级典型洪水过程, 低通滤波方法在保证较好平滑改善度的前提下减少了平滑处理对洪峰和峰现时间的影响。【结论】结果表明: 基于水位低通滤波的入库流量反推方法计算原理简单, 在保证较好平滑改善度的前提下, 大大减少了入库流量过程中的异常负值, 同时对洪峰和峰现时间的影响较小, 可以有效提升入库流量反推结果的合理性。

**关键词:** 入库流量; 数据平滑; 低通滤波; 水库水位; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P33

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0134-10



听语音, 聊科研

## Study on reverse deduction method of reservoir inflow based on water level low-pass filtering

WANG Pengxiang<sup>1</sup>, YIN Zhaokai<sup>1</sup>, ZHANG Ziping<sup>2</sup>, XU Hongduan<sup>2</sup>, MA Anguo<sup>2</sup>,

HUANG Di<sup>2</sup>, ZHAI Ran<sup>1</sup>, LIANG Lili<sup>1</sup>

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China;

2. Hubei Qingjiang Hydroelectric Development Co., Ltd., Yichang 443000, Hubei, China)

**Abstract:** [Objective] Accurate reservoir inflow data is essential for effective reservoir operation scheduling and hydrological forecasting. However, the inflow process directly derived using the water balance method typically exhibits sawtooth oscillations and contains numerous anomalous negative values. Existing general method still require further improvement in both smoothing effectiveness and applicability. [Methods] Starting with the direct cause of sawtooth oscillations in the reservoir inflow, a low-pass filtering method was used to remove the high-frequency noise in the water level data that affected the calculation of reservoir

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-02-29; 录用日期: 2024-03-18; 网络出版日期: 2024-06-25

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2021-0485); 国家自然科学基金项目(42201050)

作者简介: 王鹏翔(1992—), 男, 工程师, 博士, 主要从事流域水文模拟与水文预报研究。E-mail: wang\_pengxiang1@ctg.com.cn

通信作者: 梁犁丽(1982—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文预报与水库调度研究。E-mail: liang\_lili@ctg.com.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

storage capacity, thereby minimizing its impact on the estimation of inflow. [Results] The result demonstrated that: (1) for the entire flow process, the low-pass filtering method for water level data showed the best performance, with only 3.20% of the calculated inflow data having negative values, an average negative value of  $-29.76 \text{ m}^3/\text{s}$ , and a smoothing improvement index of 0.77. The moving average method ranked second, and the five-point cubic method performed the worst. (2) For typical flood processes of different magnitudes, the low-pass filtering method reduced the impact of smoothing on the peak flow and the time of peak occurrence, while still achieving a good smoothing improvement. [Conclusion] The result indicate that the reverse deduction method of reservoir inflow based on water level low-pass filtering is characterized by its simplicity in computation and principle. While maintaining a good smoothing improvement, it significantly reduces the anomalous negative values in the inflow process. Additionally, it has a relatively small impact on the peak flow and the time of peak occurrence, which can effectively improve the rationality of the inflow deduction result.

**Keywords:** reservoir inflow; data smoothing; low-pass filtering; reservoir water level; influencing factors

## 0 引言

准确的入库流量数据是水库水文预报、防洪发电调度、经济评价等水库运行作业工作顺利开展的基础<sup>[1-3]</sup>, 但在水库实际运行过程中, 水库的入库流量一般难以通过仪器测量直接获取。目前入库流量的计算方法主要有流量叠加法、流量反演法、水量平衡法及相应关系法等<sup>[4-5]</sup>。其中水量平衡法由于其概念清晰、计算简便而被广泛采用。水量平衡法首先根据水库坝前水位及水位库容曲线计算库容变化, 再结合出库流量及其他损耗反推出入库流量<sup>[6]</sup>。但是这一算法反推求得的入库流量准确度受多重因素影响, 如水位库容曲线精度影响: 受测量精度及库区冲淤变化影响, 库容曲线存在误差<sup>[7]</sup>; 水库水位精度影响: 由于风浪、机组开停机、闸门启闭等造成水位监测数据存在波动; 此外, 还有动库容影响、出库流量(包括下泄流量、水库渗漏量、蒸散发量、其他取用水等)测量误差等<sup>[8-10]</sup>。这些影响因素共同作用使得反推所得入库流量叠加了各种噪声, 经由水量平衡法得到的水库入库流量过程曲线表现出明显的锯齿状震荡现象, 甚至出现负值<sup>[11-12]</sup>。

目前处理这个问题的主要手段是对最后计算得到的入库流量进行平滑处理, 常见的平滑处理方法有五点三次法, 滑动平均法<sup>[13-14]</sup>及其相应的改进方法<sup>[9-18]</sup>。其中滑动平均法应用最为广泛, 能一定程度消除入库流量锯齿状波动, 使之更平滑, 但存在一定程度的“削峰”现象, 会造成入库流量的过度“坦化”, 且平滑处理后的入库流量过程存在滞后现象<sup>[19]</sup>。虽然有各种改进方法, 如根据不同时期或流量大小分情况设置平滑窗口及权重大小<sup>[20]</sup>, 但是仍无法从根本上避免这些问题, 且窗口及权重的设置不具有通用性。五点三次法利用最小二乘法原理对离散

数据进行三次最小二乘多项式平滑处理<sup>[21]</sup>以达到平滑数据的目的, 但对于非平稳的数据, 特别是对于陡增陡降数据, 其平滑效果较差, 这也在一定程度上影响了其对密集锯齿状流量过程的平滑效果。且经这些方法平滑后的流量过程仍然存在大量较大负值, 对这些负值进行消负及水量平衡修正会再次影响这些方法对关键入库流量过程的刻画精度。另外需要注意的是这些方法大都是直接对最后推求所得的入库流量进行平滑处理, 在一定程度上会牺牲计算过程中部分实测真值(如出库流量)的有效性。

