

# 考虑水库调蓄影响的洪水预报智能校正方法研究

陈 瑛<sup>1</sup>, 吴志勇<sup>1,2</sup>, 何 海<sup>1</sup>, 刘杨合<sup>3</sup>, 李杨千<sup>1</sup>, 施怡然<sup>1</sup>, 孙昭敏<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 3. 中国长江电力股份有限公司)

**摘要:**为提高流域洪水预报精度并支撑预报-调度一体化,以嘉陵江流域为研究区,构建了考虑水库调蓄影响的洪水预报智能校正框架;以 VIC 分布式水文模型获取流域产汇流过程,采用 K 最邻近 (KNN) 算法基于历史误差相似性进行多步外延流量校正,引入分层嵌套式长短期记忆 (LSTM) 出库模型 (LSTM1 刻画入出流基本响应, LSTM2 融入水位-库容约束与水量平衡) 预测水库出库流量,并在干支流与梯级水库间逐级耦合实现全过程动态修正。结果表明:VIC 在受水库影响较小站点的场次洪水模拟平均纳什效率系数 (NSE) 约 0.70、相对误差约 10%~15%;KNN 算法校正短预见期 ( $\leq 12\text{h}$ ) 的 NSE 多大于 0.90、相对误差小于 10%,长预见期仍保持改进;与出入平衡、参数化调度方法相比, LSTM 在亭子口水库—草街电站—北碚序列上对复杂非线性调蓄刻画更优,洪水预报精度提升显著。考虑水库影响的洪水预报智能校正方法可显著降低水库入库流量和下游控制站流量过程的模拟误差。

**关键词:** VIC 模型; 洪水预报; 长短期记忆网络; 水库调度; 嘉陵江流域

**Research on intelligent correction methods for flood forecasting considering reservoir regulation impacts**//Chen Xu<sup>1</sup>, Wu Zhiyong<sup>1,2</sup>, He Hai<sup>1</sup>, Liu Yanghe<sup>3</sup>, Li Yangqian<sup>1</sup>, Shi Yiran<sup>1</sup>, Sun Zhaomin<sup>1</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 3. China Yangtze Power Co., Ltd.)

**Abstract:** To improve basin-scale flood forecasting accuracy and support the integration of flood forecasting and reservoir operation, taking the Jialing River Basin as the study area, an intelligent correction framework for flood forecasting considering reservoir regulation impacts was developed. In the framework, the VIC distributed hydrological model was utilized to simulate the runoff generation and routing processes. The K-nearest neighbor (KNN) algorithm was employed for multi-step extrapolated discharge correction based on historical error similarity. A hierarchical nested long short-term memory (LSTM) model was introduced to predict reservoir outflow; LSTM1 characterized the basic inflow-outflow response, while LSTM2 incorporated water level-storage constraints and water balance principles. Dynamic correction of the entire process was achieved through stage-by-stage coupling across mainstreams, tributaries, and cascade reservoirs. The results show that the VIC model achieves an average NSE of approximately 0.70 and relative errors of 10%~15% at stations with minimal reservoir impact. The KNN correction yields NSE values mostly above 0.90 and relative errors below 10% for short lead times ( $\leq 12\text{h}$ ), with sustained improvements for longer lead times. Compared with inflow-outflow balance and parametric operation methods, the LSTM model better characterizes complex nonlinear regulation along the Tingzikou Reservoir-Caojie Station-Beibei sequence, significantly enhancing flood forecasting accuracy. This intelligent correction method significantly reduces simulation errors for both reservoir inflows and downstream control station discharge processes.

**Key words:** VIC model; flood forecasting; long short-term memory; reservoir dispatching; the Jialing River Basin

近年来,随着全球气候变化影响的日益显现,极端降雨事件频发,洪水的发生频率和强度进一步加剧<sup>[1]</sup>。洪水预报作为防洪减灾的重要非工程措施之一,构建高精度的流域性水文模型是流域洪水预

报预警系统的重要组成部分。然而,洪水预报受降水预测误差、模型结构等多重不确定性因素影响<sup>[2]</sup>,更受流域内大型水利工程强干扰的严重制约。水库的调蓄作用从根本上改变了河道的天然产

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52579007);国家自然科学基金联合基金重点项目(U2240225);长江电力股份有限公司科技项目(Z242302050)

**作者简介:**陈瑛(2002—),男,博士研究生,主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail:chenxu\_hhu@163.com

**通信作者:**吴志勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail:zywu@hhu.edu.cn

汇流机制,使得洪水演进过程由单纯的自然驱动转变为受人工调度的复杂过程,导致预报精度受限<sup>[3-5]</sup>。

随着现代系统理论、计算机技术的发展与成熟,为洪水预报实时校正的技术发展提供了重要理论支撑<sup>[6]</sup>。洪水预报实时校正是指利用不断更新的实测和预报信息对模型输入、参数、状态变量或预报结果进行动态调整,从而降低预报误差<sup>[7]</sup>。针对水文模型预报结果进行校正是减少预报误差的最直接的常用方法<sup>[8]</sup>,学者在这方面开展了大量的研究。张娟等<sup>[9]</sup>针对自回归模型进行连续多时段校正时中间误差系列缺失问题,提出一种基于历史洪水预报误差系列的样本重组自回归外延方法,结果表明该方法有效提高校正精度。张旭旻等<sup>[10]</sup>将经济学中的协整理论与误差修正模型引入水文预报研究,提出了基于误差修正概念的自回归误差修正模型,并在应用中显著提升了校正效果。衣学军等<sup>[11-12]</sup>利用长短期记忆(LSTM)在时间数据序列上的优势结合传统校正模型,相较于单一方法,融合后的校正模型有效提高校正精度。高益辉等<sup>[13]</sup>和肖杨<sup>[14]</sup>分别在淮河流域和沅水流域开展考虑上下游水力联系的多站点联合校正研究,结果表明考虑河流空间关联性的多点联合校正优于单点校正。然而,上述研究多集中于天然河道或对水利工程影响较小的区域,当面对具有强调节能力的大型水库时,传统校正方法往往因无法解决人工调度引入的非线性突变特征,导致校正效果一般。

