

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.001

基于马斯京根法的区间洪水推求方法

石 朋^{1,2}, 樊鑫洋¹, 陈干琴³, 季 好³, 高 伟⁴, 瞿思敏¹, 杨文晶⁵

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 山东省水文中心, 山东 济南 250014; 4. 山东省水文计量检定中心, 山东 济南 250014;
5. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215004)

摘要: 针对马斯京根法的蓄量系数 K 和楔蓄系数 X 在流域上游有水库控制时难以通过实测资料率定的问题, 通过建立 K 、 X 与河道水力特征间的关系估算 K 、 X , 并采用马斯京根法将上游来水演算到下游, 用下游洪水扣除上游演算到下游的洪水得到区间洪水。沭河流域青峰岭水库、小仕阳水库至莒县区间洪水的实例推求结果表明: 基于马斯京根法的区间洪水推求方法与新安江模型法推求的区间洪水过程差别较小, 但前者进行参数估计时可考虑不同来水河段水力特征的差异。

关键词: 马斯京根法; 区间洪水; 水利工程影响; 新安江模型

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0001-07

An inter-basin flood calculation method based on Muskingum routing method

SHI Peng^{1,2}, FAN Xinyang¹, CHEN Ganqin³, JI Yu³, GAO Wei⁴, QU Simin¹, YANG Wenjing⁵

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Shandong Hydrological Center, Jinan 250014, China;

4. Shandong Hydrological Measurement and Testing Center, Jinan 250014, China;

5. Suzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215004, China)

Abstract: When there is reservoir control in the upstream of the watershed, the storage coefficient K and weighting coefficient X of the Muskingum method are difficult to calibrate through measured data. To estimating K and X , a relationship between the K and X and physical characteristics of the river channel is established. Then, the Muskingum method is used to derive the inter-basin flood by routing the upstream inflow to the downstream, and subtracting the upstream routed flood from the downstream flood to obtain the inter-basin flood. The example of inter-basin flood calculation from Qingfengling Reservoir, Xiaoshiyang Reservoir to Juxian in the Shuhe River Basin shows that the difference between the inter-basin flood calculation method based on the Muskingum method and the Xin'anjiang model is minor, but the former method can consider the differences in hydraulic characteristics of different river sections for parameter estimation.

Key words: Muskingum routing method; inter-basin flood; impact of water conservancy projects; Xin'anjiang model

根据流域拓扑结构, 流域可分为源头型、区间型。源头型流域的洪水完全由流域上的降雨经过产汇流过程产生; 区间型流域的洪水由上游来水和区间洪水组成。区间洪水指降雨降落在上下游断面之间的区间流域, 经过产汇流过程汇集到出口断面的洪水, 区间洪水过程无法直接测得, 需通过上下游水文站监测资料计算得到。

区间洪水的推求对于中小流域的产汇流规律分析、设计洪水的计算等至关重要。如, 区间流域上 API 模型参数的率定、推理公式和地区经验公式的参数计算都需要采用较为精确的区间洪水资料^[1-3]。通过推求的区间洪水, 可以率定区间流域的水文模型参数, 探讨流域产汇流规律, 并进行参数移植和参数区域规律研究。当区间上游有水库或其他有调蓄作用的水工建筑物时, 常用的区间洪水推求方法是用下游洪水扣除上游水

作者简介: 石朋(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: ship@hhu.edu.cn

通信作者: 陈干琴(1977—), 女, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: ganqinchen@163.com

引用本文: 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.

