

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.005

河道汇流演算方法对比分析与研究

龚 定,李致家,臧帅宏,孙明坤

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 分别采用分段马斯京根法、反映河道断面形状和水力特性的变动参数 Muskingum-Cunge (MC) 演算法和 Muskingum-Cunge-Todini (MCT) 可变参数法对沅水流域沅陵站—王家河站河段进行河道汇流演算,探讨了具有分布式参数的演算方法在实际河道的应用效果。结果表明,分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法均较好地模拟出洪水在河道的推移与坦化,模拟精度较高,且 MC 演算法和 MCT 可变参数法的确定性系数相对分段马斯京根法精度更高且更为稳定;MC 演算法和 MCT 可变参数法对分段马斯京根法参数特性进行了较好的改进,并且 MCT 可变参数法解决了 MC 演算法蓄量和稳态不一致的问题。总体上看,3 种方法对于洪水预报具有较强的适应性和可靠性,为实时洪水预报提供了新方法。

关键词: 河道汇流演算;分段马斯京根法;MC 演算法;Muskingum-Cunge-Todini (MCT) 可变参数法;真实河道;沅水

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0033-07

Comparative analysis and research of channel flow confluence routing methods

GONG Ding, LI Zhijia, ZANG Shuaihong, SUN Mingkun

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The segmental Muskingum method, the Muskingum-Cunge (MC) algorithm with variable parameters and the Muskingum-Cunge-Todini (MCT) variable parameter method which reflecting the shape and hydraulic characteristics of the river cross-section were respectively used to study channel flow confluence for the Yuanling station-Wangjiahe station section in Yuanshui Basin. The application effect of the routing method with distributed parameters in real river channel is discussed. The results show that the segmental Muskingum method, MC algorithm and MCT variable parameter method can all simulate pushing and tampering of flood in the river channel with high simulation accuracy, and the deterministic coefficients of MC algorithm and MCT variable parameter method are more accurate and stable than segmental Muskingum method. The MC algorithm and MCT variable parameter method improve the parameter characteristics of segmental Muskingum method well, and the MCT variable parameter method solves the problem of the inconsistency between the storage capacity and the steady state of MC algorithm. On the whole, the three methods have strong adaptability and reliability for flood forecast, and provide a new method for real-time flood forecast.

Key words: channel flow confluence; segmental Muskingum method; MC algorithm; Muskingum-Cunge-Todini variable parameter method; real channel; Yuanshui

河道汇流演算实质上是一个水力学问题,由于存在需要较多的河道实测断面资料与较长的计算耗时等问题,水文学家发展了水文学方法和简化的水力学方法^[1-3]。1938 年 McCarthy 提出一种原始的水文洪水演算方法,即 Muskingum 法^[4-5],将所有地形特征和河段的水力学特性归为模型的系列线性参数^[6]。20 世纪 60 年代,赵人俊^[1]推导出分段马斯京根法连续演算的通用公式,解决了长河道预见期短的问题。实际河道水流条件复杂多变,河道的水力特性可能随沿程发生变化,又形成了各种非线性的演算方法。1969 年 Cunge

基金项目: 国家自然科学基金(52079035)

作者简介: 龚定(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文预报与流域水文模型研究。E-mail:201301010011@hhu.edu.cn

通信作者: 李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报与流域水文模型研究。E-mail:zjli@hhu.edu.cn

引用本文: 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. Research and application of channel flow confluence routing methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 33-39.

在 Muskingum 法的基础上提出了 Muskingum-Cunge (MC) 法^[7];1978 年 Ponce 等在 Cunge 法的基础上,考虑波速的变动问题,将 Muskingum 演算法扩展到时间可变参数^[8],提出了变动参数 MC 演算法(以下简称 MC 演算法)。使用线性参数的 Muskingum 法很好地保证了演算过程中河段的蓄量平衡,但 MC 演算法演算过程导致的质量损失随着河底坡度的减小而增加^[9-10]。针对 MC 演算法中的质量不守恒问题,2007 年 Todini 等^[11-14]提出 Muskingum-Cunge-Todini (MCT) 可变参数法,引入了修正因子和校正系数,进一步完善了河道汇流演算方法。

河道汇流演算在流域洪水预报中起着关键性的作用。我国幅员辽阔,流域特点各不相同,汇流条件复杂^[15-16]。在汇流过程中,河道内水流运动受地形影响较大^[17],传统的河道演算方法难以准确地描述河道的汇流特性,降低了洪水预报的精度^[18-20]。MC 演算法和 MCT 可变参数法在国外已经取得较为广泛的应用^[21-22],在国内,非线性和变参数河道汇流演算法在生产上还没有较为成熟的理论和应用^[1]。

