

基于系统响应的马斯京根连续演算误差修正方法

司 伟¹, 黄思琦², 瞿思敏¹, 张永康¹, 程 翔³, 朱彦泽³, 李 昂¹, 郑佳乐¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 杭州市水文水资源监测中心, 浙江 杭州 310016;
3. 国网新源集团有限公司富春江水力发电厂, 浙江 杭州 311504)

摘要: 针对近年来径流式电站、船闸等河道型水利工程持续修建导致传统马斯京根法在新安江模型流域洪水预报应用中精度下降的问题, 引入并改进了系统响应误差修正方法, 提出了基于系统响应的马斯京根连续演算误差修正方法。该方法根据预报断面实测流量和计算流量的差值计算修正比例系数, 将其应用于各河段节点, 对河道汇流初值进行实时动态修正。以受梯级船闸影响的富春江流域主河道为例进行实例分析, 结果表明: 修正后的洪水预报精度明显提高, 修正方法对洪峰的修正效果最好, 对于双峰或多峰洪水, 特别是受水利工程调控影响较大的洪水过程具有显著的修正效果; 传统马斯京根法在加入系统响应误差修正方法后, 可有效降低河道型水利工程对洪水预报中河道汇流演算的影响, 提高流域洪水预报精度, 同时解决了传统系统响应误差修正方法中信息来源与待修正变量之间信息维度不对称的问题。

关键词: 洪水预报; 马斯京根法; 系统响应; 误差修正; 河道汇流演算; 富春江流域

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)05-0089-07

Muskingum continuous routing error correction method based on system response//SI Wei¹, HUANG Siqu², QU Simin¹, ZHANG Yongkang¹, CHENG Xiang³, ZHU Yanze³, LI Ang¹, ZHENG Jiale¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hangzhou Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Hangzhou 310016, China; 3. Fuchunjiang Hydropower Plant of State Grid Xinyuan Group Co., Ltd., Hangzhou 311504, China)

Abstract: The system response error correction method was introduced and improved, and a Muskingum continuous routing error correction method based on system response was proposed to solve problem of the declining accuracy of the traditional Muskingum method in river basin flood forecasting by using the Xin'anjiang model, due to the continuous construction of river channel water conservancy projects such as runoff hydropower stations and ship locks in recent years. A correction coefficient was calculated based on the difference between observed and calculated discharges at the forecast section, and was applied to the nodes of various upstream river sections to conduct real-time dynamic corrections of the initial values of river confluence. Taking the main river channel of the Fuchunjiang Basin, which is affected by cascade ship locks, as a case study, the results show that the flood forecasting accuracy after correction is significantly improved. The correction method has the best correction effect on flood peaks, and it also has a remarkable correction effect on double peak or multi-peak floods, especially on those flood processes greatly affected by water conservancy projects. The traditional Muskingum method, combined with the system response error correction method, can effectively reduce the impact of river channel water conservancy projects on flood forecasting, improve the accuracy of river basin flood forecasting, and solve the problem of asymmetric information dimensions between information sources and variables to be corrected in the traditional system response error correction method.

Key words: flood forecasting; Muskingum method; system response; error correction; river confluence calculation; the Fuchunjiang Basin

近年来,受人类活动影响,大量径流式电站、挡水坝、船闸等河道型水利工程投入建设,这些河道型水利工程的运行改变了天然河道的汇流特点^[1-4],导致不同时期流域的产汇流特性不一致^[5-6],进而降低了洪水预报,尤其是河道汇流阶段的预报精度,因此,在进行流域水文计算和水文预报时必须考虑水

利工程的影响^[7-9]。目前考虑水利工程影响的流域洪水预报方法主要有两种:①基于数理统计的多元回归分析法。该方法通过选取水文气象要素和洪水特征要素进行统计分析,建立回归模型进行洪水预报,将水利工程运行对洪水过程的影响进行简单描述^[10-11]。该方法使用方便,但缺乏物理基础,外延性较差,难以推广应用。②基于水文模型的洪水预报方法。该方法在水文模型中增加考虑水利工程影响的模块,通过设置相关参数量化水利工程的影响^[12-14],在应用时需要较多的水利工程运行数据^[15-16],很难应用于水利工程众多且无相应运行数据的流域。目前已有的方法多针对大型水利工程造成的影响,针对梯级船闸的影响研究较少。