库下泄洪水得到区间洪水(以下简称直接扣除法)。直接扣除法忽略了河道的调蓄作用,忽略了洪水在河道中的推移和坦化过程,在实际运用时效果不佳。为考虑洪水在河道中的推移与坦化过程,需要进行河道洪水演算。马斯京根法是河道洪水演算中一个经典的水文学方法,自提出以来,已被广泛应用于实践中^[4-8]。使用马斯京根法进行河道洪水演算的关键是蓄量系数 K 和楔蓄系数 X 的确定。目前用来确定 K 和 X 的方法^[9-14]大部分都需要采用历史实测资料进行率定或者计算,当河段上游受到水库调节时,无法直接通过上下游断面流量资料率定区间河段的 K 、 X 。

针对直接扣除法推求出的区间洪水精度较差的问题,本文引入马斯京根法进行河道演算,提出一种基于马斯京根法的区间洪水推求方法。针对流域上游有水库控制时无法直接率定区间河段马斯京根法参数的问题,本文通过建立 K 、 X 与河道水力特征的关系来估算马斯京根法参数,以期为上流受到水利工程影响时区间洪水的推求提供参考。

1 研究方法

本文研究思路如下:①由于流域上游存在两个水库,上游来水受水库调节,无法直接通过上下游断面流量资料率定区间河段马斯京根法的参数,在研究流域构建新安江模型,通过新安江模型的模拟可将区间洪水过程和上游来水过程剥离开,得到新安江模型计算出的区间洪水。②通过推导建立 K 、 X 与河道水力特征的关系,并计算得到参数 K 、 X (以下简称参数估算法)。利用参数估算法得到的参数将上游来水运用马斯京根法演算到流域出口断面,用出口断面洪水过程扣除此过程即为推求得到的区间洪水。③将参数估算法得到的区间洪水与新安江模型推求出的区间洪水进行比较分析,评价参数估算法的适用性。

1.1 新安江模型

新安江模型是典型的概念性水文模型,是目前国内洪水预报中应用最广泛的水文模型。新安江模型根据降水和下垫面特征将流域划分为若干个子单元,对每个子单元进行产汇流计算,得到各子单元的出流过程,最后将其演算到出口断面并进行叠加,得到整个流域的出流过程。模型由4个计算模块组成:蒸散发计算模块、产流计算模块、分水源计算模块和汇流计算模块。在模型实际运用时,最重要的是模型参数的率定。

本文采用 SCE-UA 算法对新安江模型的参数进行率定。SCE-UA 算法^[15]综合了确定性搜索、随机搜索和生物竞争进化等方法的优点,引入种群概念,在参数可行域中引入随机分布的点群,将这些点群分成若干个复合形,复合形点在可行域内随机生成和竞争演化。该算法由于可以有效搜索到水文模型参数全局最优解,并能解决高维参数的全局优化问题,被认为是流域水文模型参数优选最有效的方法之一,在国内外流域水文模型参数优选中得到广泛应用。

当使用优化算法对水文模型进行参数率定时,不同的目标函数往往会取得不同的结果,根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》中的精度评定指标,选择洪量相对误差(控制洪水总量)、洪峰相对误差(控制洪峰流量)、峰现时差及确定性系数(控制模拟洪水过程与实测洪水过程的拟合程度)作为评定指标,采用综合误差系数方法建立目标函数进行参数率定^[16]。

1.2 马斯京根法及其参数估算法

1.2.1 马斯京根法

马斯京根法由水量平衡方程和槽蓄方程组成:

$$dW/dt = I - Q \quad (1)$$

$$W = K[XI + (1 - X)Q] \quad (2)$$

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1 \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad C_0 = \frac{0.5\Delta t - KX}{0.5\Delta t + K - KX} \quad C_1 = \frac{0.5\Delta t + KX}{0.5\Delta t + K - KX} \quad C_2 = \frac{-0.5\Delta t + K - KX}{0.5\Delta t + K - KX}$$

式中: W 为河段槽蓄量; I 为上断面流量; Q 为下断面流量; I_1 、 I_2 分别为时段始、末上断面流量; Q_1 、 Q_2 分别为时段始、末下断面流量; Δt 为计算时段。