本文在分段马斯京根法的基础上选用考虑河道断面形状和水力特性的 MC 演算法和 MCT 可变参数法对沅水流域沅陵站—王家河站河段进行河道汇流演算,对比分析考虑真实河道特性的汇流演算方法模拟效果。

1 方法介绍

1.1 MC 演算法

Ponce 和 Yevjevich 在没有改变问题实质的基础上^[8],提出了出流系数的表达式:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{-1 + C + D}{1 + C + D} \\ C_2 = \frac{1 + C - D}{1 + C + D} \\ C_3 = \frac{1 - C + D}{1 + C + D} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$C = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \quad D = \frac{Q}{BS_0c\Delta x}$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 为演算系数; C 、 D 分别为库朗数和单元格雷诺数,即物理和数字扩散率; Δx 为河流或河道被分割计算区段的长度,m; Δt 为积分时间步长,s; B 为地表宽度,m; S_0 为底坡坡度; Q 为参比流量, m^3/s ; c 为波速, m/s 。

1.2 MCT 可变参数法

MCT 可变参数法并没有改变 MC 演算法的简单性,但同时又解决了物质守恒的问题^[23]。由式(1)可得

$$\begin{cases} k = \frac{\Delta t}{C} \\ \varepsilon = \frac{1 - D}{2} \end{cases} \tag{2}$$

MC 演算法中,在一个时间步长内, k 和 ε 不随时间变化^[24]。即在计算相邻时刻的河段蓄量时,使用的 k 和 ε 是不一致的,在 t 时刻,有:

$$\begin{cases} [k\varepsilon]_2 \neq [k\varepsilon]_1 \\ [k(1 - \varepsilon)]_2 \neq [k(1 - \varepsilon)]_1 \end{cases} \tag{3}$$

式中下标代表相邻两个河段。可以得到:

$$S_t^{(2)} = [k\varepsilon]_2 I_t + [k(1 - \varepsilon)]_2 O_t \neq S_t^{(1)} = [k\varepsilon]_1 I_t + [k(1 - \varepsilon)]_1 O_t \tag{4}$$

式中 S_t 为 t 时刻的河段槽蓄量,上标代表同一个河段蓄量的不同计算方式,这就造成了在连续时段下,蓄量出现不守恒的情况。在 MCT 可变参数法中, k 和 ε 在一个时间步长内变化,在每个时间步长分别产生两个库朗数和单元格雷诺数,解决了式(4)蓄量不平衡的问题。

MCT 可变参数法演算系数表示为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{-1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*} \\ C_2 = \frac{1 + C_t^* - D_t^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*} \frac{C_{t+\Delta t}^*}{C_t^*} \\ C_3 = \frac{1 - C_t^* + D_t^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*} \frac{C_{t+\Delta t}^*}{C_t^*} \end{cases} \quad (5)$$

分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法的出流公式为

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t \quad (6)$$

式中: O_t 、 $O_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t+\Delta t$ 时刻下断面出流, m^3/s ; I_t 、 $I_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t+\Delta t$ 时刻的上断面入流, m^3/s 。

2 研究流域

沅陵站—王家河站河段地处湖南省西北部,怀化市北端,属于沅水流域,为亚热带季风气候区,位于 $110^{\circ}05'31''\text{E} \sim 111^{\circ}06'27''\text{E}$ 、 $28^{\circ}04'48''\text{N} \sim 29^{\circ}02'26''\text{N}$ 之间,区间面积约为 $4\,100\text{ km}^2$ 。在长期的水流侵蚀、切割和新构造运动的作用下,形成南北高起、中间陷落的沅陵谷地地貌。境内山峦重叠,溪河纵横,地形复杂。春秋两季气旋活动频繁,冷暖变化大。春季及初夏多锋面雨,夏秋之际多台风。沅陵县属于中亚热带季风湿润气候,阳光充足,雨量充沛,四季分明,年平均气温 16.7°C 。一般 8 月最高,1 月最低。年均降水量 $1\,400\text{ mm}$ 左右,常有局部暴雨出现,夏季降水量占全年雨量的 40%。研究区域面积为 $6\,456\text{ km}^2$,河段总长 112 km ,底坡较缓、较均匀,比降约为 $0.000\,277$,河槽糙率 n 为 $0.022 \sim 0.030$ 。图 1 为沅陵站—王家河站河段所处流域示意图,河道径流主要依靠上游来水,旁侧只有小支流汇入,入流量均不大,因此沅陵站—王家河站河段干流受支流来水影响较小,本文不予考虑,可以看成单一河道。

