

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.005

考虑水库泄水影响的逐网格汇流演算方法

韩文彪¹, 姚成¹, 李致家¹, 张锦堂², 李京兵²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022)

摘要: 为将网格新安江(Grid-XAJ)模型更好地应用于受水库泄水影响地区的洪水模拟及预报, 以横排头流域为研究区域, 基于水库真实地理位置, 利用分段马斯京根(MK)法、逐网格 MK 法、逐网格 Muskingum-Cunge-Todini(MCT)法对比分析水库泄水对模型汇流计算的影响。结果表明: 3 种方法对洪峰的模拟情况均较好, 率定期与验证期全部洪水的平均合格率均为 100%; 逐网格 MK 法与分段 MK 法全部洪水的平均径流深合格率均为 76.9%, 小于逐网格 MCT 法(84.6%); 与分段 MK 法相比, 逐网格 MCT 法与逐网格 MK 法可以反映上游水库泄水对汇流过程中流量在流域中时空分布的影响; 逐网格 MCT 法在逐网格 MK 法的基础上进一步考虑了下垫面河道的真实情况; 总体而言, 逐网格 MCT 法对于受水库泄水影响流域的洪水预报具有较强的适应性和可靠性。

关键词: 网格新安江模型; 水库蓄泄; 马斯京根法; Muskingum-Cunge-Todini 法; 横排头流域

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0034-08

Routing method of confluence considering the influence of reservoir drainage at grid scale

HAN Wenbiao¹, YAO Cheng¹, LI Zhijia¹, ZHANG Jintang², LI Jingbing²

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

2. Hydrological Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to better apply the Grid-Xin'anjiang(Grid-XAJ)model in the flood simulation and forecasting in areas affected by reservoir discharge, the effect of reservoir discharge on the model confluence calculation was compared between the segmented Muskingum(MK) method, grid-based MK method and grid-based Muskingum-Cunge-Todini (MCT) method, based on the real geographical location of the reservoir in the Hengpaitou Watershed. The results show that the flood peak simulation of the three schemes is good, and the average pass rate of all the floods in the periodic and verification period of each scheme rate is 100%. The average pass rate of runoff depth in the grid-based MK method and segmented MK method is 76.9%, which is lower than that of the grid-based MCT method, 84.6%. Compared with the segmented MK method, grid-based MCT method and grid-based MK method can reflect the influence of upstream reservoir discharge on the spatial and temporal distribution of discharge in the catchment process. Grid-based MCT method further considers the real situation of the underlying river channel on the basis of grid-based MK method. In general, grid-based MCT method has strong adaptability and reliability for flood forecasting in basins affected by reservoir drainage.

Key words: grid-Xin'anjiang model; reservoir discharge; Muskingum method; Muskingum-Cunge-Todini method; Hengpaitou Watershed

水库作为一种重要的防洪工程,可以拦蓄洪水,减免洪水造成的灾害。但大规模的水库建设,改变了流域内的水文循环和自然汇流过程^[1-2],对传统水文模型模拟精度产生了较大的影响。目前洪水预报中关于水库的影响,主要是在集总式模型或分布式模型对洪量的预报中进行集总式修正^[3-5],为了研究水库对流域面上洪水模拟的影响,需要在分布式水文模型的汇流计算过程中更加精细地考虑水库泄水的影响。

分布式模型常用的流域汇流演算方法主要分为两种:一种是基于水量平衡方程和槽蓄方程的水文学方法,另一种是直接求解完全圣维南方程组或其简化方程组的水力学法^[6]。水力学法汇流演算具有更强的物

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979070,52079035);安徽省自然科学基金“水科学”联合基金重点项目(2208085US06)

作者简介: 韩文彪(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: 2234468423@qq.com

通信作者: 姚成(1982—),男,教授,博士,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: yaocheng@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

理性,能够更全面地考虑汇流演算时多方面的影响,但其计算较复杂,对资料的需求也相对较高^[7-8];而水文学方法计算简单,计算效率高,且资料需求相对较低。马斯京根法(以下简称 MK 法)^[9-10]为常见的水文学方法,其将所有的下垫面地形特征和各河段的水力学特性归为模型的系列线性参数^[11]。此后,赵人俊^[12]推导了分段 MK 法连续演算的通用公式,解决了长河道预见期短的问题。但实际河道水流条件复杂多变,为考虑河道水力特性的沿程变化,Cunge 等^[13-15]在 MK 法的基础上提出了非线性的演算方法—Muskingum-Cunge (MC)法。Johnson 等^[16]在分布式水文模型中利用河道水力因素和面积的经验关系估算洪水波的速度,实现了 MC 法的网格化演算。在 MC 法的基础上,Todini 等^[17-18]通过引入修正因子和校正系数,解决了 MC 法演算过程中的质量不守恒问题,提出 Muskingum-Cunge-Todini 可变参数法(以下简称 MCT 法),进一步完善了河道汇流演算方法。分布式水文模型 Grid-XAJ 将流域划分为若干个正交网格,以网格作为计算单元进行汇流计算^[8,19]。本文在 Grid-XAJ 模型的基础上采用基于水文学方法的逐网格 MK 法及逐网格 MCT 法进行考虑上游水库泄水的汇流演算,并与分段 MK 法进行比较,对比 3 种方法在受水库泄水影响流域的模拟精度和效果。