马斯京根法广泛应用在洪水预报中^[17-19]。该算法通过模拟河道洪水的流动过程,实现对河道洪水的预测。然而,由于船闸等河道型水利工程对河道洪水演算具有显著影响,导致传统马斯京根法在实时洪水演算中的应用效果不佳。包为民等^[20]提出的系统响应误差修正方法是一种灰色系统反演修正方法,其在处理非线性时变系统方面具有独特的优势,通过对系统输入与输出之间关系的动态调整,能够有效修正预报误差,提升预报精度。目前,系统响应误差修正方法在新安江模型^[21-22]、VIC(variable infiltration capacity)模型^[23]、SWAT(soil and water assessment tool)模型^[24]、暴雨强度公式的参数优化^[25]中取得了较好的结果,在降雨反演修正^[26]、中间变量反演修正^[27-28]以及初始土壤含水量反演修正^[29]等方面也有较多应用。将系统响应关系应用于洪水预报误差修正研究具有物理基础强、不增加参数、不损失预见期等优点^[30-31]。

鉴于此,本文引入系统响应误差修正方法,提出基于系统响应的马斯京根连续演算误差修正方法。该方法根据预报断面实测流量和计算流量的差值计算修正比例系数,将其应用到上游各河段节点以修正河道汇流初值,并将单一系列的误差信息用于修正多个河段流量初始状态值,达到实时动态的修正效果,从而提高洪水预报精度,为流域防洪减灾提供有力支持。

1 研究方法

1.1 新安江模型

本文采用的水文模型为新安江模型,其广泛应用在湿润和半湿润地区的洪水预报中。新安江模型主要包含4个计算模块:①蒸散发计算采用3层蒸散发模型;②产流计算采用蓄满产流模型;③分水源计算采用自由水蓄水箱结构划分地表径流、壤中流

和地下径流;④汇流计算中先计算坡地汇流,再计算河道汇流,地表径流、壤中流、地下径流的坡地汇流均采用线性水库计算方法,河道汇流采用马斯京根法进行分段连续流量演算。将研究区域根据雨量站点划分为若干个子单元,每个子单元单独进行产流和坡地汇流计算。经过坡地汇流后的单元总径流过程在各子单元对应的河道节点处以集中入流的方式汇入河道,采用马斯京根法对所有子单元通过边演边合的分段连续流量演算得到最终预报断面的流量过程。对于河道地形复杂、缺少全流域完整上游河道地形资料的研究区域,无法构建水动力学模型。本文采用水文学方法提高此类流域实时洪水预报精度,通过基于系统响应的马斯京根连续演算误差修正方法,解决此类复杂河道汇流情况下的流域洪水预报问题。

1.2 马斯京根连续演算误差修正方法

单河段马斯京根法表达式为

$$Q_{下,t} = C_0 Q_{上,t} + C_1 Q_{上,t-1} + C_2 Q_{下,t-1} \quad (1)$$

式中: $Q_{下,t}$ 为要推求的下断面出流量; $Q_{上,t-1}$ 、 $Q_{下,t-1}$ 分别为 $t-1$ 时刻河道上、下断面初始流量; $Q_{上,t}$ 为当前时刻上断面入流量,即坡面汇流后的河道入流过程; C_0 、 C_1 、 C_2 为由马斯京根河段汇流传播时间(KE)、马斯京根河段流量比重系数(XE)和计算时段 Δt 计算得出的参数, $C_0+C_1+C_2=1$ 。

将式(1)概化为

$$Q_{下,t} = M(Q_{上,t}, X_{t-1}, \theta) \quad (2)$$

式中: X_{t-1} 为初始状态值向量,即河道上、下断面初始流量; θ 为马斯京根参数KE和XE。

在实际洪水预报中,常采用分段马斯京根法,设流域河段数为 N ,则第 i ($i=1,2,\dots,N$)个河段下断面出流过程为

$$Q_{下,i,t} = M(Q_{上,i,t}, X_{i,t-1}, \theta) \quad (3)$$

式中: $Q_{上,i,t}$ 为当前时刻第 i 个河段上断面入流量; $X_{i,t-1}$ 为第 i 个河段初始状态值。

为解决实际问题,便于预报模型程序实现,本文将马斯京根参数设置为不随河段变化。但每个相邻断面节点均有不同子单元的产汇流过程汇入,因此,每个河段上、下断面初始流量值均不相同。由于马斯京根河道流量初始值对于河道汇流结果影响显著,本文通过实时修正河道初始流量值以减小船闸等水利工程对于汇流计算精度的影响,进而提高断面洪水预报精度。