1.2.2 K 和 X 的估算

K 的物理意义为洪水波传播时间:

$$K = L/3600v_w \quad (4)$$

式中: L 为河长; v_w 为洪水波波速。

根据不同的河道形状, v_w 可由平均流速 v_{av} 估算^[17]:

$$v_w = \lambda v_{av} \quad (5)$$

其中

$$v_{av} = Q_0/A = R^{2/3} \sqrt{S}/n$$

式中: λ 为河道断面的形状系数,矩形、三角形和抛物线形河道断面分别取5/3、4/3和13/9; Q_0 为 v_{av} 对应的特征流量; A 为河道断面面积; R 为水力半径; S 为河道比降; n 为糙率。

将公式 $R=A/P$ (P 为湿周)代入 v_{av} 表达式,消去 A ,可得:

$$R = (nQ_0/P\sqrt{S})^{3/5} \quad (6)$$

其中

$$P = c\sqrt{Q_0}^{[18]} \quad Q_0 = Q_{\min} + 0.5(Q_{\max} - Q_{\min})^{[19]}$$

式中: c 为转化系数,介于4.71~4.81之间; $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$ 分别为河道流量的最小值和最大值。

将式(5)(6)代入式(4),可得 K 的估算公式:

$$K = Lc^{2/5} n^{3/5} / 3600 \lambda Q_0^{1/5} S^{3/10} \quad (7)$$

对于不同的河道形状,将 λ 代入得:

$$K = \begin{cases} 0.6Lc^{2/5} n^{3/5} / 3600 Q_0^{1/5} S^{3/10} & \text{矩形} \\ 0.75Lc^{2/5} n^{3/5} / 3600 Q_0^{1/5} S^{3/10} & \text{三角形} \\ 0.69Lc^{2/5} n^{3/5} / 3600 Q_0^{1/5} S^{3/10} & \text{抛物线形} \end{cases} \quad (8)$$

X 反映了河流的调蓄作用,Cunge^[20]发现并推导出了 X 与河道水力特征的关系式:

$$X = 1/2 - Q_0/2SPv_w L \quad (9)$$

将 v_w 、 R 、 P 代入,可得 X 的估算公式:

$$X = 1/2 - Q_0^{3/10} n^{3/5} / 2\lambda S^{13/10} c^{3/5} L \quad (10)$$

将 λ 代入得:

$$X = \begin{cases} 1/2 - 0.3Q_0^{3/10} n^{3/5} / S^{13/10} c^{3/5} L & \text{矩形} \\ 1/2 - 0.375Q_0^{3/10} n^{3/5} / S^{13/10} c^{3/5} L & \text{三角形} \\ 1/2 - 0.35Q_0^{3/10} n^{3/5} / S^{13/10} c^{3/5} L & \text{抛物线形} \end{cases} \quad (11)$$

K 和 X 的估算式中, Q_0 可通过公式^[19]计算得到; L 和 S 可根据实测或者通过DEM提取得到; n 可根据河槽特征查阅天然河道糙率参照表得到; c 由于变化范围小,且取值对计算结果不敏感,实际计算时可统一取4.75。

2 实例验证

2.1 研究区概况与资料

选择青峰岭、小仕阳至莒县区间流域作为实例验证区域,流域上游有青峰岭水库和小仕阳水库,区间流域内有1个雨量站和3个水文站(均有雨量观测数据),区间流域面积为625 km²(图1)。莒县位于沭河干流,沭河流域为暖温带季风区半湿润过渡性气候,位于华北暖温带季风气候区,大陆性气候显著,雨热同期,四季变化明显。冬季完全在蒙古高压控制下,西伯利亚冷空气团经常长驱直入,空气寒冷而干燥,雨雪稀少;春季风大,空气干燥;夏季亚热带太平洋暖湿气流增强,冷暖气团在该地区相遇的机会较多,雨量集中;秋季气候凉爽,降水减少,常有干旱现象发生。年平均气温11.8~14℃,历年最高气温41℃,最低气温-25.6℃。多年平均年降水量825.2 mm,6—9月约占全年降水量的74.5%,流域多年平均径流深为300.3 mm,折合年径流量为17.3亿 m³。