从造成入库流量锯齿波动的原因分析可以发现, 水位库容曲线精度、出库流量误差一般为系统误差, 动库容主要是在入库流量较大时影响显著<sup>[22-23]</sup>, 但入库流量明显的“锯齿”现象出现在整个时期。因此高频的水位波动误差才是造成入库流量锯齿震荡现象的主要原因。且对于库容较大的水库, 入库流量锯齿震荡及异常负值现象已不是水位监测仪器测量精度提升所能改善的, 轻微的风浪影响就会掩盖测量仪器精度提升对真实库水位监测的有效增益。因此本研究采用一种基于坝前水位低通滤波的入库流量反推方法, 先对水位数据进行滤波降噪, 再由滤波后的水位数据推求入库流量, 以实现在保证入库流量特征不变的前提下, 消除锯齿、平滑流量, 为同类水库入库流量反推计算提供借鉴。

## 1 研究区域及数据

### 1.1 研究区域

以位于清江流域的隔河岩水电站为研究对象, 隔河岩水电站位于湖北省清江干流的中下游, 是一座以发电为主, 兼有防洪、航运等综合效益的大型水利枢纽工程, 是清江流域开发的首期工程。电站总装机 1 212 MW, 设计多年平均发电量 30.4 亿 kWh。电

站坝址以上控制流域面积 14 430 km<sup>2</sup>。枢纽设计正常高蓄水位为 200.00 m, 死水位 160.00 m, 设计洪水位为 203.14 m, 校核洪水位为 204.54 m, 为年调节水库。电站距离下游长阳县城 9 km, 距离上游水布垭电站 92 km<sup>[24]</sup>, 流域概况如图 1 所示。

## 1.2 研究数据

隔河岩水电站多年平均流量 403 m<sup>3</sup>/s, 多年平均径流量 127 亿 m<sup>3</sup>。受上游水布垭电站及其自身运行影响, 电站坝前水位波动较大。经水量平衡法直接反推得入库流量锯齿尤为明显, 且存在大量较大负值。选取 2013 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日共 10 a 间, 以 1 h 为时间间隔测量得到的隔河岩水电站坝前水位数据、出库流量数据, 对入库流量进行反推计算。

## 2 研究方法

本研究选取典型的滑动平均法、五点三次法与水位低通滤波方法进行对比分析, 以衡量水位低通滤波方法的准确性及改进效果。

### 2.1 滑动平均法

滑动平均法计算公式为

$$qi_t = w_1 q_{t-x+1} + w_2 q_{t-x+2} + \dots + w_x q_t \quad (1)$$

式中,  $qi_t$  为  $t$  时段入库流量的修正值(m<sup>3</sup>/s);  $q_t$  为经由坝前水位数据通过水量平衡法直接推求所得的入库流量  $t$  时段入库流量(m<sup>3</sup>/s);  $x$  为滑动平均的窗口大小;  $[w_1 \dots w_x]$  组成滑动窗口的权重矩阵, 和为 1, 一般来说, 离  $t$  时段越近, 权重越大。

本研究中为了平衡滑动平均法造成的相位差及削峰作用, 窗口大小设置为 3, 权重矩阵设置为

[0.2, 0.3, 0.5]。

### 2.2 五点三次法

该方法要求入库流量  $Q$  的序列长度不小于 5, 各时段入库流量的修正公式为

$$qi_1 = \frac{1}{70}(69q_1 + 4q_2 - 6q_3 + 4q_4 - q_5) \quad (2)$$

$$qi_2 = \frac{1}{30}(2q_1 + 27q_2 + 12q_3 - 8q_4 + 2q_5) \quad (3)$$

$$qi_t = \frac{1}{35}(-3q_{t-2} + 12q_{t-1} + 17q_t + 12q_{t+1} - 3q_{t+2}), \quad 2 < t < (n-1) \quad (4)$$

$$qi_{n-1} = \frac{1}{35}(2q_{n-4} - 8q_{n-3} + 12q_{n-2} + 27q_{n-1} + 2q_n) \quad (5)$$

$$qi_n = \frac{1}{70}(-q_{n-4} + 4q_{n-3} - 6q_{n-2} + 4q_{n-1} + 69q_n) \quad (6)$$

式中,  $n$  为入库流量序列长度。

序列两端 4 个时段分别使用公式(2)、公式(3)、公式(5)、公式(6)进行修正, 其余时段均用公式(4)修正。

### 2.3 水位低通滤波法

低通滤波是一种信号处理技术, 可以将叠加了高频噪声的低频信号中的高频噪声滤除, 只保留低频部分(见图 2)。它通过滤波器将高频信号的幅度降低或完全消除, 从而实现滤除噪声、平滑信号或降低信号带宽的目的<sup>[25]</sup>。因此适用于消除风浪等因素造成的坝前水位的高频震荡, 从而平滑水位数据。



图 1 清江流域概况

Fig. 1 Overview of the Qingjiang River Basin

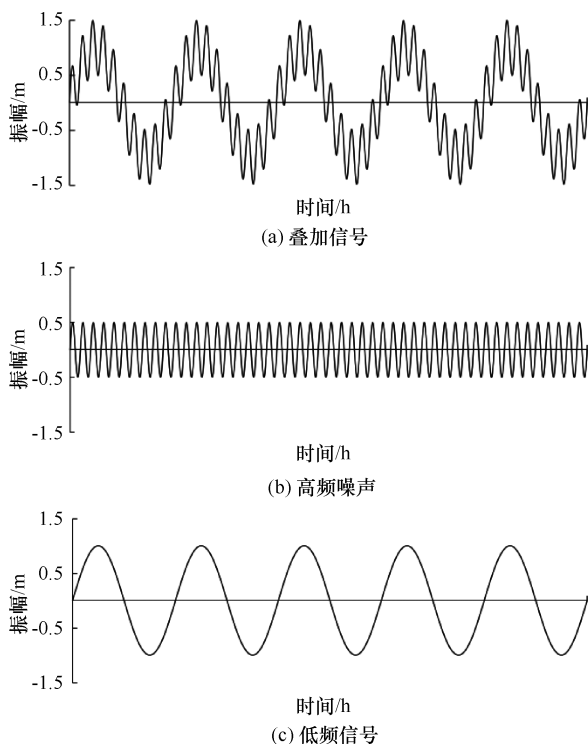


图2 低通滤波原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of low-pass filter principle

由于高频噪声与低频信号的相位不同, 在信号经过低通滤波器时, 会导致不同频率的信号相位发生变化, 从而引入相位差。因此, 在进行信号处理时, 对坝前水位数据进行正反两次低通滤波以消除滤波处理对水位信号造成的相位差<sup>[26]</sup>。