将预报模型中马斯京根连续演算模块概化为系统,利用马斯京根法计算的流量序列 Q_c 与实测流量序列 Q_o 之间的误差 ΔQ 对马斯京根河道流量初始值进行修正。根据系统响应误差修正方法的原

理,通过构造待修正变量 V 与 ΔQ 之间的响应关系,求解得到 V 的修正量 $\Delta V'$:

$$\Delta V' = (U^T U)^{-1} U^T (Q_o - Q_c) \tag{4}$$

式中 U 为修正变量的系统响应矩阵。

修正后的变量 V' 为

$$V' = V + \Delta V' \tag{5}$$

将修正后的变量 V' 代入模型重新计算 Q_c 。序列,便可达到实时修正的效果。本文中待修正变量为 N 个河段的马斯京根河道演算初始流量 X_{t-1} :

$$X_{t-1} = \begin{pmatrix} Q_{上1,t-1} & Q_{下1,t-1} \\ \vdots & \vdots \\ Q_{上N,t-1} & Q_{下N,t-1} \end{pmatrix} \tag{6}$$

用于误差修正的信息来源 ΔQ_{t-1} 为一维向量,与 ΔX_{t-1} 的矩阵维度不一致,无法通过矩阵运算求解得到河段初始流量的估计值 Q'_{t-1} 。因此对系统响应误差修正方法进行改进,通过当前时刻实测流量 Q_{ot} 和计算流量 Q_{ct} 的偏差 ΔQ_t ,计算出修正比例系数 β_t (式(7)),并将其应用于各河段初始状态变量的修正,然后重新进行马斯京根连续演算,得到修正后的断面预报结果。

$$\beta_t = \Delta Q_t / Q_{ot} = (Q_{ot} - Q_{ct}) / Q_{ot} \tag{7}$$

本文方法仅根据预报断面当前时刻实测流量和计算流量的差值计算修正比例系数,并将其应用到上游各河段节点,以达到实时动态的修正效果,解决了传统系统响应误差修正方法中信息来源和待修正变量之间维度不对称的问题。修正后的 X'_{t-1} 可以表示为

$$X'_{t-1} = X_{t-1} + \Delta X_{t-1} = (I + \beta_t) \begin{pmatrix} Q_{上1,t-1} & Q_{下1,t-1} \\ \vdots & \vdots \\ Q_{上N,t-1} & Q_{下N,t-1} \end{pmatrix} \tag{8}$$

式中 I 为单位矩阵。

将 X'_{t-1} 重新代入预报模型中马斯京根河道连续演算模块,计算流域出口断面修正后的预报流量,表达式为

$$Q_{Fi,t} = M[Q_{上i,t}, (I + \beta_t) X_{i,t-1}, \theta] \tag{9}$$

2 实例分析

2.1 研究区概况

富春江流域位于浙江省中西部,地理位置为 $28^{\circ}15'N \sim 29^{\circ}46'N$ 、 $118^{\circ}03'E \sim 120^{\circ}40'E$,处于钱塘江中上游,流域地形自西向东倾斜,地貌特征多样,以山地为主。西部山区雨量充沛,年降水日数多,而东部平原地带降水相对较少^[32]。富春江水库尾水的入库控制站兰溪水文站到上游衢江大桥断面间河道长度约 85 km,河道内有对洪水汇流过程影响较

大的梯级船闸 6 座,如图 1 所示。河道中上游区域条件复杂,低水时河道分叉较多,河漫滩较宽,浅滩和洲岛较为普遍。船闸通过挡水提高河道水深以保障载重船只通行,作为典型的河道型水利工程,其调节能力有限,且存在不规律的蓄放水操作,这些因素会对洪水在河道中的传播速度和洪峰大小产生显著影响,从而改变流域内天然河道的汇流特性。流域内河流坡降从上游至下游逐渐减缓,上游流速较快,下游流速慢,因地势平缓,受钱塘江潮汐影响较大。富春江流域属于亚热带季风气候,雨量丰沛,降雨主要集中在 3—10 月,流域 1970—2022 年多年平均降水量为 1 625 mm,多年平均径流深为 907 mm,年平均径流系数为 0.56。富春江流域土壤孔隙较大,下渗能力较强,三水源新安江模型适用于该流域实时洪水预报。