1 研究方法

1.1 分段 MK 法

为解决河段较长时出现的不满足 MK 法假设的河道线性条件的问题^[12],分段 MK 法将长河段分成若干短河段进行连续演算。对各河段的水量平衡方程和槽蓄方程差分求解,得到流量演算方程:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t \tag{1}$$

其中
$$C_1 = \frac{-k_e x_e + 0.5 \Delta t}{k_e (1 - x_e) + 0.5 \Delta t} \quad C_2 = \frac{k_e x_e + 0.5 \Delta t}{k_e (1 - x_e) + 0.5 \Delta t} \quad C_3 = \frac{k_e (1 - x_e) - 0.5 \Delta t}{k_e (1 - x_e) + 0.5 \Delta t}$$

式中: O_t 、 $O_{t+\Delta t}$ 为计算时段始末河段出流量; I_t 、 $I_{t+\Delta t}$ 为计算时段始末的河段入流量; C_1 、 C_2 、 C_3 为流量演算系数; k_e 为槽蓄系数; x_e 为流量比重系数; Δt 为演算时间步长。

利用分段 MK 法将各上游水库泄水流量经由河道演算至流域出口断面,与流域区间方案计算所得出口段面流量过程叠加得到流域总出流过程。若计算时段始末上游水库泄水流量分别为 $Q_{F,t}$ 、 $Q_{F,t+\Delta t}$,则库前河段流量演算方程为

$$O_{t+\Delta t} = C_1 Q_{F,t+\Delta t} + C_2 Q_{F,t} + C_3 O_t \tag{2}$$

1.2 逐网格 MK 法和 MCT 法

考虑水库泄水的 MK 法将上游水库泄水量根据 DEM 网格行列号注入下游河道网格后随河道水流根据网格间汇流演算次序^[20]与地表径流、壤中流及地下径流一同演算至流域出口。

MCT 法通过引入校正因子 β 、校正后的库朗数 C^* 以及校正后的单元雷诺数 Re^* 保证计算过程中上下游网格蓄量和稳态一致^[19],其参数可根据河道断面和水力因素计算得到。逐网格 MCT 法与逐网格 MK 法的网格间汇流演算次序相同。

2 研究数据与参数率定

2.1 研究数据

横排头流域位于安徽省西部,地处亚热带季风气候区,多年平均降水量 1 334 mm,属于湿润地区。流域洪水由暴雨形成,且暴雨中心多出现在横排头流域上游的佛子岭、响洪甸两座水库的上游山区,入库洪水峰高量大,水库对洪水的调蓄作用明显。研究流域选取淠河流域中游从横排头水文站至上游佛子岭水库及响洪甸水库区间部分,流域面积 1 130 km²(北纬 31.25°~31.69°、东经 116.2°~116.58°),流域高程、水系、站点分布及上游水库入流点如图 1 所示。因横排头区间面积较小,横排头站洪水主要以水库泄洪为主。由于响洪甸水库蓄水能力较强,汛期泄水量较少。因此横

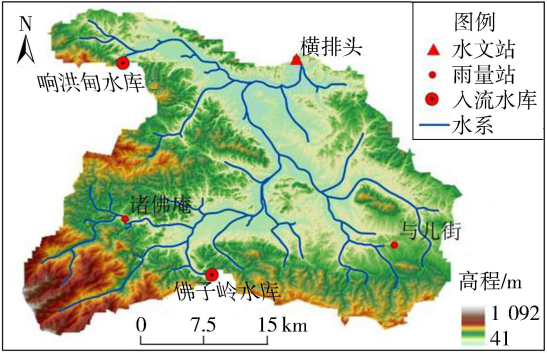


图 1 研究流域示意图

Fig.1 Schematic map of study catchments

排头站汛期上游水库来水主要来自库容相对较小的佛子岭水库泄水。

本文需要的下垫面数据主要包括 DEM、土壤类型、土地利用类型以及植被覆盖数据。DEM 分辨率为 1 km,通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载。实测降水、实测流量及水库泄水资料由安徽省水文局提供。以 1 h 为计算步长建立 Grid-XAJ 模型,选取 2012—2021 年站点资料较为齐全的 13 场洪水资料进行计算,将收集到的实测降水和流量资料插值为 1 h 步长数据,其中前 9 场洪水资料用于模型参数率定,后 4 场洪水用于模型验证。