首先, 对坝前水位小时系列数据  $Y: \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 确定采样频率及截止频率后进行正向低通滤波

$$\vec{Y} = H(f_s, f_c, k) \quad (7)$$

式中,  $\vec{Y}: \{\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_n\}$  为坝前水位数据  $Y$  经低通滤波后的水位数据;  $H(f_s, f_c, k)$  为  $k$  阶低通滤波器的传递函数;  $f_s$  为采样频率;  $f_c$  为截止频率。

滤波器阶数越高, 通过滤波器的信号会越接近理想形状(对于低通滤波, 理想形状是截止频率以下完全通过, 截止频率以上完全衰减), 但阶数增加会导致计算量增大, 滤波效果更加陡峭, 同时造成一定的相位失真, 本研究中阶数定为 3。在进行低通滤波时, 对于水位小时数据, 1 d 之内采样 24 次,  $f_s$  设定为  $24/1=24$ 。根据奈奎斯特采样定理<sup>[26]</sup>, 截止频率须低于采样频率的一半, 本研究中  $f_c$  取 4。低通滤波器的传递函数描述的是低通滤波器对于不同频率信号的衰减程度, 当坝前水位信号的频率大于截止频率

时, 信号通过滤波器的衰减程度较大, 幅度会被削减。

然后对得到的坝前水位数据  $\vec{Y}$  进行翻转得到  $\overleftarrow{Y}$ , 再采用公式(7)确定的采样频率及截止频率进行二次滤波, 从而抵消相位偏移, 避免最后推求所得的入库流量数据存在滞后现象

$$\overleftarrow{Y}: \{\overleftarrow{y}_n, \overleftarrow{y}_{n-1}, \dots, \overleftarrow{y}_1\} \quad (8)$$

$$\frac{\overleftarrow{Y}_{lp}}{\overleftarrow{Y}} = H(f_s, f_c, k) \quad (9)$$

式中,  $\overleftarrow{Y}$  为由  $\vec{Y}$  翻转而来的水位数据;  $\overleftarrow{y}_{lp}: \{\overleftarrow{y}_{lpn}, \overleftarrow{y}_{lpn-1}, \dots, \overleftarrow{y}_{lp1}\}$  为经低通滤波后的零相位延迟坝前水位翻转数据。

将  $\overleftarrow{y}_{lp}$  进行翻转还原, 得到零相位延迟的坝前水位低通滤波数据  $Y_{lp}$

$$Y_{lp}: \{y_{lp1}, y_{lp2}, \dots, y_{lpn}\} \quad (10)$$

入库流量反推: 由坝前水位、水位库容曲线、出库流量数据根据水量平衡方法计算入库流量  $QI$ :  $\{qi_1, qi_2, \dots, qi_n\}$

$$QI = QO + \Delta V(Y_{lp}) \quad (11)$$

式中,  $QO: \{qo_1, qo_2, \dots, qo_n\}$  为出库流量小时系列数据(包括蒸散发、下渗及灌溉取水等);  $\Delta V(Y_{lp})$  为单位时段内的库容差;  $V = f(Y_{lp})$  为水位库容曲线。

## 2.4 评价指标

本研究主要从改善入库流量的合理性入手, 为了充分衡量各方法所得入库流量相较原始入库流量对锯齿状震荡和大量异常负值等不合理现象的改善情况, 从平滑改善度和负值减少情况两方面进行量化评价, 选取的指标包括: 负值率 ( $R_{ne}$ )、平滑改善度 ( $E_{si}$ )、洪峰相对误差 ( $RE_F$ )、峰现时间相对误差 ( $RE_T$ ) 共 4 个指标, 对各方法的改善效果及特征还原情况进行横向对比。

其中,  $R_{ne}$  为入库流量数据中流量小于 0 的异常数据条数 ( $n_e$ ) 相较于总数据条数  $n$  的占比

$$R_{ne} = \frac{n_e}{n} \times 100\% \quad (12)$$

$R_{ne}$  越高, 表明所推求的入库流量与实际情况的偏差越大。

$E_{si}$  用以衡量各方法推求的入库流量相较于原始入库流量对锯齿现象的改善程度, 由各方法处理后入库流量与原始流量一阶差分的标准差比值构成, 其范围在 0~1 之间,  $E_{si}$  越接近于 1, 则表明改善程度明显

$$E_{si} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n-1} (qi_{t+1} - qi_t)^2}{\sum_{t=1}^{n-1} (q_{t+1} - q_t)^2}} \quad (13)$$

式中,  $q$  和  $qi$  分别为经由坝前水位数据通过水量平衡法直接推求所得的入库流量和各方法处理后的入库流量;  $t$  为时序数。

$RE_F$  及  $RE_T$  用以衡量各方法对典型洪水过程的特征刻画及还原程度, 计算公式为

$$RE_F = \frac{\sum_{i=1}^p (F_{qi, i} - F_{q, i})}{\sum_{i=1}^p F_{q, i}} \times 100\% \quad (14)$$

$$RE_T = \frac{\sum_{i=1}^p (T_{qi, i} - T_{q, i})}{\sum_{i=1}^p T_{q, i}} \times 100\% \quad (15)$$

式中,  $p$  为挑选出来的洪水场次数量;  $F_{q, i}$ 、 $F_{qi, i}$  分别为原始入库流量和各方法处理计算所得入库流量第  $i$  场洪水的洪峰 ( $m^3/s$ );  $T_{q, i}$  和  $T_{qi, i}$  分别为原始入库流量和改进入库流量第  $i$  场洪水的峰现时间 (h)。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 入库流量对比分析

将原始入库流量经由五点三次法处理后所得入库流量 (iq\_53)、原始入库流量经由滑动平均法处理后所得入库流量 (iq\_ma)、采用低通滤波处理后的水位数据推求得入库流量 (iq\_bl) 分别与原始入库流量 (iq\_or) 进行对比分析 (以 2018 年为例, 对比效果见图 3), 以充分对比各方法计算所得入库流量的可靠性及准确性。