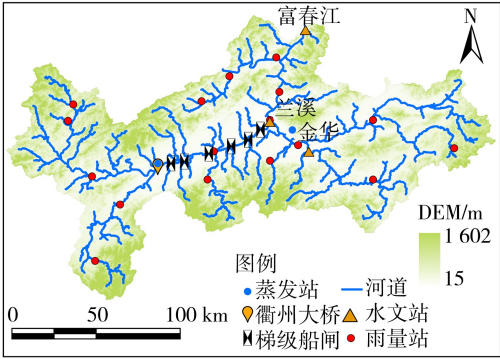


图 1 富春江流域概况

Fig. 1 Overview of the Fuchunjiang Basin

2.2 数据来源

数据资料主要包括水文资料和气象资料。水文资料包括富春江水库、兰溪水文站和金华水文站 2013—2023 年的实测流量;气象资料包括降雨和蒸散发资料,降雨资料收集了富春江水库、兰溪水文站和金华水文站 2013—2023 年的实测降水量数据,蒸散发资料收集了衢州蒸发站和金华蒸发站 2013—2023 年的逐日蒸散发数据。这些资料共同用于构建新安江模型。

2.3 结果与分析

为了明确水利工程对洪水预报结果的影响,采用新安江模型分别对富春江流域、兰溪水文站以上流域(以下简称“兰溪流域”)和金华水文站以上流域(以下简称“金华流域”)3 个不同区域进行洪水模拟,计算时段取 1 h。富春江流域和兰溪流域洪水过程受水利工程影响较大,而金华流域受水利工程影响较小,因此,仅对富春江流域和兰溪流域洪水模拟结果进行误差修正。选取典型洪水过程 40 场,洪水场次均匀覆盖不同量级。富春江流域的 40 场洪水中单峰洪水 26 场,双峰洪水 9 场,多峰洪水 5 场,

最大洪峰出现在 20200629 号洪水,洪峰流量为 16 300 m³/s,最小洪峰出现在 20180304 号洪水,洪峰流量为 3 820 m³/s;兰溪流域的 40 场洪水中单峰洪水 26 场,双峰洪水 9 场,多峰洪水 5 场,最大洪峰出现在 20170621 号洪水,洪峰流量为 14 000 m³/s,最小洪峰出现在 20180304 号洪水,洪峰流量为 2 370 m³/s;金华流域的 40 场洪水中单峰洪水 27 场,双峰洪水 6 场,多峰洪水 7 场,最大洪峰出现在 20140619 号洪水,洪峰流量为 4 370 m³/s,最小洪峰出现在 20130606 号洪水,洪峰流量为 614 m³/s。其中,2013—2018 年 25 场洪水数据用于模型率定,利用人机交互方法率定出最优参数,2019—2023 年 15 场洪水数据用于模型验证。采用马斯京根连续演算误差修正后的新安江模型分别对两个区域进行洪水模拟。采用纳什效率系数(NSE)、洪峰平均相对误差(PMRE)、径流深平均相对误差(RMRE)以及峰现时间误差(ΔT)作为模拟结果的评价指标。

2.3.1 新安江模型模拟结果

富春江流域、兰溪流域和金华流域的新安江模型参数见表 1。

表 1 新安江模型参数

Table 1 Parameters of Xin'anjiang model

流域	K	B	C	SM/mm
富春江流域	1.1	0.3	0.16	18
兰溪流域	1.1	0.3	0.16	20
金华流域	0.9	0.34	0.16	20
流域	EX	KI	KG	CS
富春江流域	1.5	0.30	0.40	0.80
兰溪流域	1.5	0.35	0.35	0.66
金华流域	1.5	0.31	0.39	0.66
流域	CI	CG	KE/h	XE
富春江流域	0.93	0.997	0.8	0.38
兰溪流域	0.90	0.997	1.0	0.19
金华流域	0.90	0.997	3.0	0.18
流域	WM/mm	WUM/mm	WLM/mm	IMP
富春江流域	150	20	80	0.001
兰溪流域	150	20	80	0.001
金华流域	150	20	80	0.001

注: K 为蒸发折算系数; B 为流域蓄水容量分布曲线指数; C 为深层蒸发扩散系数;SM 为流域自由平均蓄水容量;EX 为流域自由水分布曲线指数;KI 为自由水箱壤中流出流系数;KG 为自由水箱地下水出流系数;CS 为地表径流线性水库汇流系数;CI 为壤中流线性水库汇流系数;CG 为地下径流线性水库汇流系数;WM 为流域张力水平均蓄水容量;WUM 为流域上层张力水蓄水容量;WLM 为流域下层张力水蓄水容量;IMP 为不透水面积在全流域面积中的占比。