水库调度对洪水预报影响显著,获取水库调度规律并纳入水文模型中,对提升预报精度和推动预报-调度一体化具有重要意义<sup>[15]</sup>。LSTM具有实现复杂非线性映射功能的特点,在时间序列学习分析等方面有较高的预测精度,在水库出流方面有较好的运用。汤正阳等<sup>[16]</sup>利用LSTM循环神经网络在溪洛渡水库提取不同场景下的调度规则,能够生成合理的出流方案。柯思莹<sup>[17]</sup>以时段末水位作为LSTM神经网络的决策变量,在丹江口水库获取汛期水库最优出库函数。张玮等<sup>[18]</sup>利用LSTM构建物理机制引导的水库调度深度学习模型,模拟结果更符合水量平衡原理。张彪等<sup>[19]</sup>构建了考虑出库泥沙特征等多个决策因子的RF-LSTM(随机森林-长短期记忆)模型,并利用该模型提取了三峡水库汛期调度规则。尽管现有研究在流量误差校正和水库调度规则提取方面分别取得了进展,但考虑水库影响的流量校正研究仍显不足。高精度的水文预报是调度和决策的基础,目前在洪水预报校正中,大多数研究仅外延一步,且考虑上下游水系整体影响的

研究较少<sup>[13]</sup>,实际运用意义有限。多步外延的流量校正方法和水库出库流量预报模型相结合的智能校正综合运用对于有效解决径流不确定性和水库调度对洪水预报精度的不利影响具有重要意义。

长江上游流域地形复杂多山区,水利工程影响显著,洪水的预测和预防十分困难<sup>[20]</sup>,开展洪水预报研究具有一定挑战性。三峡水库是长江上游的重要防洪目标,部分入库流量来自嘉陵江流域,出口控制站为北碚水文站<sup>[21]</sup>,其预报精度直接关系到三峡入库流量预报误差。因此,在嘉陵江流域构建小时尺度的高精度洪水预报模型,对提升长江上游防洪减灾与水资源管理具有重要意义。因此,本文选取嘉陵江流域为研究区开展洪水预报智能校正研究,以期为提高流域整体洪水预报精度和防洪调度提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据资料

嘉陵江是长江流域面积最大的支流流域,径流量位居前列,对三峡入库洪水有显著影响。嘉陵江流域包括嘉陵江干流、渠江和涪江等三大水系,干流全长1345 km,流域面积约16万km<sup>2</sup>,地理位置为29°N~35°N、102°E~110°E,地势西北高、东南低,流域概况见图1。嘉陵江流域多年平均降水量为935 mm,由南向北逐渐递减,东南地区年降水量多在1000 mm以上,西北地区年降水量约为600 mm,降雨多集中在6—9月,占全年的66%。

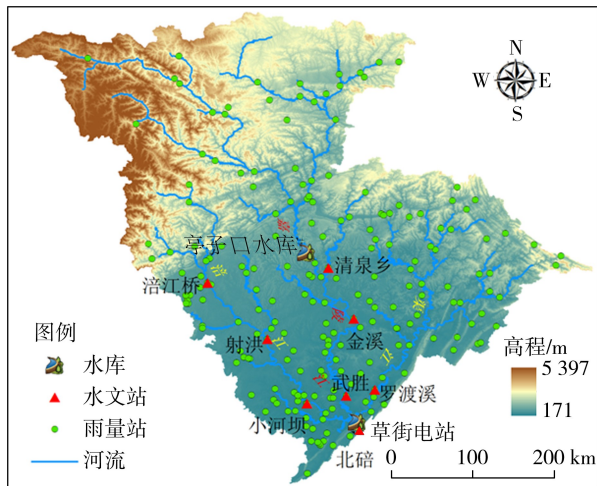


图1 嘉陵江流域概况

Fig. 1 Overview of the Jialing River Basin

亭子口水库和草街电站为嘉陵江流域防洪体系核心,也是长江流域防洪体系的重要组成部分,发挥着至关重要的防洪作用,嘉陵江的流量过程主要受其调控影响。其中,亭子口水库作为嘉陵江流域控制性工程,在防洪调度中具有关键作用,并对嘉陵江干流径流过程产生影响显著;草街电站是嘉陵江下

游河段的控制性枢纽工程,入库流量主要受涪江小  
河坝、渠江罗渡溪及嘉陵江干流武胜水文站控制,而  
嘉陵江干流径流又受到上游亭子口水库出库的直接  
影响。草街电站的出库站点则为北碚水文站,该站  
点距草街电站较近,其流量过程基本反映草街电站  
的出库特征<sup>[22]</sup>。根据历史洪水资料统计,亭子口水  
库至草街电站平均汇流时间为 48 h。

本文的降水数据来源于水利部信息中心;气温、  
气压、风速等其余气象数据来源于中国气象局  
(<https://data.cma.cn/>);水库及水文站的逐小时实  
测水文资料及水库库容曲线由水利部信息中心提  
供。选取 17 场在亭子口水库与草街电站均具有显  
著洪水过程的典型场次用于后续方法验证。

## 2 研究方法

### 2.1 VIC 模型

随着水库数量的不断增加及运行规模的扩大,  
其对天然水文循环的扰动日益显著,也使水文预报  
面临更大挑战。水库群及其防洪保护点之间存在大  
量未控区间流域,一直是洪水预报的核心难点,而分  
布式水文模型能很好地解决这一难题。VIC  
(variable infiltration capacity)模型是由美国多所大  
学联合开发的大尺度半分布式陆面水文模型,其基  
于 SVATS (soil-vegetation-atmosphere transfer  
schemes)理论<sup>[23-25]</sup>,拥有网格化高、物理性强的优  
势,能够灵活运用各种气候模型,考虑多因素的综  
合作用,输入数据包括降水量、气温、气压、风速等。  
本文利用 VIC 模型 5.0 版本构建嘉陵江流域 5 km×  
5 km 的网格单元产汇流模型。