从图中的整体过程来看, 三种方法在一定程度上均改善了原始入库流量由于非正常锯齿震荡造成的大量较大负值现象, 特别是滑动平均法及水位低通滤波法, 两者推求所得流量过程中小于 0 的数据在数量及大小上均有明显改善。对于 2013—2020 年全过程而言, 从评价指标上来看 (见表 1), iq\_53、iq\_ma、iq\_bl 的负值率相较于 iq\_or 均减少了一半以上。iq\_bl 的负值率减小最为明显, 入库流量数据中的负值占比仅为 3.20%, 且这些负值的平均值相较于 iq\_or 的负值均值减少了 84.3%, 平均值为  $-29.76 m^3/s$ , 对比隔河岩水库入库平均小时流量  $403 m^3/s$  已降至较低水平。iq\_ma 的负值率及负值改善率表现效果不如 iq\_bl, 但仍要优于 iq\_53。iq\_53 由于采用

的是五点三次平滑方法, 对于非平稳的数据, 特别是对于锯齿状震荡数据, 平滑效果一般, 这也造成在负值率及负值均值上 iq\_53 表现均差于 iq\_ma 和 iq\_bl。

表 1 各方法推求入库流量评价指标值

Table 1 Evaluation index values of inflow estimation using different methods

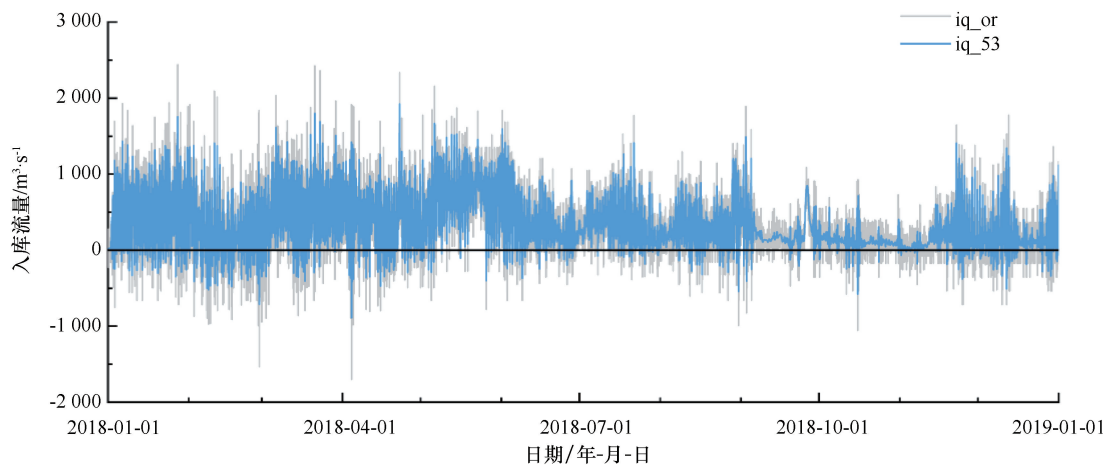
评价指标	iq_or	iq_53	iq_ma	iq_bl
负值率/%	14.72	6.15	4.98	3.20
负值均值/ $m^3 \cdot s^{-1}$	-190.04	-99.83	-45.52	-29.76
平滑改善度	—	0.51	0.65	0.77

对于平滑效果, 从平滑改善度上可以看出 iq\_bl 的平滑改善效果最好, iq\_ma 次之, iq\_53 最差, 这与三个方法在改善负值率及负值均值上的表现效果相一致。总体来说, 相较于滑动平均法与五点三次法, 水位低通滤波法对减少异常负值、提升入库流量平滑度效果明显, 提高了所推求入库流量数据的质量。

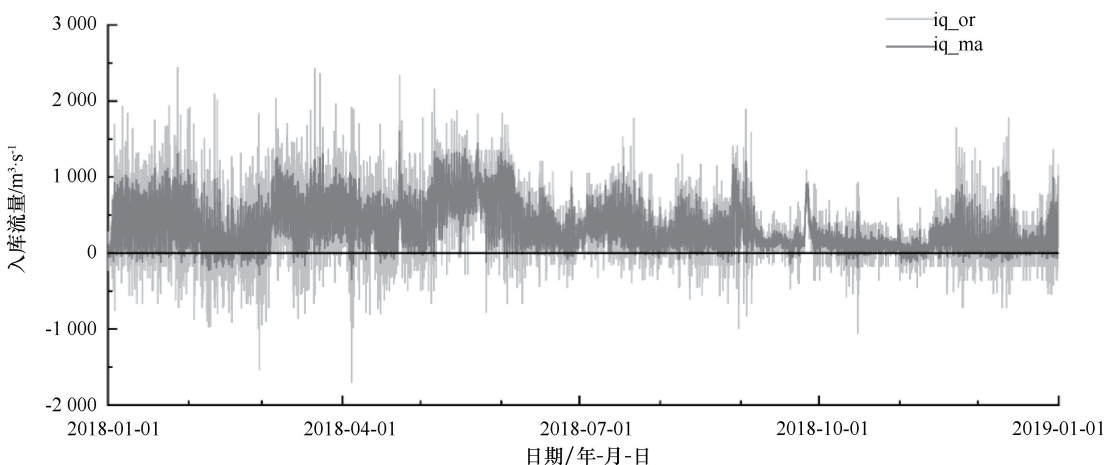
#### 3.2 典型洪水过程对比分析

为了进一步对比分析三种方法对洪水过程的平滑效果及刻画还原程度, 选取典型洪水, 对峰现时间、洪峰流量进行分析。选取 A: 2020 年 7 月 17 日 2:00—2020 年 7 月 20 日 23:00 (洪峰量级  $10\,000 m^3/s$ )、B: 2017 年 10 月 1 日 13:00—2017 年 10 月 5 日 3:00 (洪峰量级  $7\,000 m^3/s$ )、C: 2020 年 6 月 17 日 2:00—2020 年 6 月 20 日 17:00 (洪峰量级  $3\,000 m^3/s$ )、D: 2014 年 9 月 1 日 0:00—2014 年 9 月 4 日 21:00 (洪峰量级  $3\,000 m^3/s$ )、E: 2015 年 5 月 13 日 6:00—2015 年 6 月 3 日 23:00 (洪峰量级  $2\,500 m^3/s$ )、F: 2013 年 6 月 5 日 2:00—2013 年 6 月 8 日 17:00 (洪峰量级  $2\,000 m^3/s$ ), 共六场不同量级典型洪水过程, 对比分析各方法推求所得入库流量过程与原始入库流量过程的差异及改善情况 (见图 4), 对平滑前后的洪峰及峰现时间进行分析。