表 2 为率定期和验证期新安江模型对富春江流域、兰溪流域和金华流域洪水模拟的评价结果。3 个流域的 NSE 均值均大于 0.6,富春江流域和兰溪流域的 NSE 均值低于金华流域,说明水利工程一

定程度上影响了新安江模型的模拟效果。富春江流域验证期 PMRE 均值为 16.88%,兰溪流域验证期 RMRE 均值为 16.89%,误差较大,需要进行相应的修正。

表 2 新安江模型洪水模拟评价结果

Table 2 Evaluation results of flood simulation by Xin'anjiang model

流域	时期	NSE 均值	RMRE 均值/%	PMRE 均值/%	ΔT 均值/h
富春江流域	率定期	0.60	6.44	17.20	4.64
	验证期	0.61	4.83	16.88	5.60
	平均	0.61	5.83	17.07	5.00
兰溪流域	率定期	0.78	7.75	11.17	3.92
	验证期	0.66	16.89	11.21	3.40
	平均	0.74	11.18	11.18	3.72
金华流域	率定期	0.78	5.70	12.64	3.00
	验证期	0.75	4.91	10.25	3.80
	平均	0.77	5.40	11.01	3.30

2.3.2 流域洪水修正效果分析

表 3 为修正后的新安江模型对富春江流域和兰溪流域洪水模拟的评价结果,修正前后新安江模型参数不变。修正后富春江流域、兰溪流域的 NSE 均值分别增加了 0.12 和 0.19,RMRE 均值分别降低了 4.15% 和 6.14%,PMRE 均值分别降低了 8.01% 和 8.48%; ΔT 均值分别降低了 1.52 h 和 2.60 h,总体来说,两个流域的模拟效果均有所提高,兰溪流域比富春江流域修正效果更好,其主要原因是富春江出口断面处为水库,其实测流量过程线存在较严重的锯齿状波动误差,模拟效果会因此受到影响。

表 3 修正后新安江模型洪水模拟评价结果

Table 3 Evaluation results of flood simulation by Xin'anjiang model after correction

流域	NSE 均值	RMRE 均值/%	PMRE 均值/%	ΔT 均值/h
富春江流域	0.73	1.68	9.06	3.48
兰溪流域	0.93	5.04	2.70	1.12

从图 2 以看出,对富春江流域和兰溪流域洪水模拟结果修正后,NSE 的均值和中位线都明显上升;修正后 RMRE、PMRE、 ΔT 的均值和中位数都明显下降,其箱形图的区间也变得更小,表明修正后新安江模型对径流深和洪峰的拟合效果更好。图 3 则更直观地显示了修正方法的效果,修正后的结果更集中在 1:1 线周围,与修正前相比,计算值与实测值更加接近,异常值明显减少。

2.3.3 典型洪水修正效果分析

为了深入分析修正方法对于预报洪水过程的修正效果,对典型洪水场次实测流量与修正前后的模拟流量过程进行对比,结果如图 4 所示。富春江流域 20210517 号洪水修正前模拟结果的 NSE、

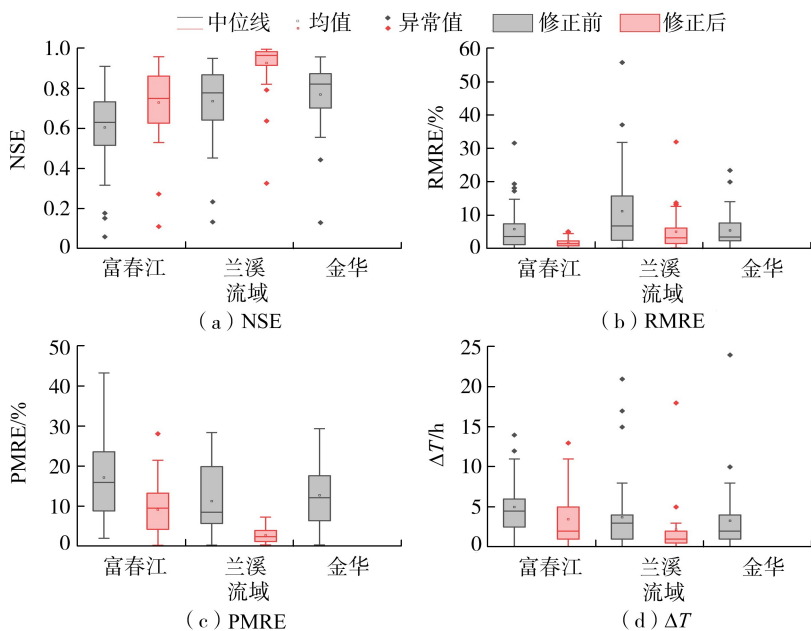


图 2 修正前后洪水模拟结果各评价指标箱形图

Fig. 2 Box plots of various evaluation indicators for simulation results of flood events before and after correction