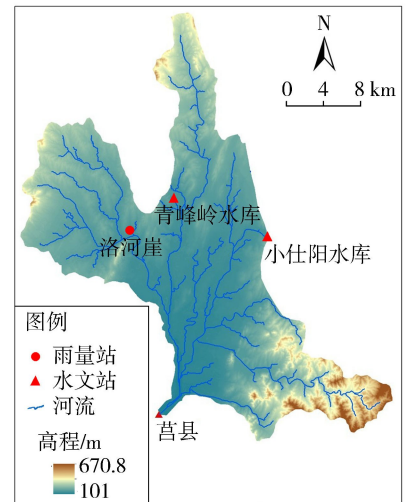


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

本文降水、径流及蒸发数据来自 2000—2020 年淮河流域水文年鉴。基于中国科学院计算机网络信息中心发布的地理空间数据云 30 m 分辨率数字高程数据提取河流长度、比降等地貌属性。

2.2 模型参数率定及适用性评价

在研究流域构建新安江模型,为推求区间洪水,需要青峰岭水库与小仕阳水库的出库流量、莒县实测流量同步洪水资料(表 1)。其中洪水资料选取了 2000—2020 年共 13 场洪水,所选洪水基本包括各种量级,选取 10 场洪水(序号 1~8、11~12)进行新安江模型参数率定,3 场洪水(序号为 9~10、13)进行模型验证。模型参数率定结果见表 2,模拟结果见表 3。

表 1 研究流域洪水资料

Table 1 Flood statistics of study basin

序号	洪号	降水量/mm	洪峰流量/ (m ³ /s)	最大出库流量/(m ³ /s)	
				青峰岭水库	小仕阳水库
1	20000626	114.9	295	15.5	9.30
2	20050626	104.0	191	24.0	7.20
3	20060703	128.3	310	14.5	7.10
4	20070627	92.5	133	18.9	7.70
5	20080817	70.8	262	20.9	5.10
6	20110826	122.6	558	0	345.00
7	20120709	66.5	102	14.8	0
8	20120802	103.0	295	21.8	7.40
9	20120902	67.2	120	21.8	4.70
10	20130704	53.8	280	24.0	117.00
11	20180818	150.8	1 190	626.0	318.00
12	20190810	266.3	974	283.0	51.20
13	20200813	135.7	1 050	153.0	112.00

表 2 新安江模型参数率定结果

Table 2 Parameter calibration results of Xin'anjiang model

模型参数	单位	取值范围	率定值
流域蒸散发折算系数		0.5~1.2	1.05
上层张力水蓄水容量	mm	10~30	13
下层张力水蓄水容量	mm	60~90	61
流域平均张力水蓄水容量	mm	100~180	118
深层蒸散发折算系数		0.1~0.2	0.16
张力水蓄水容量曲线方次		0.1~0.4	0.3
自由水蓄水容量	mm	5~30	30
自由水蓄水容量曲线方次		1.0~1.5	1.2
自由水水库壤中流出流系数		0.3~0.6	0.24
自由水水库地下径流出流系数		0.2~0.4	0.46
地面径流消退系数		0.1~0.9	0.54
壤中流消退系数		0.5~0.9	0.80
地下水消退系数		0.995~0.999	0.99
滞时	h	1	1
马斯京根法中洪水波传播时间	h	1~10	6
马斯京根法中楔蓄系数		0~0.5	0.453

对于青峰岭水库和小仕阳水库至莒县河段的马斯京根参数,由于两条河段的长度相近且位于同一流域,为避免模型参数过多造成参数率定时“异参同效”等问题导致率定效果变差,所以在新安江模型中采用同一组河道演算参数(马斯京根法中洪水波传播时间、马斯京根法中楔蓄系数)。

根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》中的精度评定标准,由表 3 可知,率定期合格率为 80%,验证期为 100%,平均为 90%,模拟结果较好,可根据模型结果进行区间洪水推求研究。