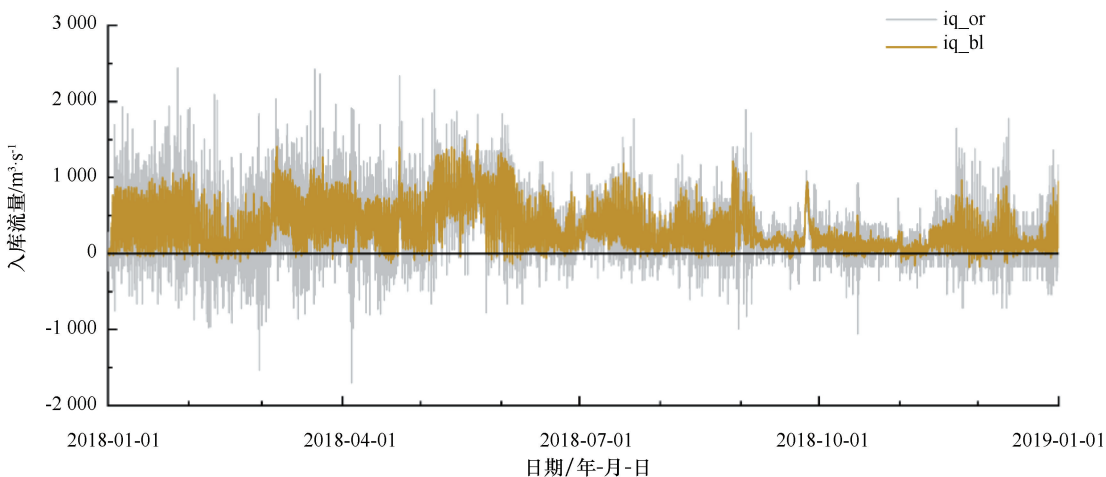
从具体流量过程上来看, 对于量级较大的洪水过程 A、B, 三种方法处理过后的入库流量过程与原始入库流量过程较为一致, 且由于洪水量级较大, 未经任何处理的原始入库流量过程本身不存在负值, 且锯齿震荡现象不明显。由表 2 可以发现几种方法对 A、B 场次洪水的平滑改善度都比较小。对于洪水过程 C、D, 五点三次法处理后的流量过程仍然存在负值, 且锯齿状震荡依旧明显。滑动平均法处理后的入库流量过程也存在负值, 但在平滑改善度上要优于五点三次法。而对于洪水量级较小的洪水过程 E、F, 滑动平均法相较于五点三次法优势并不明显, 平滑改善度



(a) iq\_53与iq\_or入库流量对比



(b) iq\_ma与iq\_or入库流量对比



(c) iq\_bl与iq\_or入库流量对比

图3 各方法典型年入库流量过程对比

Fig. 3 Comparison of inflow processes of a typical year using different methods

仅提升0.02。此外虽然本次平滑处理中为避免造成较大相位差,滑动平均法所选窗口较小,但与原始入库流量过程及其他方法相比,滑动平均法仍然造成了一定的滞后现象。对于典型洪水过程,随着场次洪水

量级的减小,各方法对原始数据处理后的平滑改善度呈增加趋势。从平滑改善度来看,水位低通滤波法在不同量级场次洪水过程中表现最优, iq\_ma 的表现优于 iq\_53, 但与 iq\_bl 仍存在差距。