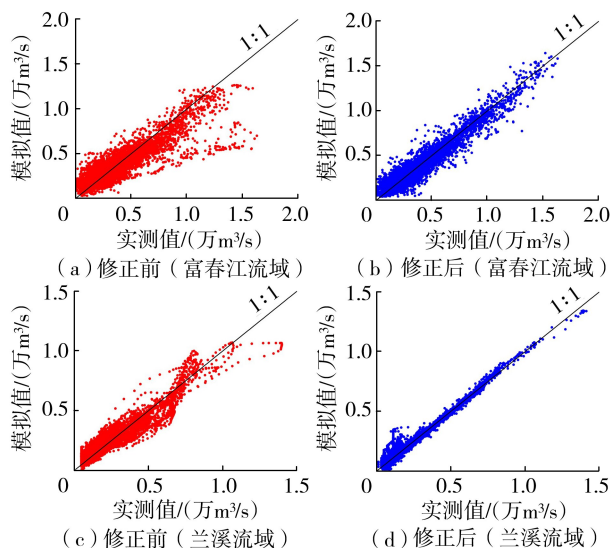


图 3 修正前后洪水模拟值和实测值分布散点图

Fig. 3 Scatter plots of measured flow and simulated flow before and after correction

RMRE、PMRE 和 ΔT 分别为 0.64、0.09%、19.80% 和 14 h,修正后模拟结果的 NSE、RMRE、PMRE 和 ΔT 分别为 0.84、1.78%、1.25% 和 6 h;兰溪流域 20190326 号洪水修正前模拟结果的 NSE、RMRE、PMRE 和 ΔT 分别为 0.70、18.66%、8.36% 和 2 h,修正后模拟结果的 NSE、RMRE、PMRE 和 ΔT 分别为 0.86、8.51%、2.49% 和 0。结果表明,修正后的结果更加符合实际情况,尤其是对洪峰的修正,修正后的峰现时间与实际值基本一致。同时对于双峰或多峰洪水,特别是降雨过程空间分布极不均匀且暴雨中心在水利工程上游、受水利工程调控运行影响较大的洪水过程,修正效果也较为显著,修正后模拟流量

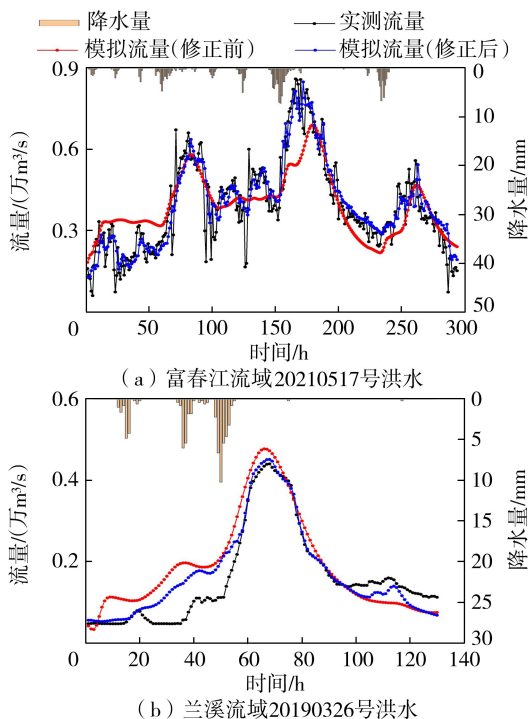


图 4 典型洪水场次实测流量与修正前后的模拟流量

Fig. 4 Measured flow and simulated flow for typical flood events before and after correction

的整体波动与实际过程一致。

3 结 论

a. 本文将系统响应误差修正方法与马斯京根法相结合,通过改进系统响应误差修正方法,计算误差修正比例系数,对马斯京根河道演算初始流量值进行修正,解决了修正信息系列和待修正变量系列之间维度不对称的问题,实现将单一系列的误差信