现有预报方案中产汇流模型的率定多侧重于平  
均条件下的目标函数最优,而对参数的异参同效关  
注不足<sup>[15]</sup>,不同参数对模型模拟结果的影响程度各  
异。嘉陵江梯级水库群承担着下游及长江干流的防  
洪工作,流量受人为调控较大,可用于参数率定的天  
然洪水场次较少。与传统的参数率定自动化算法所  
给出的整个流域只有一套参数的方式不同,本文引  
入长江流域 5km×5km 网格的水文参数<sup>[26]</sup>,利用最  
近邻插值法<sup>[27]</sup>进行参数移用将其插值到模型网格  
上,使每个模型网格都具有分布式的水文参数。

### 2.2 基于 K 最邻近(KNN)算法的流量校正

预报-调度一体化方案必须依赖于精确的洪水  
预报。KNN 算法是一种基于样本相似性的非参数  
化预测模型<sup>[28]</sup>,因其不依赖于参数化的函数假设,  
能够有效捕捉水文过程中的非线性动态关系,在洪  
水预报误差校正中表现出较强的适应性和灵活性。  
本文综合考虑原始数据和模拟结果的时间分辨率,

将模型时间步长设定为 1 h,生成流量预报误差的校  
正序列。具体而言,模型利用滑动窗口技术将历史  
误差序列向量化以构建样本库,在进行递推预测时,  
通过计算当前时刻误差向量与样本库中历史向量的  
距离,筛选出演变模式最相似的  $k$  个邻近样本,并基  
于反距离加权插值的方式估算未来时刻的误差值,从  
而实现对原始洪水流量预报结果的实时动态修正。

### 2.3 水库出库流量预测

水库调度已成为制约洪水预报精度和预见期延  
长的重要因素之一。目前我国水库运行仍以常规调  
度为主,蓄泄过程受多因素共同制约<sup>[29-30]</sup>。大中型  
水库普遍建立了较为完善的调度规程,可依据防洪  
调度方案,结合蓄水量、水位及入库流量等水文信  
息,制定相应的蓄泄规则,提升调度过程的可重复性  
和透明性。但现有调度规则多以自然语言表述,缺  
乏统一格式与规范化术语,且难以体现调度员长期  
实践形成的经验性调整机制,从而制约了其在标准  
化与数字化方面的深入发展<sup>[31]</sup>。

水库在长期运行过程中积累了大量水文观测数  
据,其中蕴含了调度规律和人工经验。利用 LSTM  
等模型从历史数据中提取调度规则,可直接学习真  
实调度行为的隐含映射关系,更加准确地刻画出库  
流量与入库流量、水位、时段等决策变量间的关联。  
构建适宜的水库出库模型有助于提升调度的客观化  
与智能化水平,从而提升洪水预报能力,并促进在调  
度与预报互馈作用下的预报-调度一体化的实现。

对于水库出库流量预测,出入平衡法是最常用  
的方法之一,该方法以预报的入库流量为依据,以相  
等的出库流量进行下泄,从而在保证水库运行安全  
的前提下维持水库水位的相对稳定;参数化调度规  
则方法以水库运行规程为基础,将调度原则与约束  
条件转化为模型参数,通过构建可调节的放水函数,  
以参数化形式描述水库的出库规律,该方法能在系  
统考虑防洪约束的基础上,实现复杂调度规则的简  
化与灵活模拟,从而生成适应不同情景的出库方案。

水库调度具有明显的时序性,水库蓄水量和流  
量等状态变量受到历史数据长期影响。LSTM 模型  
因其能够有效捕捉水库出库过程中的非线性关系,  
精确地学习这一复杂水文系统的动态演变过程,在  
出库流量预测中具有显著优势。本文基于 LSTM 模  
型,综合考虑月份、时刻等时间特征,以及水库入库  
流量、水位及库容等关键变量,构建了分层嵌套式水  
库出库流量预测模型。模型由两部分组成:LSTM1  
模型以时间特征和入库流量为输入,以出库流量为  
输出,用于刻画水库入出流之间的基本响应关系;  
LSTM2 模型在此基础上进一步引入水位和库容信

息,以出库流量为预测目标,用于刻画水库调蓄特性与运行规律。通过将 LSTM1 与 LSTM2 模型进行嵌套,形成基于机器学习的分层式水库出库流量预测框架,更全面地反映水库的动态调控过程与非线性响应机制。

将不考虑水位、库容等变量的 LSTM1 模型模拟的出库流量  $Q_{out,t}$ ,与当前时刻的入库流量  $Q_{in,t}$  与上一时刻的入库流量  $Q_{in,t-1}$  和出库流量  $Q_{out,t-1}$ ,通过水量平衡计算得到库容变化量,进而计算此刻水库蓄水量  $W_t$ ,计算公式为:

$$W_t = 3600\Delta t \left( \frac{Q_{in,t} + Q_{in,t-1}}{2} - \frac{Q_{out,t} + Q_{out,t-1}}{2} \right) / 1000000 + W_{t-1} \quad (1)$$

式中: $\Delta t$  为时间步长; $W_{t-1}$  为上一时刻的水库蓄水量。

根据得到的当前时刻水库蓄水量,通过水位-库容曲线计算出此刻的水库水位;并将求出的水位、库容与时刻、水库入库流量数据,输入构建的 LSTM2 模型中,得出最终水库出库流量。

## 2.4 评价指标

本文使用纳什效率系数(NSE)、峰现时差绝对值( $\Delta T$ )、径流相对误差绝对值( $E_r$ )以及洪峰相对误差绝对值( $R_{EP}$ )等指标,对所构建洪水模型的模拟精度进行了综合评估。相对误差是指测量值与真实值之间的差异相对于真实值的比率比例,越接近 0 精度越高。NSE 反映径流过程模拟效果,当其数值逼近 1 时,指示模型模拟的精确度及可靠性极高。