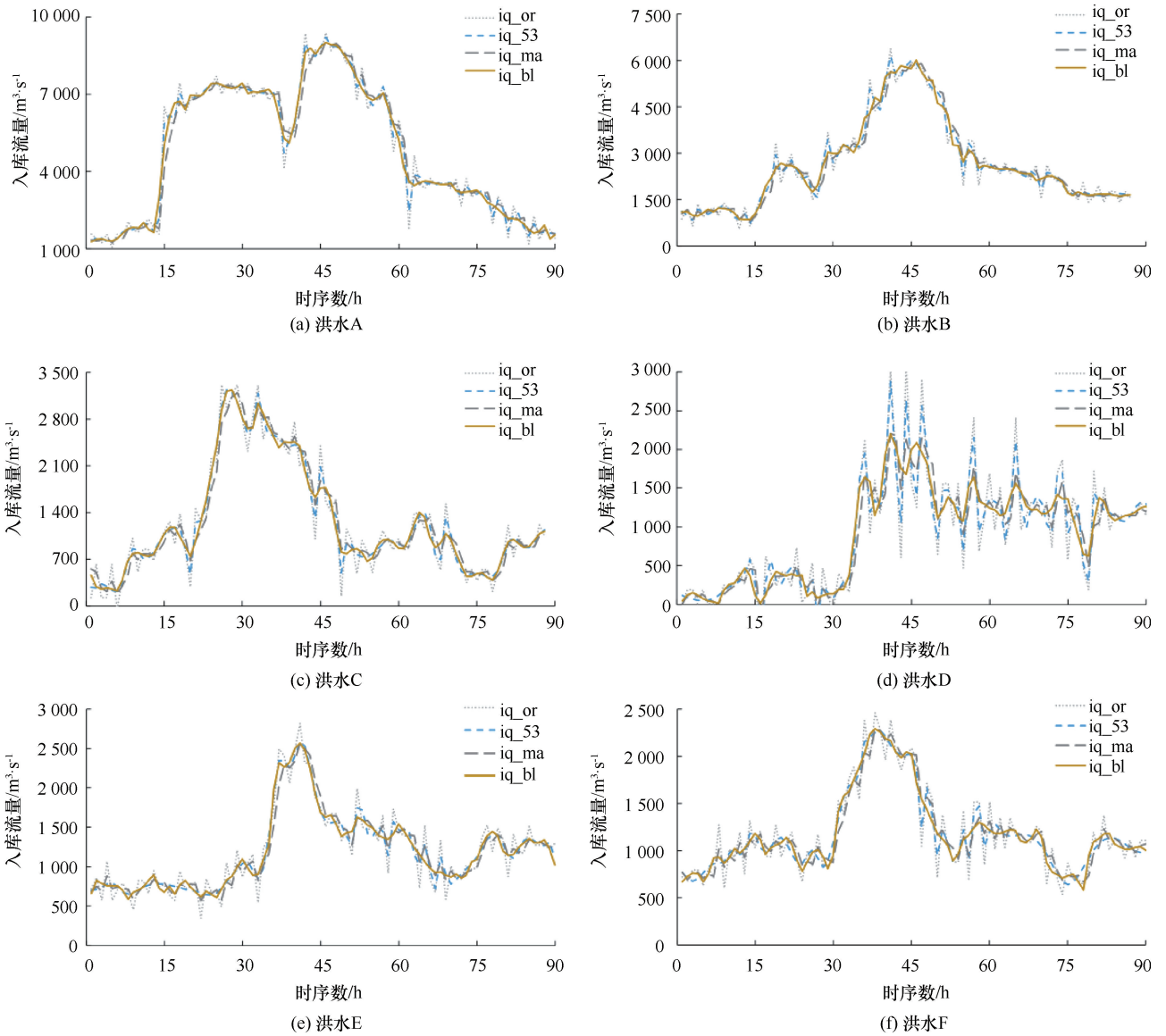


图4 各方法推求所得典型洪水过程对比

Fig. 4 Comparison of typical flood processes estimated using different methods

表2 各方法推求所得典型洪水过程评价指标值

Table 2 Evaluation index values of typical flood processes estimated using different methods

处理方法	平滑改善度						$RE_F/\%$	$RE_T/\%$
	A	B	C	D	E	F		
五点三次法	0.36	0.37	0.47	0.35	0.66	0.68	-4.28	-0.42
滑动平均法	0.53	0.57	0.57	0.63	0.68	0.70	-8.43	2.54
水位低通滤波法	0.57	0.60	0.63	0.75	0.73	0.76	-7.87	1.69

对各方法计算所得典型洪水过程的洪峰及峰现时间进行对比分析(见表2), 在三种方法中, 五点三次法由于平滑效果一般, 在一定程度上保留了原入库流量的锯齿波动, 所以在峰现时间和洪峰相对误差上较小。然而原始入库流量的洪峰及峰现时间受多重噪声影响也并非一定是真值, 但是低通滤波方法在保证较好平滑改善度的前提下尽可能的减少了平滑处理对

洪峰和峰现时间的影响,  $iq_{bl}$  的  $RE_F$ 、 $RE_T$  相较于  $iq_{ma}$  表现都要更好。

### 3.3 低流量过程对比分析及负值后处理

经过水位低通滤波推求所得入库流量虽然极大的改善了原始入库流量的锯齿震荡及异常负值情况, 但是受闸门启闭、机组开停等难以消除的低频噪声影响, 水位低通滤波法所推求的入库流量中的异常负值仍不

能完全消除。从负值条数的月份统计可以看出(见图5), 负值多分布于非汛期(1—4月, 10—12月),  $iq_{or}$ 、 $iq_{53}$ 、 $iq_{ma}$  和  $iq_{bl}$  在非汛期负值条数的占比分别为 73.11%、76.73%、85.70%、84.23%。

选取负值出现较为密集的 2018 年 2 月 17 日 1:00—2018 年 2 月 25 日 08:00 共 200 条流量数据为典型低流量过程, 比较对负值改善较为明显的滑动平均法及水位低通滤波法对低流量过程的平滑效果(见图6)。通过对比分析可以发现  $iq_{bl}$  相较于  $iq_{ma}$  以及  $iq_{or}$  减少明显,  $iq_{ma}$  有 25 条负值, 而  $iq_{bl}$  仅有 8 条负值, 且  $iq_{bl}$  中的负值一般出现在较小流量之后, 流量增大之前。这一般与上游电站及自身机组运行发电有关<sup>[27-30]</sup>, 即电站闸门启闭对水位造成的影响无法完全滤除, 影响了库容计算精度及入库流量反推计算。