息用于多个河段流量初始状态值的修正。

b. 富春江流域和兰溪流域洪水过程受水利工程影响较大,采用本文提出的方法进行修正后,富春江流域洪水模拟结果的 NSE 均值提高了 0.12, PMRE 均值降低了 8.01%,兰溪流域洪水模拟结果的 NSE 均值提高了 0.19, PMRE 均值降低了 8.48%,修正方法对于洪量和峰现时差的修正也表现良好。

c. 提出的基于系统响应的马斯京根连续演算误差修正方法,可有效降低河道内连续挡水建筑物、梯级电站、船闸等河道型水利工程对洪水预报中河道汇流演算的影响,提高受此类水利工程影响的流域洪水预报精度。

参考文献:

[1] 胡安焱,张自英,王菊翠. 水利工程对汉江中下游水文生态的影响[J]. 水资源保护,2010,26(2):5-9. (HU Anyan,ZHANG Ziying,WANG Jucui. Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. Water Resources Protection,2010,26(2):5-9. (in Chinese))

[2] BRATH A, MONTANARI A, MORETTI G. Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty)[J]. Journal of Hydrology,2006,324(1/2/3/4):141-153.

[3] KEZER K, MATSUYAMA H. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash Basin in central Asia[J]. Hydrological Processes,2006,20(6):1407-1423.

[4] 王乐扬,张建云,宁忠瑞,等. 环境变化对澜沧江出境水文过程变异的影响[J]. 水科学进展,2024,35(2):313-324. (WANG Yueyang,ZHANG Jianyun,NING Zhongrui, et al. Impact of environmental changes on variability of outlet hydrological process of the Lancang River Basin [J]. Advances in Water Science,2024,35(2):313-324. (in Chinese))

[5] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(2):278-285. (DONG Leihua,XIONG Lihua,YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science,2012,23(2):278-285. (in Chinese))

[6] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790. (SONG Xiaomeng,ZHANG Jianyun,ZHAN Chesheng,et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779-790. (in Chinese))

[7] WANG G S, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a

monthly water balance model:a case study of the Chaobai River Basin in northern China [J]. Water Resources Research,2009,45(7):W00A11.

[8] SCHREIDER S Y, JAKEMAN A J, LETCHER R A, et al. Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray-Darling Basin, Australia [J]. Journal of Hydrology,2002,262(1/2/3/4):84-98.

[9] 王宗志,程亮,王银堂,等. 高强度人类活动作用下考虑河道下渗的河网洪水模拟[J]. 水利学报,2015,46(4):414-424. (WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. Modelling the flood behavior in a river network considering the streambed infiltration and its application in Haihe River Basin of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(4):414-424. (in Chinese)).

[10] DEITCH M J, MERENLENDER A M, FEIRER S. Cumulative effects of small reservoirs on streamflow in northern coastal California catchments [J]. Water Resources Management,2013,27(15):5101-5118.

[11] 宋润虎. 多元线性回归与逐步回归在洪水预报中的应用:以南汀河中后期洪水预报为例[J]. 人民长江,2012,43(增刊1):122-125. (SONG Runhu. Application of multiple linear regression and stepwise regression in flood forecasting:a case study of medium and long-term flood forecasting of Nanting River [J]. Yangtze River,2012,43(Sup1):122-125. (in Chinese))

[12] 张露. 柴河水库洪水预报及防洪调度方式研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.

[13] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on grid-Xin' anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))

[14] DUGDALE S J, ST-HILAIRE A, CURRY R A. Automating drainage direction and physiographic inputs to the CEQUEAU hydrological model: sensitivity testing on the lower Saint John River Watershed, Canada [J]. Journal of Hydroinformatics,2017,19(3):469-492.