## 3 考虑水库调蓄影响的洪水预报智能校正方法

### 3.1 数据整理

将水库运行时间序列进行整理,并对水位、库容、入库流量等数据进行预处理,保证数据的连续性,剔除缺测与异常值数据。此外,提取需要模拟水库的水位-库容曲线数据,并进行插值处理。

### 3.2 构建 LSTM 出库流量预测模型

本文使用的 LSTM 模型考虑时间特征、水库入库流量、水位和库容等变量,采用嵌套结构,构建水库出库流量智能预测模型。LSTM1 模型以时间特征、水库入库流量为输入变量,出库流量为目标变量;LSTM2 模型以时间特征、水库入库流量、水位、库容为输入变量,出库流量为目标变量。构建的 LSTM 模型包括 512 个记忆单元,对 LSTM 层的递归连接应用 L2 正则化,以避免过拟合,输出单元为 1,模型优化器选择 adam,训练次数为 20 次。将实测的入库时刻、水位、

库容、流量等数据输入两套模型,设置模型参数,训练 LSTM 模型使其满足精度要求,最后将 LSTM1 模型与 LSTM2 模型进行嵌套,从而构建 LSTM 水库出库流量预测模型。

### 3.3 方法流程

考虑水库调蓄影响的智能校正方法流程如图 2 所示,主要包括:①运行 VIC 模型获得流域模拟水文过程,得到模拟流量  $Q_{sim}$ ;②根据历史实测流量资料,对水库站入库流量进行流量校正,得到校正后流量  $Q_{cor}$ ;③将校正后的流量  $Q_{cor}$  作为入库流量  $Q_{in,q}$ ,并与历史实测水文信息一同输入水库出库流量预测模型中,得到预测的水库出库流量  $Q_{out,q}$ 。下游水库站点则重复上述步骤,从而逐级实现对整个流域水文过程的动态修正与模拟,最终形成考虑水库调蓄的预报-调度一体化方案。

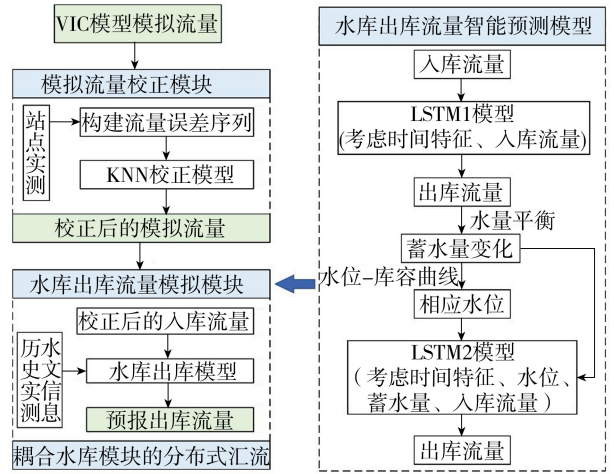


图 2 考虑水库调蓄影响的洪水预报智能校正方法流程

Fig. 2 Flow process of flood forecasting intelligent correction method considering reservoir regulation influence

为评价本文构建的考虑水库影响的智能校正方法在出库过程模拟精度上的改进效果,采用不同水库出库流量预测方案对结果进行对比:方案 1 以原始模拟流量作为出库流量;方案 2 以水库实测出库流量作为出库流量;方案 3 对入库模拟流量校正后,利用出入平衡方法预测出库流量;方案 4 对入库模拟流量校正后,利用参数化调度规则方法预测出库流量;方案 5 对入库模拟流量校正后,利用 LSTM 出库流量预测方法预测出库流量。

## 4 结果与分析

### 4.1 VIC 模型模拟结果

选取小河坝、罗渡溪、涪江桥、射洪、清泉乡 5 个站点作为嘉陵江流域受水库影响较小的流域典型站点开展研究。基于 VIC 模型,对 2017—2024 年多场次洪水进行了模拟,流量过程线如图 3 所示,各典型