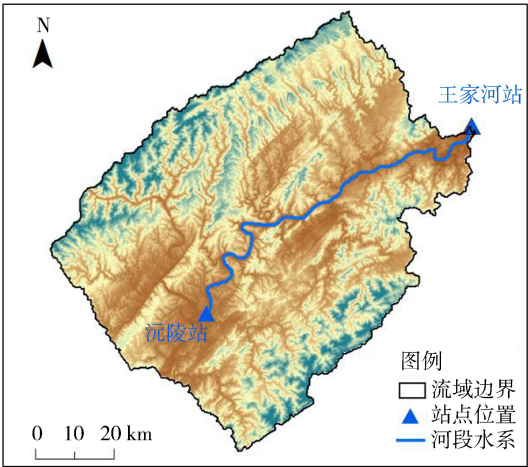


图 1 研究河段示意图
Fig. 1 Map of study channel

3 参数率定

3.1 河道断面概化

根据沅陵站—王家河站河段的实测大断面资料,考虑对河道横断面进行三角形概化或梯形概化。

a. 三角形概化。概化过程中保留河道水深,但会损失河道边坡和过水面积的精度,而三角形断面河底宽度为 0 m ,不符合实际断面情况。

b. 梯形概化。概化后基本与河道原断面边坡和过水面积一致,损失部分水深。

因此,根据河段实际断面特性,选择将河道断面形状概化为梯形。其中沅陵站河道横断面概化后的河底宽度为 382.4 m ,边坡坡度约为 20.3° 。王家河站河道横断面概化后的河底宽度为 390.5 m ,边坡坡度约为 17.3° 。河道概化图见图 2。沅陵站和王家河站均在流域干流上,实际断面情况比较接近,采用两个站断面概化后的算术均值作为汇流演算方法的断面参数值,即河道河底宽度为 386.4 m ,边坡坡度为 18.8° 。图 2 中河段左岸为零点。

3.2 汇流演算方法参数率定

在沅陵站—王家河站河段流量资料中,选取 1979—1985 年共

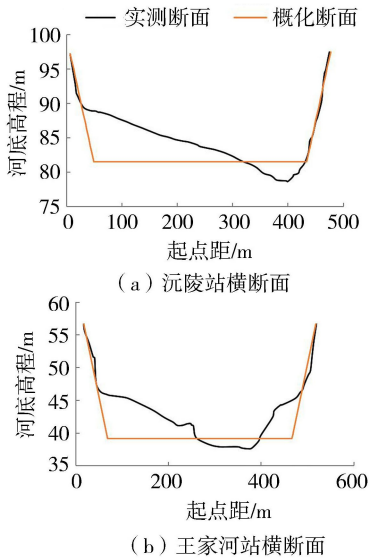


图 2 沅陵站—王家河站河段河道断面概化
Fig. 2 Generalized figure of Yuanling-Wangjiahe channel section

15 场洪水进行河道流量演算。其中 9 场用于参数率定,6 场用于方法验证。

将 3 种汇流演算方法的时间步长定为 1 h,通过经验推求法,确定分段马斯京根法参数为:河段数为 10,蓄量参数 $k=1$ h,流量比重系数 $\varepsilon=0.45$ 。

MC 演算法和 MCT 可变参数法考虑河道断面的形状和水力特性,在实际率定过程中,当 n 分别为 0.03 和 0.02 时,后者河道汇流方法的模拟精度明显更高。河道汇流方法的模拟精度表现出与河道水力因素有关,分析其原因为所选洪水中多数场次流量量级超过 $1\text{万 m}^3/\text{s}$,流量偏高造成对河道的冲刷程度更高,使得实际糙率变低,说明汇流方法考虑河道特性具有可行性。汇流方法使用牛顿法对参比流量和水位进行迭代计算^[25],具体河道参数为:河段数 15, $S_0=0.277\times10^{-3}$, $n=0.021$, $\Delta x=7\,467\text{ m}$, $\Delta t=1\text{ h}$ 。

4 结果与分析

4.1 汇流演算方法参数分析

根据沅陵站实测流量数据,利用 MC 演算法和 MCT 可变参数法计算,模拟得到王家河站的出流数据。选取模拟的末时段,分析两种方法中的库朗数和雷诺数在 15 个河段上的变化过程,以 19830710 号洪水过程为例,其中参数沿河段的变化曲线见图 3。