2.2 参数率定

基于 Grid-XAJ 模型参数的物理意义,利用 DEM、土壤类型、土地利用类型以及植被覆盖等的空间分布数据,推导参数与下垫面特征的定量关系,进而估算参数的空间分布^[8]。根据 Grid-XAJ 模型的参数敏感性分析结果^[20],利用实测出口断面流量过程对敏感参数进行率定和检验。

对于汇流参数率定,分段 MK 法河道汇流方案参数主要包括各河段的槽蓄系数 k_{ech} 及流量比重系数 x_{ech} ,各河段分段的参数相同,由整条长河段的 $k、x$ 计算:

$$k_{ech} = k/N \tag{3}$$

$$x_{ech} = \frac{1}{2} - N\left(\frac{1}{2} - x\right) \tag{4}$$

式中 N 为河道分段数。

通过经验推求法,结合流域实际情况,横排头流域上游响洪甸水库以及佛子岭水库的河道分段数取值分别为 6 段及 8 段;槽蓄系数取值均为 1;流量比重系数取值均为 0.3。

逐网格 MK 法的汇流参数包括网格中各种径流成分的槽蓄系数 k_e 和流量比重系数 x_e 。 $k_e、x_e$ 暂不考虑其空间分布的差异,采用流域内网格单元统一赋值的方法。 x_e 相对不敏感,两种方案的河道水流、地表径流、壤中流与地下径流的 x_e 结合流域下垫面信息取经验定值 0.3。 k_e 属于敏感参数,反映径流成分在网格单元的汇流时间, k_e 越小汇流速度越快,峰现时间提前,峰值也会增大^[21]。由于河道水流、地表径流、壤中流与地下径流在汇流速度上存在差异,因此各自对应的槽蓄系数 $k_{ech}、k_{es}、k_{ei}、k_{eg}$ 需分别率定。逐网格 MK 法 $k_{ech}、k_{es}、k_{ei}、k_{eg}$ 的率定值分别为 0.05、0.08、0.6、0.1 h。

逐网格 MCT 法在汇流演算分析中构建了虚拟河道的概念。对于河道网格,河底坡度 S_0 即为坡面网格的坡度;对于非河道的坡面网格,其河底坡度等于该网格单元的坡度。坡面网格的虚拟河道宽度认为与河道网格相同,取经验值 50 m。空间计算步长取网格单元长度 1 000 m。逐网格 MCT 法假设流域为矩形河道,过水断面面积等于该时刻河道水深乘以河面宽度。通过经验推求的河道水流、地表径流、壤中流与地下径流的曼宁糙率系数分别为 0.010、0.011、0.012、0.012。

汇流计算过程中水库泄水过程使进入下游河道的洪峰流量发生了改变,对汇流计算过程中流量的时空分布产生了影响。为提高网格单元内各种径流成分的汇流过程模拟精度,需要考虑流域各网格调蓄作用空间分布的差异。河网蓄水消退系数(C_s)是 Grid-XAJ 模型汇流计算模块中一个极其敏感的参数,可以反映流域退水速率,主要控制洪峰的形状,对模拟结果影响较大^[20]。由于 C_s 与河网形态及地形地貌特征密切相关^[22],存在空间分布上的差异,因此 Grid-XAJ 模型汇流演算过程中以集总式参数 C_s 反映流域各网格的调蓄能力会造成汇流计算的误差。本文根据 C_s 与累计汇水面积的关系^[20]构建分布式 C_s 参数,以更加充分地考虑汇流过程中流域调蓄作用的空间分布差异:

$$C_s = \alpha \ln A + \beta \tag{5}$$

式中: $\alpha、\beta$ 为分布式 C_s 设定估算系数; A 为累计汇水面积。

由图 2 可知,累计汇水面积越大,流域内水流到达流域出口处的路径越长,到达出口断面时间亦越长,退水就越慢, C_s 也就越大。不同的河道汇流方法对河道调蓄作用的模拟存在着差异,为了达到相同的洪水模拟效果, C_s 值也会存在差异。分段 MK 法与逐网格 MK 法 C_s 的取值范围均为 0.6 ~ 0.89。逐网格 MCT 法在 C_s 基础上,进一步通过曼宁糙率系数反映河道水力特性对洪峰形状的影响^[19],两参数相互协调制约,因此其 C_s 的取值范围为 0.6 ~ 0.77,小于前两种方法。