2.3 马斯京根法参数估算

根据式(8)和式(11)进行马斯京根法参数估算,首先需要获得青峰岭水库和小仕阳水库至莒县河段的 L 、 S 和 n 等水力参数。 L 和 S 通过 30 m 分辨率 DEM 数据提取, n 根据河槽特征查阅天然河道糙率参照表得到。 Q_0 对于每场洪水都不相同,计算时采用莒县多场洪水计算的平均值,使得计算出的参数能够反映河段的平均情况。各参数计算结果见表 4。

对比新安江模型率定出的马斯京根参数和参数估算法计算得到的参数可知,两种方法的参数差别较小。新安江模型中对两条河段概化处理,采用同一组参数,而参数估算法对每条河段都估算了参数,考虑了河段水力条件不同对参数的影响。青峰岭水库至莒县河段为沭河干流部分,水面较宽,而小仕阳水库至莒县河段为支流,且河道比降较大,河段的调蓄作用小,所以 K 较小, X 较大,符合参数的物理意义。

表 3 新安江模型模拟结果

Table 3 Simulation results of Xin'anjiang model

项目	洪号	洪峰相对 误差/%	洪量相对 误差/%	峰现 时差/h	确定性 系数	是否合格
率定期	20000626	-2.3	7.29	1	0.947	是
	20050626	-18.61	27.64	1	0.796	否
	20060703	0.72	3.31	1	0.917	是
	20070627	-16.54	19.13	1	0.766	是
	20080817	6.75	-10.84	-2	0.845	是
	20110826	0.44	-11.09	-6	0.877	否
	20120709	-4.44	-11.72	-2	0.735	是
	20120802	9.49	-17.69	0	0.772	是
	20180818	0.52	-17.09	0	0.823	是
	20190810	7.95	2.32	1	0.728	是
验证期	20120902	-0.8	-13.77	-1	0.707	是
	20130704	4.01	4.43	0	0.948	是
	20200813	8.2	-12.45	3	0.749	是

表 4 河道水力参数和马斯京根法参数

Table 4 River hydraulic parameters and Muskingum parameters

河 段	L/km	S	n	Q ₀ /(m ³ /s)	K/h		X	
					参数估算法	新安江模型法	参数估算法	新安江模型法
青峰岭水库—莒县	27.4	0.001 35	0.1	222	6.06	6	0.451	0.453
小仕阳水库—莒县	29.5	0.001 73	0.06	222	4.46	6	0.476	0.453

2.4 区间洪水推求

根据新安江模型率定出的马斯京根参数,用流域出口处的实测洪水扣除上游来水演算到流域出口处的洪水,即莒县实测洪水扣除青峰岭水库和小仕阳水库下泄水量演算得到的莒县处的洪水,得到新安江模型推求出的区间洪水。根据马斯京根参数估算法得到的参数,通过流域出口处洪水扣除上游来水演算到流域出口的洪水,得到基于马斯京根法推求出的区间洪水。由莒县实测洪水直接扣除上游来水得到直接扣除法推求出的区间洪水。

图 2 为部分场次的洪水过程图,对比 3 种方法推求出的区间洪水过程,新安江模型法和参数估算法推求出的区间洪水过程接近,呈现平滑的洪水过程。直接扣除法推求出的区间洪水过程出现流量为负值的情况,且部分洪水过程呈现锯齿状,明显不符合实际洪水过程,这是由于其未考虑洪水的推移和坦化。