分段马斯京根法的参数 k 和 ε 在每个分段河道中不产生变化,属于线性参数。MC 演算法和 MCT 可变参数法的演算参数与每个分段河道的参比流量 Q 有关。根据图 3 可知,两种方法的 C 和 D 沿河段呈曲线变化,属于非线性参数。

4.2 河道蓄量变化结果

对于一场洪水的模拟,通常更关注模拟过程线的洪峰、洪量、峰现时间与实际洪水过程的误差关系,实际上洪水的蓄量守恒状态也对模拟效果起着一定的作用。以式(7)计算河段的蓄量变化过程。若模拟的过程线蓄量在涨落后不守恒,则必然对模拟精度存在一定程度的偏差。在保证分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法 3 种方法模拟的起涨流量和完全退洪时的流量一致后,对率定期和验证期的洪水模拟结果计算蓄量守恒误差:

$$S_{t+\Delta t}=S_t+\left(\frac{I_{t+\Delta t}+I_t}{2}-\frac{O_{t+\Delta t}+O_t}{2}\right)\Delta t$$

(7)

15 场洪水中选取 4 场洪水计算汇流过程中河段蓄量的变化过程值。图 4 和表 1 分别为分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法模拟后河段蓄量的变化过程和蓄量相对误差。实际模拟过程中 MC 演算法的蓄量变化值证明了 MC 演算法的蓄量不守恒。观察 3 种方法在图 4 的始末位置情况,可以发现 MC 演算法相较于另外两种方法,在洪水结束时的河道蓄量值明显高于初始值。由表 1 可以得到,MC 演算法的蓄量相对误差较大,最大误差值仅略低于 45%;MCT 可变参数法的蓄量误差很小,分析其原因可能为在实际计算过程中分段参数的舍入误差。分段马斯京根法由于汇流参数为恒定值,所以始末蓄量始终一致。

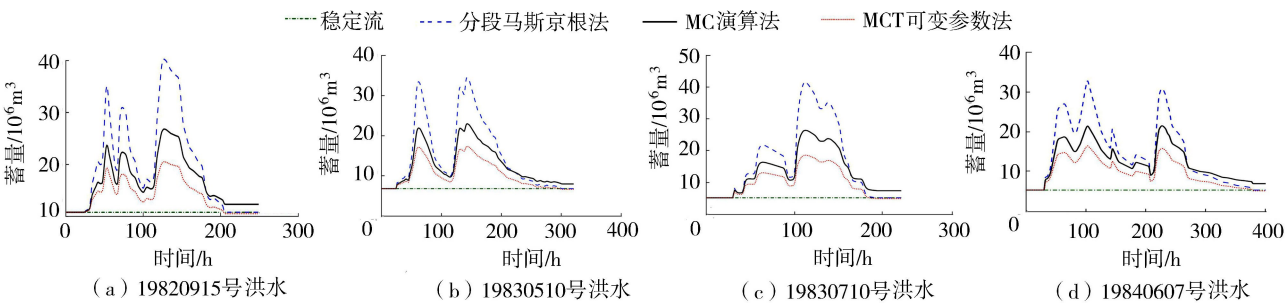


图 4 蓄量变化过程

Fig.4 Change process diagram of storage volume

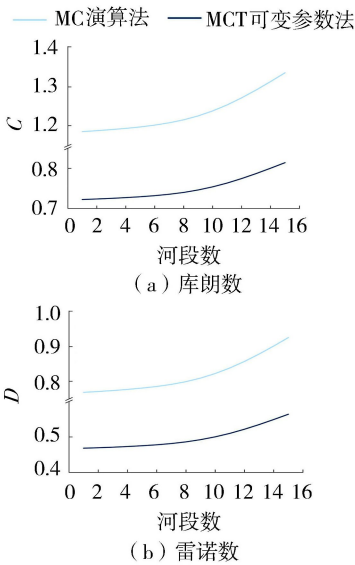


图 3 两种汇流演算方法参数变化过程

Fig.3 Parameter change process of two channel flow calculation methods for the confluence calculation

4.3 总体模拟结果分析

分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法 3 种方法河道汇流模拟结果见表 2。选取洪峰相对误差、洪量相对误差、峰现时间误差和确定性系数 4 个指标对模拟效果进行评价。图 5 为 3 种方法在沅陵站—王家河站河段率定期和验证期的总体模拟精度情况(图中 M、MC、MCT 分别代表分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法)。图 6 为沅陵站—王家河站河段 19820915 号、19830510 号、19830710 号和 19840607 号洪水用 3 种方法得到的模拟流量过程线。