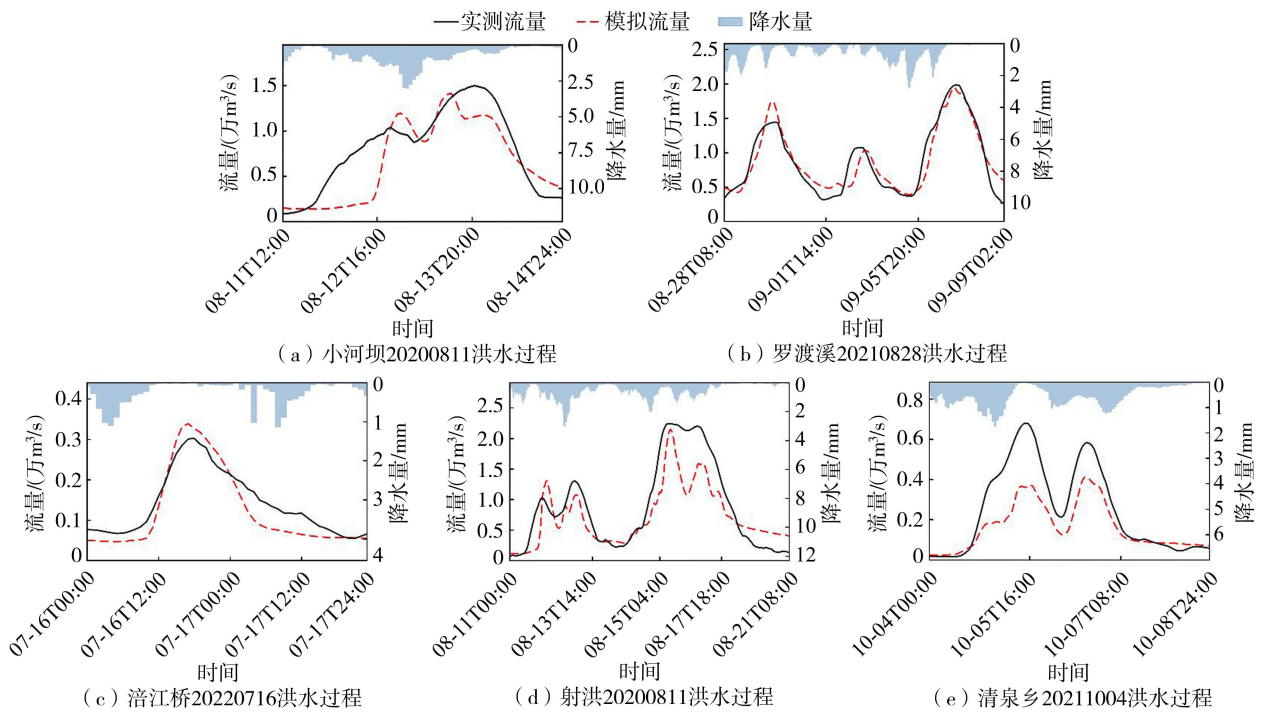


图3 各典型站点不同场次洪水的流量过程线

Fig.3 Flow process lines of floods in different events at various typical stations

站点模拟结果评价指标均值如表1所示。由图3和表1可见,5个典型站点的场次洪水模拟结果NSE均值达到0.70左右,平均峰现时差在7h以内,平均相对误差为15%左右。说明本文的VIC模型和所引入的长江流域5 km×5 km网格的水文参数在整个嘉陵江流域的模拟结果具有较高精度,验证了本文参数移用方案在研究区的良好适用性,为后续研究奠定了基础。

表1 各典型站点模拟结果评价指标均值

Table 1 Average evaluation indexes of simulation results for typical sites

站点	场次数	NSE	$\Delta T/h$	$E_r/\%$	$R_{EP}/\%$
小河坝	10	0.65	4.22	17.43	24.84
罗渡溪	24	0.75	4.42	9.99	12.84
涪江桥	11	0.68	5.18	10.23	13.66
射洪	9	0.71	3.86	10.04	11.15
清泉乡	10	0.70	6.22	16.12	33.91

## 4.2 流量校正效果

为检验KNN算法在嘉陵江流域流量校准的效果,选取了17场洪水过程,对亭子口水库入库、草街电站入库及北碚站的流量过程进行了校正。待校正的初始模拟结果由VIC模型基于亭子口与草街电站的方案1出流方案模拟得出。结合防洪预报的实际需求,校正预见期设置为1、3、6、12、24、36、48、72 h,结果如图4所示(图中初始模拟为VIC模型模拟结果;1 h~72 h为基于KNN算法的不同预见期校正结果)。整体来看,KNN算法在各站点均显著提升了洪水过

程模拟精度,能够有效捕捉洪水过程特征,校正后场次洪水的NSE均值保持在0.70以上,平均相对误差在10%以内。

由图4可见,在12 h预见期以内,校正后的NSE值普遍维持在0.90以上,且相对误差和洪峰误差均处于极低水平,峰现时差明显缩短。这表明KNN算法能够在短期预报条件下稳定捕捉洪水演进特征,并有效削弱初始模拟中存在的偏差。在较长预见期(>12 h)条件下,虽然整体精度较短期有所下降,会出现部分场次指标低于原始模拟的情况,但KNN算法仍维持了一定的适应性,各站点NSE值多数保持在0.70以上,峰现时差、相对误差和洪峰误差虽有增加,但大多数场次优于初始模拟结果,这说明KNN算法在较长预见期内仍具备一定的误差修正能力。

## 4.3 水库出库流量预测结果

根据亭子口水库和草街电站的调度规程,在洪水过程中,两库坝前水位与下泄流量受规程调控,其运行需兼顾防洪、航运、发电等多目标任务,出库流量受水位和入库流量等多种因素共同制约。这种多目标、约束复杂的调度特征与本文提出的LSTM水库出库流量预测模型的应用场景高度契合。将LSTM出库流量预测模型应用于亭子口水库和草街电站的数据集,以验证该模型对实际出库流量序列的模拟效果。整理2017—2024年17场洪水的水库运行时间序列作为数据集,并将其按照6:2:2的比例设置为训练集、验证集、测试集,模拟结果的评价指标值见表2。

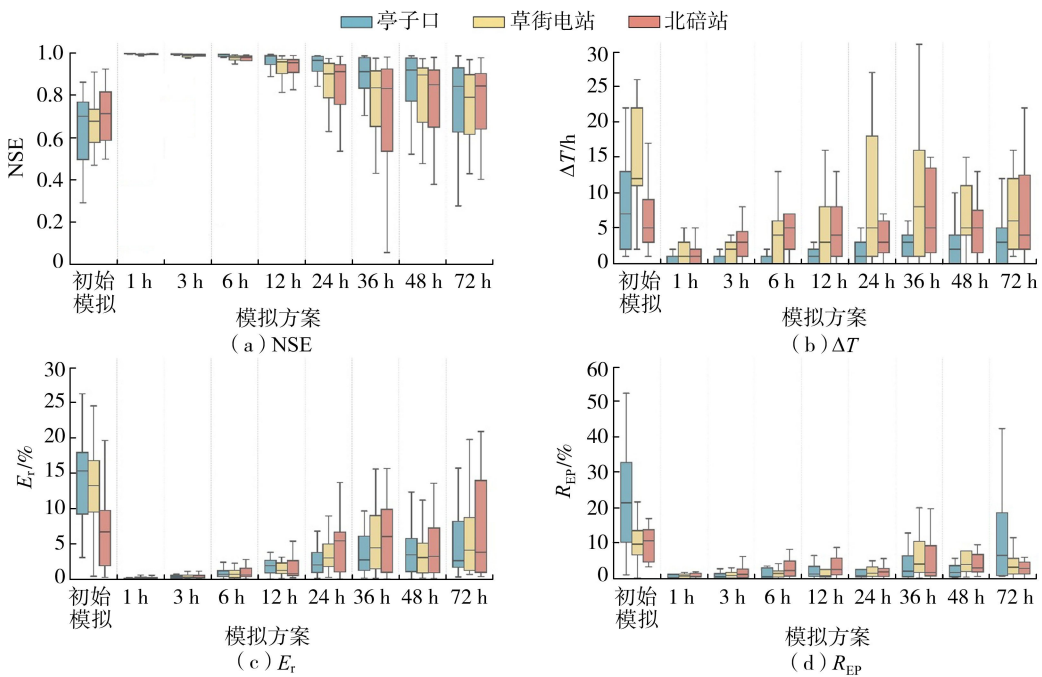


图 4 KNN 算法流量校正结果的评价指标箱线图

Fig. 4 Box plot of evaluation indicators for flow correction results of KNN algorithm