[15] 郭军峰,冯平. 流域下垫面变化对水库防洪风险率的影响[J]. 水力发电学报,2016,35(3):56-65. (GUO Junfeng,FENG Ping. Impact of underlying surface changes on risk rate of reservoir flood control [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(3):56-65. (in Chinese))

[16] 郭生练,王金星,彭辉,等. 考虑人类活动影响的丰满水库洪水预报方案[J]. 水电能源科学,2000,18(2):14-17. (GUO Shenglian,WANG Jinxing,PENG Hui, et al. A flood forecast model taking into account the human activity

- impact [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000,18(2):14-17. (in Chinese))
- [17] 沈晓东,王腊春,谢顺平. 基于栅格数据的流域降雨径流模型[J]. 地理学报,1995,50(3):264-271. (SHEN Xiaodong, WANG Nachun, XIE Shunping. A dynamic precipitation-runoff model for a watershed based on grid data[J]. Acta Geographica Sinica,1995,50(3):264-271. (in Chinese))
- [18] HUANG Y X,LIANG Z M,SINGH V P, et al. A coupled dynamic system inversion model for higher accuracy in flood forecasting[J]. Water Resources Research,2022,58(2):e2021WR030531.
- [19] 石朋,樊鑫洋,陈干琴,等. 基于马斯京根法的区间洪水推求方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):1-7. (SHI Peng, FAN Xinyang, CHEN Ganqin, et al. An inter-basin flood calculation method based on Muskingum routing method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 1-7. (in Chinese))
- [20] 包为民,阙家骏,赖善证,等. 洪水预报自由水蓄量动态系统响应修正方法[J]. 水科学进展,2015,26(3):365-371. (BAO Weimin, QUE Jiajun, LAI Shanzheng, et al. Free-water storage error correction based on dynamic system response in flood forecasting [J]. Advances in Water Science,2015,26(3):365-371. (in Chinese))
- [21] 赵建华,臧力永,施韶晖. 基于岭估计的系统微分响应模型率定与应用[J]. 河南水利与南水北调,2022,51(6):37-38. (ZHAO Jianhua, ZANG Liyong, SHI Shaohui. Calibration and application of ridge estimate-system differential response model [J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion,2022,51(6):37-38. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 孙苗苗,石朋,瞿思敏,等. VIC 模型系统微分响应参数率定方法在大坡岭流域的应用[J]. 中国农村水利水电,2021(12):122-128. (SUN Miaomiao, SHI Peng, QU Simin, et al. Application of the system response parameter calibration method for VIC model in Dapoling Catchment [J]. China Rural Water and Hydropower,2021(12):122-128. (in Chinese))
- [24] 瞿思敏,杨庆一,郑何声园,等. 系统微分响应参数率定方法在建阳流域 SWAT 模型中的应用[J]. 水资源保护,2023,39(2):118-124. (QU Simin, YANG Qingyi, ZHENG Heshengyuan, et al. Application of system differential response parameter calibration method in SWAT model of Jianyang Basin [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):118-124. (in Chinese))
- [25] 李琼芳,许树洪,周正模,等. 基于系统微分响应的暴雨强度公式参数优化[J]. 水资源保护,2022,38(5):8-16. (LI Qiongfang, XU Shuhong, ZHOU Zhengmo, et al. Parameter optimization of rainstorm intensity formula based on system differential response method [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):8-16. (in Chinese))
- [26] 司伟,包为民,瞿思敏,等. 基于面平均雨量误差修正的实时洪水预报修正方法[J]. 湖泊科学,2018,30(2):533-541. (SI Wei, BAO Weimin, QU Simin, et al. Real-time flood forecast updating method based on mean areal rainfall error correction [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(2):533-541. (in Chinese))
- [27] SI W,BAO W M,GUPTA H V. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method [J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5128-5144.
- [28] 瞿思敏,陆威村,蒋思军,等. 洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法[J]. 水资源保护,2025,41(2):88-94. (QU Simin, LU Weicun, JIANG Sijun, et al. Proportional coefficient system response error correction method for flood forecasting [J]. Water Resources Protection,2025,41(2):88-94. (in Chinese))
- [29] 包为民,孙逸群,周俊伟,等. 基于总体最小二乘法的系统响应修正方法[J]. 水利学报,2017,48(5):560-567. (BAO Weimin, SUN Yiqun, ZHOU Junwei, et al. A new version of system response method for error correction based on total least squares [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(5):560-567. (in Chinese))
- [30] 包为民,司伟,沈国华,等. 基于单位线反演的产流误差修正[J]. 水科学进展,2012,23(3):317-322. (BAO Weimin, SI Wei, SHEN Guohua, et al. Runoff error updating based on unit hydrograph inversion [J]. Advances in Water Science,2012,23(3):317-322. (in Chinese))
- [31] ZHANG X Q, BAO W M, SUN Y Q. Enhancing the hydrologic system differential response method for flood forecasting correction [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592:125793.
- [32] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (SI Wei, HUANG Siqi, WANG Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-09 编辑:施业)