表 2 3 种方法河道汇流模拟结果

Table 2 Simulation results of three channel flow calculation methods													
时段	洪水场次	分段马斯京根法				MC 演算法				MCT 可变参数法			
		洪峰相对误差/%	洪量相对误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数	洪峰相对误差/%	洪量相对误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数	洪峰相对误差/%	洪量相对误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数
率定期	19790524	-15.09	-13.13	3	0.77	-16.19	-13.28	3	0.79	-16.20	-13.04	2	0.80
	19800911	-7.21	-5.91	-20	0.96	-8.37	-6.02	-1	0.96	-8.37	-5.91	-1	0.96
	19810725	-6.11	-12.35	2	0.70	-8.35	-12.66	0	0.70	-8.36	-12.37	0	0.71
	19820612	-3.49	-8.84	5	0.84	-3.71	-8.97	0	0.89	-3.72	-8.83	0	0.89
	19820807	-1.80	-3.87	1	0.98	-3.27	-4.07	0	0.98	-3.29	-3.85	0	0.98
	19820915	-8.56	-10.26	3	0.79	-9.53	-10.62	0	0.86	-9.54	-10.24	0	0.87
	19830427	-0.50	-6.67	0	0.87	-1.91	-6.80	-2	0.87	-1.92	-6.64	-3	0.88
	19830511	-1.04	-4.01	1	0.98	-1.14	-4.25	-1	0.98	-1.14	-4.09	-1	0.98
	19830616	-8.97	-6.66	15	0.94	-10.48	-6.97	13	0.96	-10.49	-6.62	13	0.96
验证期	19830710	-6.68	-6.78	-4	0.96	-7.70	-7.22	-7	0.94	-7.71	-6.65	-7	0.94
	19840430	-6.69	-5.33	1	0.97	-8.07	-5.30	0	0.97	-8.12	-5.21	0	0.97
	19840531	-3.28	-4.26	2	0.98	-3.63	-4.50	-1	0.99	-3.63	-4.24	-1	0.99
	19840607	-20.39	-11.88	-7	0.66	-22.21	-12.09	-8	0.70	-22.22	-11.80	-7	0.72
	19850525	-3.69	-2.38	3	0.98	-4.35	-2.53	-1	0.98	-4.36	-2.37	-1	0.98
	19850703	-15.09	-13.13	3	0.93	-21.76	-5.85	2	0.94	-21.77	-5.59	2	0.94

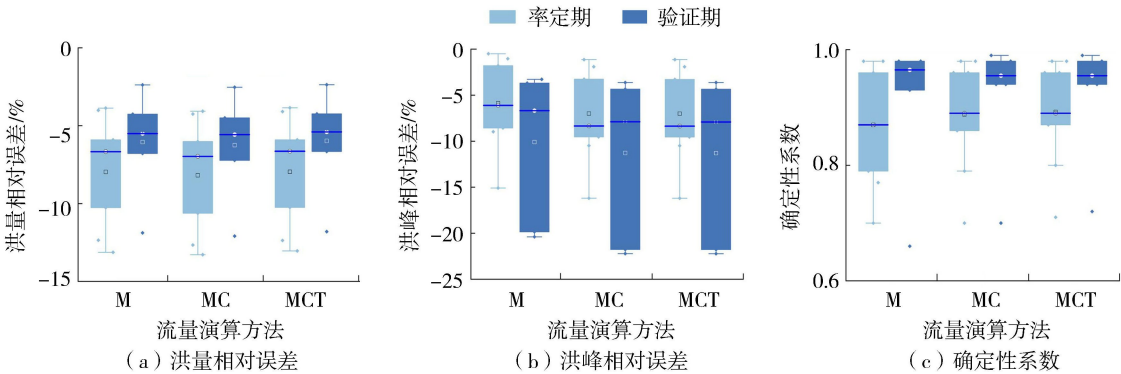


图 5 沅陵站—王家河站河段洪水模拟精度箱线图

Fig.5 Box plot of flood simulation accuracy in Yuanling-Wangjiahe channel section

4.3.1 率定期结果分析

率定期共有 9 场洪水,从表 2 可以得到分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法的洪峰和洪量合格率均为 100%,分段马斯京根法的峰现时间合格率为 77.8%,MC 演算法和 MCT 可变参数法的峰现时间合格率均为 88.9%。分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法的确定性系数均值分别为 0.870、0.889、0.891。