由表 2 可见,所构建的 LSTM 出库流量预测模型在亭子口水库和草街电站有良好的运用效果。单一依赖入库流量与时间特征的 LSTM1 模型虽能反映出库流量的基本变化,但其精度有限;引入水位与库容等关键调控因子的 LSTM2 模型的预测性能显著提升,表明水库运行状态变量对出库过程的模拟至关重要。进一步将 LSTM1 与 LSTM2 嵌套耦合,并结合水量平衡约束,不仅实现了对库容动态变化的合理表征,而且为实现预报-调度一体化提供了理论依据。

#### 4.4 智能校正方法的应用效果

选取嘉陵江流域 20180708 和 20221005 两场典型洪水过程,在亭子口水库—草街电站—北碚序列上,将不同水库出库流量预测方案应用于亭子口水库和草街电站,与实测流量过程进行对比,以评估考虑水库影响的洪水预报智能校正方法的模拟精度。考虑亭子口—草街电站区间的平均汇流时间,选用 48h 预见期的 KNN 算法对初始入库流量进行校正。不同方案下流量模拟结果与实测流量对比见图 5,模拟结果的评价指标值见表 3。

由图 5 和表 3 可见,方案 1 的模拟结果由于未考

虑水库调度影响,整体模拟精度受限,相比之下方案 5 显著提升了模拟精度,尤其在洪峰过程的再现方面表现突出。从考虑水库影响的洪水预报智能校正模型在亭子口水库与草街电站的联合应用结果可以看出,校正后的入库流量为水库出库模型提供了更为可靠的输入条件,草街电站的出库流量模拟在亭子口水库校正结果的基础上精度进一步提升。在不同的出库流量预测方法中,LSTM 出库流量预测模型整体表现最佳,能够更准确地刻画复杂的非线性调蓄关系,更好地提取不同情形下的水库调度规则;出入平衡方法与参数化调度规则模拟方法虽能一定程度改善模拟结果,但其函数表达过于单一,难以适用于复杂情形,改进幅度相对有限。相较于 LSTM 出库流量预测模型,基于参数化调度规则方法的模拟结果更加波动,且对洪峰模拟的把握尺度较弱,其模拟主要依靠单一函数,对于细节的把握有限。可见,LSTM 出库流量预测模型综合考虑了多种影响出库流量的关键因素,模拟结果更加贴合实际,在洪水过程及洪峰的模拟方面表现优异。

表 2 LSTM 水库出库流量预测模型模拟结果的评价指标值

Table 2 Evaluation index values of LSTM reservoir outflow prediction model simulation results

数据集	草街电站						亭子口水库					
	LSTM1		LSTM2		LSTM1+LSTM2		LSTM1		LSTM2		LSTM1+LSTM2	
	NSE	$E_T/\%$	NSE	$E_T/\%$	NSE	$E_T/\%$	NSE	$E_T/\%$	NSE	$E_T/\%$	NSE	$E_T/\%$
训练集	0.96	4.54	0.99	3.94	0.98	3.91	0.80	7.98	0.91	4.17	0.85	6.41
验证集	0.96	6.74	0.99	3.64	0.97	4.75	0.78	7.64	0.79	2.27	0.78	3.18
测试集	0.95	8.25	0.99	4.86	0.98	6.74	0.70	7.94	0.78	4.24	0.71	5.39

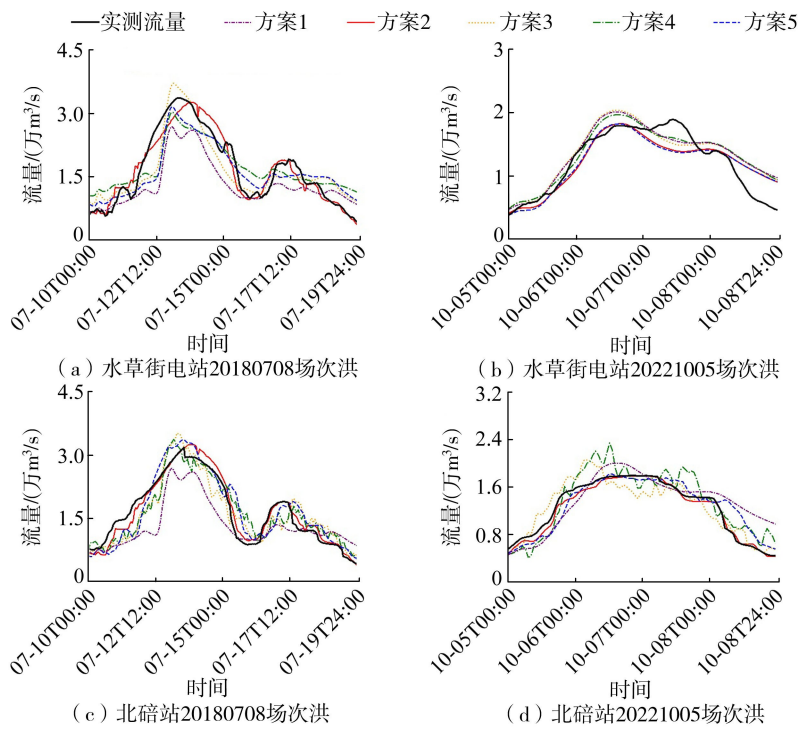


图5 不同方案下入库流量模拟结果与实测流量对比

Fig. 5 Comparison of flow simulation results with measured flow under different scenarios