考虑到负值出现时期一般为非汛期, 流量较小,

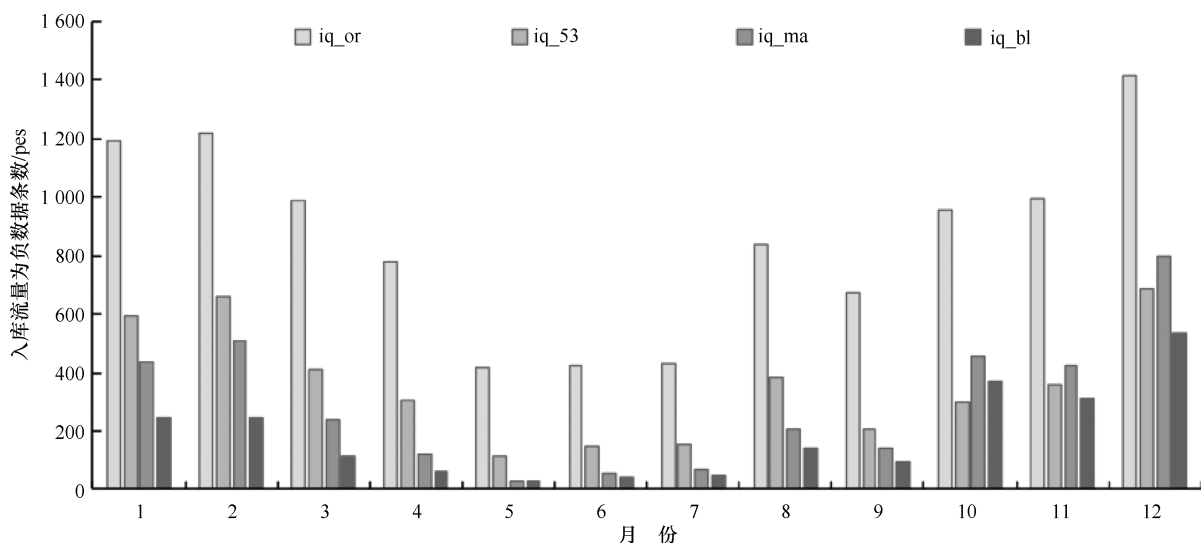


图5 负值条数月分布

Fig. 5 Monthly distribution of negative values

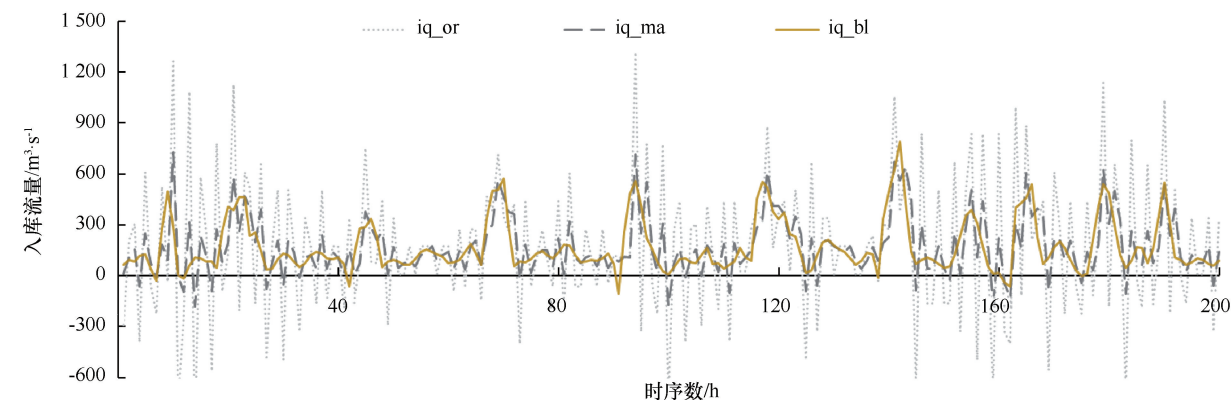


图6 滑动平均法与水位低通滤波法对低流量过程平滑对比

Fig. 6 Comparison of smoothing effect on low-flow processes between moving average and water level low-pass filtering methods

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

### 3.4 结果讨论

相较于常规方法, 水位低通滤波方法从造成入库流量不合理现象的最主要原因入手, 不仅计算及原理简单, 表现效果好, 而且该方法所涉及的参数仅与需去除的高频噪声频率相关, 不受特定水库限制, 可为其他同类型水库提供参考借鉴。但需要注意的是, 本研究中方法为了避免相位差, 对水位数据进行了正反两次滤波, 在对  $t$  时刻水位数据进行低通滤波时依赖于当前时刻的前后数据, 因此该方法适用于事后数据处理, 不适用于数据的实时处理。对于需实时处理数据只能通过单向滤波进行数据处理, 但会对反推所得入库流量造成一定相位差。

此外, 除水位数据中的高频噪声影响外, 入库流量推求的准确性还受多方面因素影响, 对于动库容、电站机组启闭等因素对入库流量推求造成的影响, 可在水位低通滤波方法基础上, 通过完善水位库容监测、考虑机组运行数据、结合水动力学模型等方法进一步完善<sup>[31]</sup>, 从而逐类消除计算误差, 提升入库流量推求的准确性。

## 4 结论

(1) 本研究从造成入库流量锯齿震荡及大量异常负值的直接原因入手, 提出了基于坝前水位低通滤波的入库流量推求方法, 最大限度降低了风浪等高频噪声对水位测量真值的影响以及其对入库流量推求的二次影响。方法及原理简单, 所涉及参数不受特定水库限制, 可为同类型水库提供参考借鉴。

(2) 对于整个流量过程, 相较于五点三次法及滑动平均法, 水位低通滤波方法计算所得入库流量数据中的负值占比最小, 仅为 3.20%。负值均值最小仅为  $-29.76 \text{ m}^3/\text{s}$ , 与原始入库流量数据的负值均值相比减少了 84.3%。对于平滑效果,  $iq\_bl$  的平滑改善效果最好,  $iq\_ma$  次之,  $iq\_53$  最差, 水位低通滤波法对减少异常负值、提升入库流量平滑度效果明显。

(3) 对于不同量级典型洪水过程, 从平滑改善度来看, 经由水位低通滤波处理后推求所得  $iq\_bl$  依旧是最优的,  $iq\_ma$  的表现优于  $iq\_53$  但与  $iq\_bl$  仍存在差距。五点三次法由于平滑效果一般, 在一定程度上保留了原入库流量的锯齿波动, 所以在峰现时间和洪峰相对误差上较小。但低通滤波方法在保证较好平滑改善度的前提下尽可能地减少了平滑处理对洪峰和峰现时间的影响,  $iq\_bl$  的  $RE_F$ 、 $RE_T$  相较于  $iq\_ma$  表现都要更好。

(4) 虽然经过水位低通滤波推求入库流量极大地改善了原始水位数据推求入库流量的锯齿震荡及异常负值情况, 但是受闸门启闭、机组开停等难以消除的低频噪声影响, 水位低通滤波法推求所得入库流量中的异常负值仍不能完全消除。考虑到这些异常负值一般出现在非汛期流量较小时段, 可通过设定最小流量阈值对流量过程进行二次修正。在保证水量平衡的前提下消除负值, 尽可能地保证水位滤波方法对入库流量的刻画精度。

### 参考文献(References):

- [1] KASIVISWANATHAN K S, SUDHEER K P, SOUNDHARAJAN B S, et al. Implications of uncertainty in inflow forecasting on reservoir operation for irrigation[J]. Paddy and Water Environment, 2021, 19: 99-111.
- [2] RAZAD A Z A, SIDEK L M, JUNG K, et al. Reservoir inflow simulation using MIKE NAM rainfall-runoff model; Case study of cameron highlands [J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2018, 13: 4206-4225.
- [3] ZHOU W, YANG Z, LIU P, et al. Estimation of reservoir inflow with significant lateral inflow by using the adjoint equation method[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 360-372.
- [4] 周栋. 水库入库流量锯齿状波动问题探讨[J]. 陕西水利, 2019(12): 42-43.  
ZHOU D. Discussion on the sawtooth fluctuation issues of the reservoir inflow[J]. Shaanxi Water Resources, 2019(12): 42-43.
- [5] 刘章君, 郭生练, 钟逸轩, 等. 入库洪水计算方法及研究进展综述[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 1-6.  
LIU Z J, GUO S L, ZHONG Y X, et al. Advances and review on inflow flood estimation methods [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(11): 1-6.
- [6] FENTON J D. Reservoir routing[J]. Hydrological Sciences Journal, 1992, 37(3): 233-246.
- [7] 邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 325-332.  
DENG A J, CHEN J G, HU H H, et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325-332.
- [8] DENG C, LIU P, LIU Y, et al. Integrated hydrologic and reservoir routing model for real-time water level forecasts [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(9): 05014032.
- [9] 杨芬, 刘军梅, 现状来水条件下密云水库可供水量的一种计算方法研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(11): 51-57.  
YANG Fen, LIU Junmei. Research on a calculation method for the available water supply of Miyun Reservoir under current inflow conditions[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(11): 51-57.
- [10] 闵要武, 王俊, 陈力. 三峡水库入库流量计算及调洪演算方法探讨[J]. 人民长江, 2011, 42(6): 49-52.  
MIN Y W, WANG J, CHEN L. Discussion on calculation method of flood routing and inflow of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 49-52.