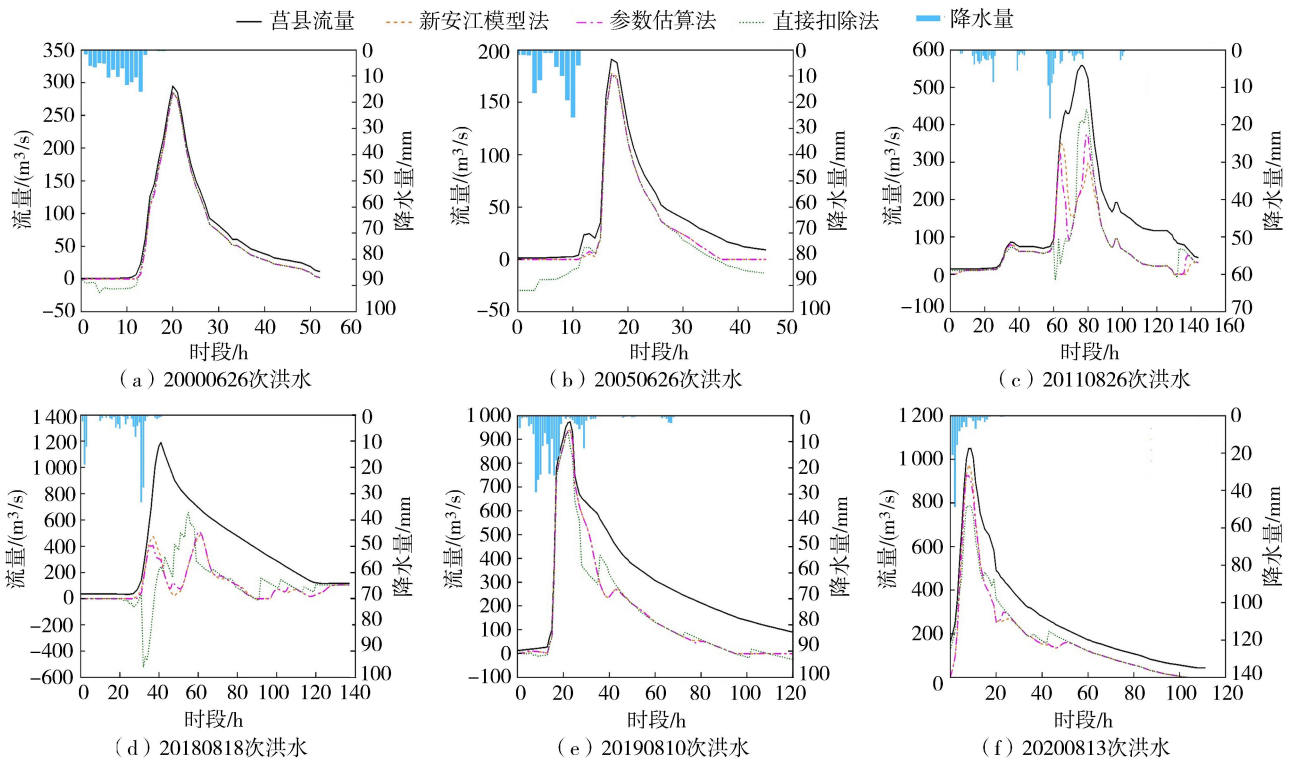


图 2 实测洪水与区间洪水过程

Fig.2 Measured flood and inter-basin flood hydrograph

由表 5 可知,参数估算法的确定性系数每场洪水都在 0.9 以上,说明其与新安江模型法推求的区间洪水过程接近。直接扣除法推求效果最差,20180818 次洪水确定性系数甚至为负值。

针对几场较为典型的洪水过程进行分析:当上游两水库下泄流量较小时,如 20000626 和 20050626 次洪水,新安江模型法和参数估算法推求的区间洪水过程线基本重合,且与流域出口断面流量过程线基本相似,洪水主要由区间洪水构成。当上游下泄流量较大时,两种方法推求得到的区间洪水过程与下游洪水过程差别较大,如 20110826 和 20180818 次洪水,下游洪水过程表现为单峰,在扣除上游来水后,区间洪水过程出现双峰,与降雨的两个雨峰保持一致。

对于 20110826 次洪水,两种方法推求得到的区间洪水过程差别较大,分析其原因,本场洪水只有小仕阳水库泄洪,由于新安江模型法中对两条河段进行了概化,其马斯京根参数反映的是两条河段共同的调蓄作用。参