表3 亭子口水库和草街电站不同方案模拟结果评价指标值

Table 3 Evaluation index values of simulation results for Tingzikou Reservoir and Caojie Hydropower Station under different scenarios

模拟对象	场次洪水	方案	NSE	$E_r/\%$	$R_{EP}/\%$	$\Delta T/h$
草街电站 入库流量	20180708	1	0.55	21.02	20.21	5
		2	0.93	0.38	3.26	11
		3	0.72	1.32	10.31	4
		4	0.73	1.67	9.92	5
		5	0.78	2.94	6.04	5
	20221005	1	0.77	9.65	6.28	20
		2	0.78	1.49	3.53	18
		3	0.75	9.78	7.77	20
		4	0.79	8.35	3.81	19
		5	0.78	2.07	3.66	19
北碚站流量	20180708	1	0.53	19.65	15.64	11
		2	0.96	1.41	2.21	6
		3	0.78	2.62	10.83	6
		4	0.79	0.78	5.96	9
		5	0.81	2.07	5.81	1
	20221005	1	0.59	6.71	11.6	4
		2	0.98	3.12	0.52	1
		3	0.71	0.60	14.48	16
		4	0.72	6.95	30.50	7
		5	0.83	1.51	1.41	7

金溪水文站是位于嘉陵江干流的国家基本水文站,距离下游河口约400 km,位于亭子口水库—草街电站区间的中段,该站的流量过程能够较好地反映区间河段流量变化。图6展示了在不同出库方案条件下,亭子口水库出库过程对金溪水文站流量模拟结果

的影响。结果表明,方案1下NSE值仅为0.50,相对误差达到31%;而在方案5中,对亭子口水库实施智能校正后,模拟NSE值达到0.80以上,相对误差在10%以内,校正后流量过程的精度显著提高。这表明,本文提出的考虑水库影响的洪水预报智能校正方法不仅能够提升上游水库站点出库流量及下游目标站点的模拟精度,还能有效改善下游区间河段的流量过程。

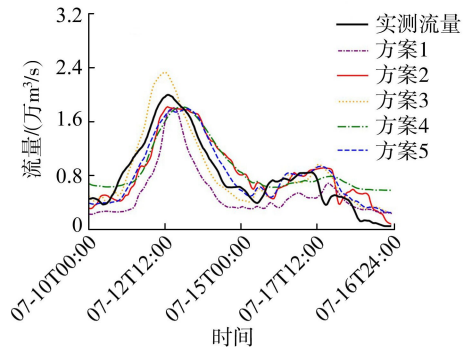


图6 金溪水文站不同方案模拟过程线对比

Fig. 6 Comparison of simulation results at Jinxi Station under different scenarios

## 5 结论

a. 构建了考虑水库影响的洪水预报智能校正框架,包括以VIC分布式水文模型获取流域产汇流过程,采用KNN算法基于历史误差相似性进行多步外延流量校正,引入分层嵌套式LSTM出库流量预测模

型水获得库出库流量。

b. 基于空间分布参数的 VIC 模型在嘉陵江流域多个控制站点均取得了良好的模拟效果,表现出较强的适用性。KNN 算法在短预见期( $\leq 12\text{h}$ )能够显著提升洪水过程模拟的精度,在长预见期条件下亦能保持较好的修正效果。

c. 考虑水库影响的洪水预报智能校正方法显著提升了嘉陵江流域的流量模拟精度。该方法不仅提高了上游水库站点的出库流量和下游目标站点的流量模拟精度,同时对下游区间河段的流量过程亦具有良好的改善效果。相比出入平衡方法和参数化调度规则模拟方法,在亭子口水库—草街电站—北碚序列上 LSTM 出库流量预测方法在刻画水库复杂调度特性方面表现更为优越,能够更准确地提取不同情形下的调度规律,为嘉陵江及长江上游实现梯级水库的预报-调度一体化提供了有力的技术支撑。

## 参考文献:

[1] 康艳,艾慧茹,彭仁娟,等. 基于误差校正融合模型的自适应带宽洪水区间预报[J]. 水资源保护,2025,41(5): 106-114. (Kang Yan, Ai Huiru, Peng Renjuan, et al. Adaptive bandwidth flood interval forecasting based on error-corrected hybrid model [J]. Water Resources Protection,2025,41(5):106-114. (in Chinese))

[2] 金桂中,陈国灿,赵兰兰,等. 基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4): 1-4. (Jin Guizhong, Chen Guocan, Zhao Lanlan, et al. Kalman filter correction technique based on multi-source forecast residuals [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 1-4. (in Chinese))

[3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4):23-29. (in Chinese))

[4] Luo Tangsong, Sun Xiaofeng, Zhou Hailong, et al. A reservoir group flood control operation decision-making risk analysis model considering indicator and weight uncertainties[J]. Water,2025,17(14):2145.

[5] 韩文彪,姚成,李致家,等. 考虑水库泄水影响的逐网格汇流演算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):34-41. (Han Wenbiao, Yao Cheng, Li Zhijia, et al. Routing method of confluence considering the influence of reservoir drainage at grid scale [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 34-41. (in Chinese))

[6] 葛守西. 现代洪水预报技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[7] 黄一听,王钦钊,梁忠民,等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1): 12-35. (Huang Yixin, Wang Qinzhao, Liang Zhongmin, et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 12-35. (in Chinese))

[8] 杨雨蒙,石朋,瞿思敏,等. 不同误差校正方法在衢江流域洪水预报中的应用对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3): 8-14. (Yang Yumeng, Shi Peng, Qu Simin, et al. Application comparison of different error correction methods in flood forecasting in Qujiang River watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3):8-14. (in Chinese))

[9] 张娟,钟平安,徐斌,等. 洪水预报自回归实时校正多步外延方法研究[J]. 水文,2019,39(6):41-45. (Zhang Juan, Zhong Ping'an, Xu Bin, et al. Research on multi-step epitaxy method for auto-regressive real-time correction of flood forecasting [J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(6):41-45. (in Chinese))