- [11] 杨金标, 舒凯, 张后来, 等. 水库水量平衡计算中消除水位跳变影响的过滤算法[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 98-102.  
YANG J B, SHU K, ZHANG H L, et al. Filtering algorithm of eliminating water level jump influence in reservoir water balance[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 98-102.
- [12] 闫孟婷, 黄炜斌, 张天遥, 等. 基于 JMI-CNN-LSTM 耦合模型的梯级水电站间流量动态滞时关系[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(3): 154-164.  
YAN Mengting, HUANG Weibin, ZHANG Tianyao, et al. Study on dynamic flow lag time between cascade hydropower stations based on CNN-LSTM coupling model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(3): 154-164.
- [13] 胡方涛. 水库入库流量平滑修正方法对比分析与研究[J]. 水利技术监督, 2023, (6): 199-202.  
HU F T. Comparative analysis and research on smoothing correction methods for reservoir inflow[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, (6): 199-202.
- [14] 李凯凯. 张峰水库入库流量推算方法与应用研究[J]. 山西水土保持科技, 2021(2): 38-40.  
LI K K. Calculation method and application of Zhangfeng reservoir inflow[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2021(2): 38-40.
- [15] DENG C, LIU P, GUO S, et al. Estimation of nonfluctuating reservoir inflow from water level observations using methods based on flow continuity[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1198-1210.
- [16] 陈建, 李允军, 王建平, 等. 基于梯度自适应优化的入库流量数据平滑算法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(3): 92-97.  
CHEN J, LI Y J, WANG J P, et al. Research on smoothing algorithm of reservoir inflow data based on gradient adaptive optimization[J]. Yangtze River, 2022, 53(3): 92-97.
- [17] 潘爽, 彭勇. 基于入流连续性的尼尔基水库入库流量平滑方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 36-39.  
PAN S, PENG Y. Method of smoothing of Nierji Reservoir inflow based on flow continuity[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 36-39.
- [18] 金铮, 张行南, 夏达忠, 等. 基于多种平滑算法的三峡水库反推入库流量消噪[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 48-53.  
JIN Z, ZHANG X N, XIA D Z, et al. Denoising on reverse deduction inflow of three gorges reservoir based on various smoothing algorithms[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 48-53.
- [19] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.  
PEI Y X, GUO M. The Fundamental principle and application of sliding average method[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2001(1): 21-23.
- [20] 李匡, 柳俊, 张子平, 等. 基于自适应权重的滑动平均入库流量修正方法[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(5): 20-24.  
LI K, LIU J, ZHANG Z P, et al. A reservoir inflow correction method based on the moving average algorithm with auto-adaptive weights[J]. China Flood and Drought Management, 2021, 31(5): 20-24.
- [21] 武炜, 陈标, 吴剑锋, 等. 基于五点三次平滑算法的入库流量反推研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 100-102.  
WU W, CHEN B, WU J F, et al. Study on reverse deduction of reservoir-inflow based on cubical smoothing algorithm with five-point approximation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 100-102.
- [22] 彭杨, 陈凯, 纪昌明. 向家坝水库动库容特性及影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 239-248.  
YANG P, CHEN K, JI C M. Backwater storage characteristic and its effect on flood control in xiangjiaba reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 239-248.
- [23] 周斌. 基于水量平衡方程的水库调洪演算基础数据误差传播规律研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(1): 80-85.  
ZHOU B. Study on basic data error propagation law of reservoir flood regulation calculation based on water balance equation[J]. Pearl River, 2019, 40(1): 80-85.
- [24] 柯文豪. 考虑入库径流季节性变异的清江水布垭-隔河岩梯级适应性调度[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.  
KE W H. Adaptive Operation of Shuibuya-Geheyan Cascade in Qingjiang River Basin by Considering Seasonal Variation of Reservoir Inflow[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021.
- [25] KAISER J F, REED W A. Data smoothing using low-pass digital filters[J]. Review of Scientific Instruments, 1977, 48(11): 1447-1457.
- [26] ROBERTS J, ROBERTS T D. Use of the Butterworth low-pass filter for oceanographic data [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978, 83(C11): 5510-5514.
- [27] 杨国苗, 李小芹, 唐学林, 等. 大型管网关阀优化方案及阀门开度扰动对流量均匀性影响[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(1): 101-108.  
YANG Guomiao, LI Xiaoqin, TANG Xuelin, et al. Valve-closing optimization scheme and influence of valve-opening disturbance on flow uniformity in large-scale pipeline network [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2025, 43(1): 101-108.
- [28] 王俊莉. 贵州乌江梯级水库入库流量计算分析及改进方法[J]. 水利水电快报, 2015, 36(4): 54-56.  
WANG J L. Calculation analysis and improvement method for inflow of Wujiang cascade reservoirs in Guizhou [J]. Express Water Resources&Hydropower Information, 2015, 36(4): 54-56.
- [29] 汪广明, 高翔, 王孝群, 等. 沙坪二级水电站河道型水库超短期水量平衡计算[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 23-27.  
WANG G M, GAO X, WANG X Q, et al. Calculation of Ultra-short-term water balance for channel reservoir of shaping secondary hydropower station[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(9): 23-27.
- [30] 黄旭, 穆振宇, 艾学山, 等. 受上游调控影响的水库入库流量预报方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(8): 78-83.  
HUANG K, MU Z Y, AI X S, et al. Research on the forecast method of reservoir inflow affected by upstream regulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8): 78-83.
- [31] SONG J H, HER Y, KANG M S. Estimating reservoir inflow and outflow from water level observations using expert knowledge: dealing with an Ill-Posed water balance equation in reservoir management[J]. Water Resources Research, 2022(4): 58.

(责任编辑 王璐)