表5 区间洪水推求结果统计

Table 5 Statistics of inter-basin flood estimation results

洪号	新安江模型法 洪峰流量/(m ³ /s)	参数估算法		直接扣除法	
		洪峰流量/(m ³ /s)	确定性系数	洪峰流量/(m ³ /s)	确定性系数
20000626	284	284	1.000	286	0.993
20050626	177	177	1.000	176	0.935
20060703	296	296	1.000	297	0.995
20070627	127	128	0.999	133	0.914
20080817	236	236	0.998	236	0.988
20110826	350	373	0.905	441	0.339
20120709	87	87	0.999	87	0.999
20120802	290	291	1.000	295	0.984
20120902	94	94	0.999	94	0.998
20130704	172	171	0.919	140	0.510
20180818	485	506	0.973	658	-1.147
20190810	940	939	1.000	933	0.956
20200813	975	926	0.997	786	0.942

注:确定性系数是将新安江模型法推求的结果作为实测结果进行计算得到的。

数估算法对两条河段都估算了参数,第二个洪峰流量大于第一个洪峰流量,推求出的区间洪水过程更合理,应该更接近于实际情况。

总体而言,两种方法推求出的区间洪水差别较小,新安江模型法需要根据实测数据率定参数,实际应用时较为烦琐,且对于有多个河段来水时,由于模型中对多个河段的概化,导致推求效果不佳。而参数估算法可直接根据河道水力特征估计参数,方法简单,可估算每个河段的马斯京根参数,考虑不同河段的水力特征,同时可以运用在无资料流域或分布式水文模型的参数确定中。

3 结 语

针对上游有水库等有调蓄作用的水利设施控制时,直接扣除法推求出的区间洪水精度较低的问题,引入马斯京根法进行河道演算,通过建立马斯京根参数 K 、 X 与河道水力特征间的关系,提出了一种基于马斯京根法的区间洪水推求方法。将该方法应用于青峰岭、小仕阳至莒县区间流域进行区间洪水推求,并与新安江模型推求的区间洪水过程进行对比,结果表明,两种方法推求的区间洪水过程差别较小,但基于马斯京根法的区间洪水推求方法可考虑不同来水河段水力特征的差异进行参数估计,可推广到无资料地区的马斯京根参数确定,推求的区间洪水可运用于中小流域的产汇流规律分析,为编制水文手册提供资料支撑。

参考文献:

[1] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):1-8. (WU Yongtuo,LI Zhijia,QI Zhenya,et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):1-8. (in Chinese))

[2] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护,2021,37(2):89-94. (LIU Zengmei,WANG Shangwei,CAI Yuting,et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):89-94. (in Chinese))

[3] 胡义明,杨晨曦,梁忠民,等. 非平稳性条件下设计洪水地区组成分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):19-24. (HU Yiming,YANG Chenxi,LIANG Zhongmin,et al. Analysis of regional composition of design flood under non-stationary conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):19-24. (in Chinese))

[4] 杨开斌,许浩,李天庆,等. 马斯京根系列方法在金沙江“11.03”白格堰塞湖溃决洪水演进中的应用[J]. 水电能源科学,2022,40(3):71-74. (YANG Kaibin,XU Hao,LI Tianqing,et al. Application of Muskingum methods in dam-breach flood routing of “11.03” Baige barrier lake on Jinsha River[J]. Water Resources and Power,2022,40(3):71-74. (in Chinese))

[5] 李致家,何蒙,闫凤翔,等. 河道洪水演算方法在淮河及滹沱河中游的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):95-101. (LI Zhijia,HE Meng,YAN Fengxiang,et al. Applications of channel flood routing methods in middle part of Huaihe River and Hutuo River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):95-101. (in Chinese))

[6] 杨飞,刘博伦,江恩慧,等. 基于马斯京根法的多沙河流输沙演算[J]. 人民黄河,2023,45(11):39-42. (YANG Fei,LIU Bolun,

JIANG Enhui,et al. Muskingum method based sediment calculations in Sediment Laden rivers[J]. Yellow River,2023,45(11):39-42. (in Chinese))

[7] HU Yiming, LIANG Zhongmin, HUANG Yixin, et al. Assessment of first-order-moment-based sample reconstruction method for design flood estimation in changing environment[J]. Water Science and Engineering, 2023,16(3):226-233.