[10] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (Zhang Xumin, Qu Simin, Li Qian, et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 88-95. (in Chinese))

[11] 衣学军,汤岭,李致家,等. 基于机器学习的洪水预报实时校正[J]. 水电能源科学,2023,41(12):78-81. (Yi Xuejun, Tang Ling, Li Zhijia, et al. Real-time correction of flood forecasting based on machine learning [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(12):78-81. (in Chinese))

[12] 刘莉,梁霄, Wang Quanjun, 等. 基于深度学习的改进 ERRIS 径流预报实时校正模型[J]. 水资源保护,2024,40(6):155-164. (Liu Li, Liang Xiao, Wang Quanjun, et al. Improved ERRIS model for real-time correction of streamflow forecast based on deep learning [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 155-164. (in Chinese))

[13] 高益辉,钟平安,徐斌,等. 河流系统实时洪水预报误差多点联合校正方法研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):21-26. (Gao Yihui, Zhong Ping'an, Xu Bin, et al. Study on multi-point joint correction method for real-time flood forecasting errors of river systems [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5):21-26. (in Chinese))

[14] 肖杨. 多站点联合校正的实时洪水预报应用:以湖南省沅水五强溪水库为例[J]. 人民长江,2020,51(S1):6-9. (Xiao Yang. Application of multi-point joint correction to

- real-time flood forecasting; case of Wuqiangxi Reservoir on Yuanshui River, Hunan Province [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(S1):6-9. (in Chinese))
- [15] 王俊,程海云,郭生练,等. 智慧流域水文预报技术研究进展与开发前景[J]. *人民长江*, 2023, 54(8):1-8. (Wang Jun, Cheng Haiyun, Guo Shenglian, et al. Research progress and development prospect of hydrological forecasting technology in smart watersheds [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(8):1-8. (in Chinese))
- [16] 汤正阳,张迪,林俊强,等. 基于循环神经网络算法的水库调度模拟[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(5):83-86. (Tang Zhengyang, Zhang Di, Lin Junqiang, et al. Simulating reservoir operation using recurrent neural network algorithm [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(5):83-86. (in Chinese))
- [17] 柯思莹. 基于长短期记忆神经网络的水库调度函数研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
- [18] 张玮,郑雅莲,刘志武,等. 物理机制引导的水库调度深度学习模型研究[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(3):13-25. (Zhang Wei, Zheng Yalian, Liu Zhiwu, et al. Deep learning model guided by physical mechanism for reservoir operation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(3):13-25. (in Chinese))
- [19] 张彪,彭杨,亓心仪,等. 基于深度学习的三峡水库汛期调度规则提取方法[J]. *中国农村水利水电*, 2026(2):99-106. (Zhang Biao, Peng Yang, Qi Xinyi, et al. A method for extracting flood season regulation rules of Three Gorges Reservoir based on deep learning [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2026(2):99-106. (in Chinese))
- [20] Li Haichen, Zhang Shunfu, Li Qing, et al. Research on flash flood disaster warning index; case study of Luoning County [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 218:012075.
- [21] 马昊然,张海荣,李晓阳,等. 基于VIC模型的三峡库区流域小时尺度实时洪水预报[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2):309-318. (Ma Haoran, Zhang Hairong, Li Xiaoyang, et al. Hourly scale real-time flood forecasting in the Three Gorges Reservoir basin based on the VIC model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2):309-318. (in Chinese))
- [22] 舒卫民,李秋平,鲍正风,等. 长江上游水库群调蓄对三峡水库流量预报的影响分析[J]. *水电与新能源*, 2016(5):1-5. (Shu Weimin, Li Qiuping, Bao Zhengfeng, et al. Impact of dispatching of reservoirs in the Upper Yangtze River on inflow forecast of the Three Gorges Reservoir [J]. *Hydropower and New Energy*, 2016(5):1-5. (in Chinese))
- [23] Liang Xu, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification [J]. *Global and Planetary Change*, 1996, 13(1/2/3/4):195-206.
- [24] Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7):14415-14428.
- [25] 吴志勇,张子昀,刘杨合,等. 融合再分析数据与观测降水的金沙江上游径流模拟[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5):205-212. (Wu Zhiyong, Zhang Ziyun, Liu Yanghe, et al. Runoff simulation in upper reaches of the Jinsha River based on fusion of reanalysis data and observed precipitation [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5):205-212. (in Chinese))
- [26] Xu Zhengguang, Wu Zhiyong, Shao Quanxi, et al. A two-step calibration framework for hydrological parameter regionalization based on streamflow and remote sensing evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613:128320.
- [27] Wu Zhiyong, Lu Guihua, Wen Lei, et al. Thirty-five year (1971-2005) simulation of daily soil moisture using the variable infiltration capacity model over China [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2007, 45(1):37-45.
- [28] 刘开磊,姚成,李致家,等. 水动力学模型实时校正方法对比[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2):124-129. (Liu Kailei, Yao Cheng, Li Zhijia, et al. Comparison of real-time correction methods of hydrodynamic model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(2):124-129. (in Chinese))
- [29] 曾雨柔,朱非林,卢庆文,等. 基于汛期运行水位动态控制的水库群多目标防洪风险分析[J]. *水资源保护*, 2026, 42(2):68-77. (Zeng Yurou, Zhu Feilin, Lu Qingwen, et al. Multi-objective flood risk analysis for reservoir systems with dynamic control of flood-limited water levels [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(2):68-77. (in Chinese))
- [30] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6):30-37. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6):30-37. (in Chinese))
- [31] 任康,张睿,黄强. 基于大语言模型的水库群防洪调度规则标准化及特征研究[J]. *水利学报*, 2025, 56(9):1166-1177. (Ren Kang, Zhang Rui, Huang Qiang. Standardization of reservoir groups operating rules and analysis of their characteristics using large language models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(9):1166-1177. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-17 编辑:王芳)