洪量误差方面,19790708 号洪水、19800502 号洪水、19820915 号洪水在 3 种方法的模拟下洪量误差均超过-10%,其他场次洪量误差均在-10%以内;洪峰误差方面,MC 演算法和 MCT 可变参数法有两场洪水洪峰误差超过-10%,分段马斯京根法只有一场超过-10%,分段马斯京根法表现更优;峰现时间误差方面,分段

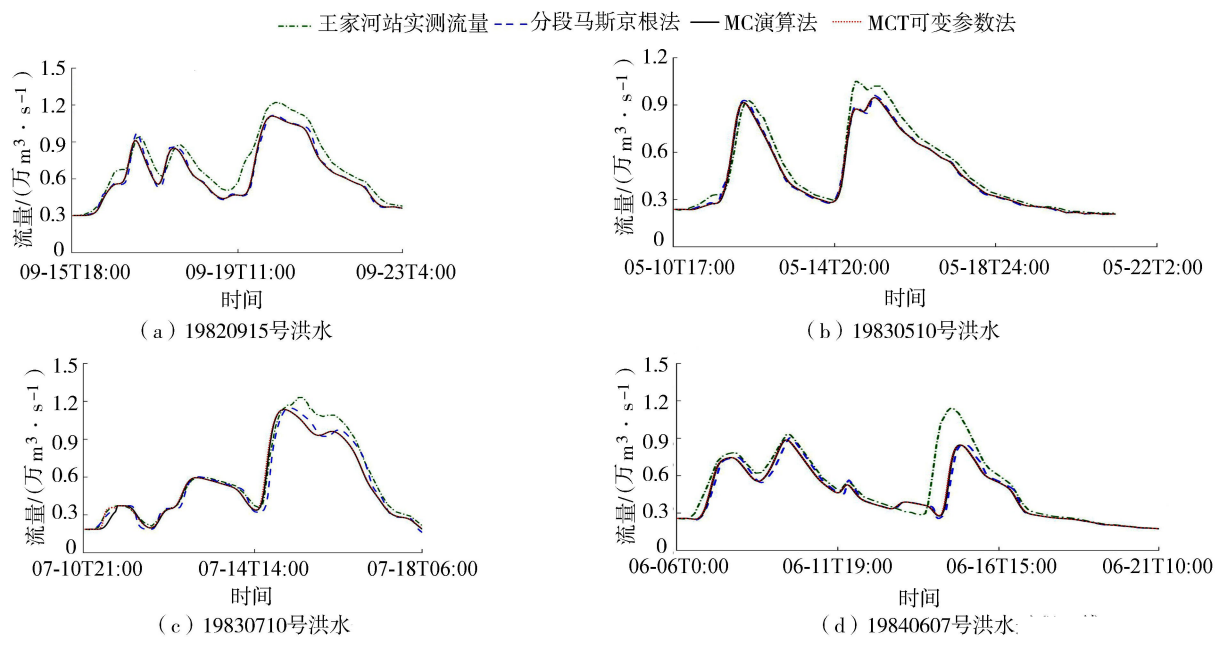


图6 沅陵站—王家河站洪水模拟过程线

Fig. 6 Observed and simulated flood hydrographs in Yuanling-Wangjiahe reach

马斯京根法模拟 19800518 号洪水峰现时间误差较大,检查发现该洪水过程为多峰洪水,且两个峰值之间相隔时间较短,分段马斯京根法未模拟出实际最高的峰值,使得模拟峰现时间误差较大。除了该次洪水,只有一场洪水峰现时间误差超过 10 h,3 种方法很好地模拟了实际下游断面的峰现时间,说明分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法都很好地模拟出洪水在河道的扩散和传递。

4.3.2 验证期结果分析

验证期共有 6 场洪水,分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法的模拟精度结果见表 2。3 种方法的洪量合格率均为 100%,只有 19840606 号洪水洪量误差超过 -10%。分段马斯京根法的洪峰合格率为 83.3%,MC 演算法和 MCT 可变参数法的洪峰合格率略低,均为 66.7%。19840606 号洪水和 19850703 号洪水洪峰误差相对较大,其中 19840606 号洪水为多峰洪水过程,3 种方法在第 1 个洪峰处模拟较好,但在第 2 个洪峰处,王家河站出流量远大于沅陵站入流量,分析其原因可能为该时段流域内降水量较大,区间入流增大。峰现时间误差均控制在 10 h 以内,模拟结果较好。除去 19840606 号洪水外,分段马斯京根法、MC 演算法和 MCT 可变参数法的确定性系数均超过了 0.9。

率定期的 9 场洪水对汇流参数进行了很好的率定,使得率定期和验证期次洪模拟达到了较好的精度。从图 6 可以看到分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法的模拟过程线与实测比较接近,对于多峰洪水的模拟效果也比较好。