[8] 龚定,李致家,臧帅宏,等. 河道汇流演算方法对比分析与研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):33-39. (GONG Ding,LI Zhijia,ZANG Shuaihong,et al. Comparative analysis and research of channel flow confluence routing methods[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):33-39. (in Chinese))

[9] 王军,王文川,邱林,等. 多策略融合改进的金豺优化算法及其在马斯京根模型参数估计中的应用[J]. 中国农村水利水电,2024(2):1-7. (WANG Jun,WANG Wenchuan, QIU Lin,et al. Multi-strategy fusion improved golden jackal optimization algorithm and its application in parameter estimation of the Muskingum model[J]. China Rural Water and Hydropower,2024(2):1-7. (in Chinese))

[10] 沈丹丹,包为民,刘可新,等. 马斯京根汇流参数抗差估计研究[J]. 中国农村水利水电,2016(7):72-74. (SHEN Dandan,BAO Weimin,LIU Kexin,et al. Research on parameter robust estimation for Muskingum model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(7):72-74. (in Chinese))

[11] 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-HE Shengyuan,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))

[12] 王俊生,包为民,赖善证,等. 马斯京根模型函数曲面参数率定方法[J]. 中国农村水利水电,2013(12):1-4. (WANG Junsheng,BAO Weimin, LAI Shanzheng, et al. Parameter estimation method of Muskingum routing model based on parameter function surface[J]. China Rural Water and Hydropower,2013(12):1-4. (in Chinese))

[13] 张昊,李致家,阚光远,等. 基于 SCE-UA 算法的马斯京根参数优化方法及程序化实现[J]. 水力发电学报,2013,32(2):43-47. (ZHANG Hao,LI Zhijia,KAN Guangyuan,et al. Muskingum parameter estimation method based on SCE-UA algorithm and its realization in programming[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(2):43-47. (in Chinese))

[14] 杨柳. 改进混合蛙跳算法在马斯京根模型参数优化中的应用[J]. 中国农村水利水电,2020(12):35-39. (YANG Liu. The application of improved hybrid leapfrog algorithm to the parameter optimization of Maskingen model[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(12):35-39. (in Chinese))

[15] DUAN Qingyun,SOROOSHIAN S,GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research,1992,28(4):1015-1031.

[16] 张旭旻,瞿思敏,石朋,等. 淮河上游分布式垂向混合产流模型及其应用[J]. 水电能源科学,2021,39(11):35-39. (ZHANG Xumin,QU Simin,SHI Peng,et al. Distributed vertical mixed runoff model in the upper reaches of Huaihe River and its application [J]. Water Resources and Power,2021,39(11):35-39. (in Chinese))

[17] TODINI E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2007,4(3):1645-1659.

[18] 孔凡哲,王晓赞. 基于河段特征的马斯京根模型参数估算方法[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(4):494-497. (KONG Fanzhe,WANG Xiaozan. Method estimating Muskingum model parameters based on physical characteristics of a river reach[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2008,37(4):494-497. (in Chinese))

[19] WILSON B N,RUFFINI J R. Comparison of physically-based Muskingum methods[J]. Transactions of the ASAE,1988,31(1):91-97.

[20] CUNGE J A. On the subject of a flood propagation computation method (Musklngum method) [J]. Journal of Hydraulic Research, 1969,7(2):205-230.

(收稿日期:2024 - 03 - 28 编辑:刘晓艳)