总体上看,分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法模拟结果均比较理想。在模拟过程中,没有考虑旁侧入流,实际结果也反映出这个假设基本正确。由于 MC 演算法蓄量不守恒的问题,其最直接的影响是洪量模拟精度。从表 2 可以发现,除了 19840430 号洪水 MC 演算法的洪量模拟误差低于分段马斯京根法外,其余场次洪水洪量相对误差均最高,印证了蓄量不守恒会增加洪量误差的结论。从图 5 可见,MC 演算法和 MCT 可变参数法的确定性系数相对分段马斯京根法精度更高且更为稳定。

5 结 论

a. MC 演算法和 MCT 可变参数法基于运动波方程差分解的数值扩散在一定条件下模拟扩散波的物理扩散,能够反映天然河道中洪水波既传播又扩散的运动规律,在实际模拟过程中考虑河道断面形状和水力特性,贴近实际河道,对流域内宽浅河道的大中型洪水模拟效果较好。

b. MCT 可变参数法在 MC 演算法的基础上加入了校正系数,增强了参数的时变性,解决了蓄量和稳态不一致的问题,在有限的范围内进一步提高了 MC 演算法的稳定性和模拟精度。

- c. 在河道断面相差不大的河段中,以断面参数平均值作为整个河段的概化形状,结果表明模拟精度较为满意,具有一定的可行性。
- d. 总体上看,分段马斯京根法、MC 演算法、MCT 可变参数法在沅陵站—王家河站河段的模拟结果较好。多数洪水均为多峰洪峰,次洪中存在多个流量涨落过程,且涨落较快,3 种方法对于该类洪水也具有较好的适应性和可靠性。分段马斯京根法简便的计算步骤仍然可以带来良好的模拟效果。在实际模拟中,MC 演算法和 MCT 可变参数法与分段马斯京根法取得的效果不相上下,甚至更优。

参考文献:

[1] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

[2] FENTON J D. Flood routing methods[J]. Journal of Hydrology,2019,570:251-264.

[3] 李致家,臧帅宏,刘志雨,等. 新安江模型中河道汇流方法的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):189-194. (LI Zhijia,ZANG Shuaihong,LIU Zhiyu,et al. Improvement of channel routing method for Xin’ anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):189-194. (in Chinese))

[4] PERUMAL M. The cause of negative initial outflow with the Muskingum method[J]. Hydrological Sciences Journal,1992,37(4):391-401.

[5] 芮孝芳,张超. Muskingum 法的发展及启示[J]. 水利水电科技进展,2014,34(3):1-6. (RUI Xiaofang,ZHANG Chao. Development and inspiration of Muskingum method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2014,34(3):1-6. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 巨兴顺,刘波,拜存有. 马斯京根分段演算与水箱模型组合在区间洪水过程预报中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2006(3):35-37. (JU Xingshun,LIU Bo,BAI Cunyou. Application of Muskingum segmentation flood routing model and Tank models to forecast flood process[J]. Hydro-Science and Engineering,2006(3):35-37. (in Chinese))

[8] CUNGE J A. On the subject of aflood propagation computation method (Muskingum Method) [J]. Journal of Hydraulic Research,1969(2):205-230.

[9] PONCE V M,YEVJEVICH V. Muskingum-Cunge method with variable parameters[J]. Journal of the Hydraulics Division,1978,104(12):1663-1667.

[10] CUNGE J A,TANG Xiaonan,KNIGHT D W,et al. Discussion and closure: volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2001,127(3):239-240.

[11] 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.

[12] CIARAPICA L,TODINI E. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales [J]. Hydrological Processes,2002,16(2):207-229.

[13] O’ SULLIVAN J J,AHILAN S,BRUEN M. A modified Muskingum routing approach for floodplain flows:theory and practice[J]. Journal of Hydrology,2012,470/471:239-254.

[14] REGGIANI P,TODINI E. On the validity range and conservation properties of diffusion analogy and variable parameter Muskingum[J]. Journal of Hydrology,2018,563:167-180.

[15] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke,ZHANG Qينو,CHEN Xinyu,et al. Gridded Xin’ anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[16] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke,NIU Jiefan,LI Xi,et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China’ s semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35. (in Chinese))

[17] 刘晓哲. 河流径流演变影响度分析[J]. 水利规划与设计,2021(3):43-46. (LIU Xiaozhe. Analysis of influence degree of river runoff evolution[J]. Water Resources Planning and Design,2021(3):43-46. (in Chinese))

[18] 李致家. 具有行蓄洪区的河道洪水演算方法探讨[J]. 水科学进展,1997,8(1):65-70. (LI Zhijia. Research on channel routing method with flood diversion and flood retarding areas[J]. Advances in Water Science,1997,8(1):65-70. (in Chinese))

(2):170-172. (CHEN Xiaoyan, LU Guihua, QIN Fuxing, et al. Determination of field capacity with pedo-transfer functions method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2005,33(2):170-172. (in Chinese))

[24] 邢杰. 粘粒含量对砂壤土水分常数的影响[J]. 内蒙古农业科技,2013(6):31-32. (XING Jie. The effects of clay content on soil moisture constant[J]. Inner Mongolia Agricultural Science And Technology,2013(6):31-32. (in Chinese))

[25] 李冰,刘榕源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报,2012,28(13):160-165. (LI Bing,LIU Rongyuan,LIU Suhong,et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, ,2012,28(13):160-165. (in Chinese))

[26] JARVIS P G. The Interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B,Biological Sciences,1976,273(927):593-610.

[27] NOILHAN J,PLANTON S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. Monthly Weather Review,1989,117(3):536-549.

[28] 李俊,韩凤明,同小娟,等. 麦田蒸散模型的改进及其对阻力参数的敏感性分析[J]. 中国农业气象,2014,35(6):635-643. (LI Jun,HAN Fengming TONG Xiaojuan,et al. Evapotranspiration models for a winter wheat field: the improvements and analyses on their sensitivities to the resistance parameters[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(6):635-643. (in Chinese))

[29] 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2012.

[30] FAN Junliang,WANG Xiukang, WU Lifeng,et al. New combined models for estimating daily global solar radiation based on sunshine duration in humid regions;a case study in South China[J]. Energy Conversion and Management,2018,156:618-625.

[31] 肖璐,崔宁博,赵璐,等. 西北地区夏玉米不同生育期蒸发蒸腾量模拟模型适用性评价[J]. 灌溉排水学报,2019,38(增刊 2):20-29. (XIAO Lu,CUI Ningbo,ZHAO Lu,et al. Applicability evaluation of evapotranspiration estimate models for different growth stages of summer maize in northwest China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (Sup2): 20-29. (in Chinese))

[32] 王富强,赵乃立,袁建平,等. 基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):6-12. (WANG Fuqiang, ZHAO Naili, YUAN Jianping, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in northeast China based on information entropy theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(4):6-12. (in Chinese))

[33] 陈镜明,柳竞先,罗翔中. 基于碳水通量耦合原理改进 Penman-Monteith 蒸散发模型[J]. 大气科学学报,2020,43(1):59-75. (CHEN Jingming, LIU Jingxian, LUO Xiangzhong. Improving the Penman-Monteith evapotranspiration model based on the coupling principle of carbon and water fluxes [J]. Transactions Atmospheric Sciences,2020,43(1):59-75. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 01 - 22 编辑:胡新宇)

(上接第 39 页)

[19] 李致家,孔祥光,朱兆成,等. 河道洪水实时预报的半自适应模型研究[J]. 水科学进展,1998,9(4):367-372. (LI Zhijia, KONG Xiangguang,ZHU Zhaocheng,et al. Half-self adaptive updating Kalman filter model of channel flow routing[J]. Advances in Water Science,1998,9(4):367-372. (in Chinese))

[20] 俞彦,张行南,张鹏,等. 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. 水资源保护,2020,36(3):28-33. (YU Yan, ZHANG Xingnan, ZHANG Peng, et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin’ anjiang model [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):28-33. (in Chinese))

[21] REGGIANI P,TODINI E,MEIßNER D. On mass and momentum conservation in the variable-parameter Muskingum method[J]. Journal of Hydrology,2016,543:562-576.

[22] MAZZETTI C. TOPKAPI 模型与应用指南[M]. 刘志雨,翁明华,赵春兰,译. 南京:河海大学出版社,2014.

[23] TODINI E,CIARAPICA L. The TOPKAPI model[M]. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Michgan: Water Resources Publications,2002:471-506.

[24] REGGIANI P,TODINI E,MEIßNER D. A conservative flow routing formulation:Déjà vu and the variable-parameter Muskingum method revisited[J]. Journal of Hydrology,2014,519:1506-1515.

[25] 柳辉. 解非线性方程的牛顿迭代法及其应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学版),2007(8):95-98. (LIU Hui. Newton iteration method for nonlinear equation solutions and its application [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition),2007(8):95-98. (in Chinese))