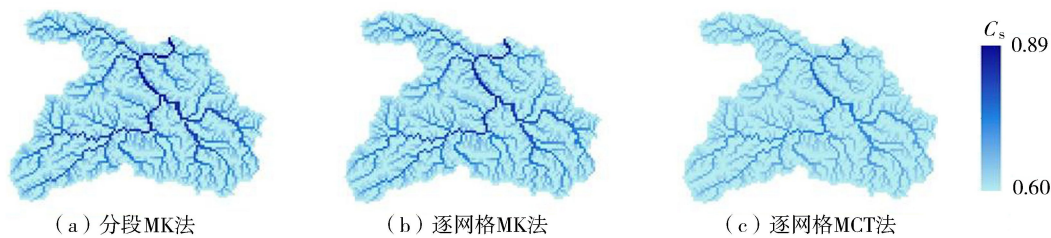


图2 3种汇流方法对应的 C_s 空间分布

Fig.2 Spatial distribution diagram of corresponding C_s of three confluence calculation schemes

3 结果与分析

3.1 出口断面流量过程模拟

根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选择径流深合格率、洪峰合格率、峰现时间合格率和确定性系数 4 个指标作为评价标准,3 种汇流方法的模拟精度见表 1。对于径流深,逐网格 MCT 法的率定期结果稍优于分段 MK 法、逐网格 MK 法,验证期 3 种汇流方法合格率均为 80.0%。由于横排头站的洪水成因主要以水库泄洪为主,因此洪峰流量的准确模拟对于流域防汛工作十分重要。对于洪峰合格率,3 种汇流方法率定期和验证期的模拟结果均为 100.0%,模拟结果较好。对于峰现时间合格率,分段 MK 法、逐网格 MK 法的模拟结果相同,稍低于逐网格 MCT 法。对于平均确定性系数,逐网格 MCT 法的率定期和验证期模拟结果优于分段 MK 法、逐网格 MK 法。

表 1 3 种汇流方法模拟精度

Table 1 Simulation accuracy of three confluence calculation schemes

汇流方法	径流深合格率/%		洪峰合格率/%		峰现时间合格率/%		确定性系数	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
分段 MK 法	89.0	80.0	100.0	100.0	56.0	75.0	0.81	0.71
逐网格 MK 法	89.0	80.0	100.0	100.0	56.0	75.0	0.83	0.71
逐网格 MCT 法	100.0	80.0	100.0	100.0	67.0	75.0	0.86	0.72

注:确定性系数为各场洪水算术平均值。

由图 3 可知,对于径流深的模拟,率定期逐网格 MCT 法稍优于其他两种方法,验证期逐网格 MK 法平均相对误差最小。对于洪峰的模拟,3 种汇流方法的相对误差均处于-20%~20%之间。分段 MK 法及逐网格 MCT 法在率定期及验证期的平均相对误差相近,优于逐网格 MK 法。

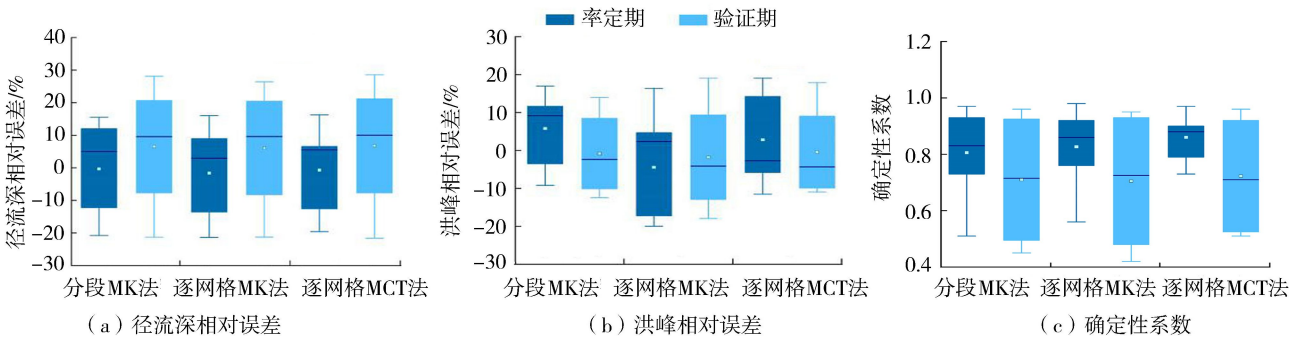


图3 率定期及验证期洪水模拟精度箱线图

Fig.3 Accuracy box plots of flood simulation for periodic rates and verification periods

对于确定性系数,分段 MK 法率定期及验证期的确定性系数分别介于 0.51~0.97、0.45~0.96 之间;逐网格 MK 法的率定期及验证期确定性系数分别介于 0.56~0.98、0.42~0.95 之间;逐网格 MCT 法的率定期及验证期的确定性系数分别介于 0.73~0.97、0.51~0.96 之间,优于其他两种方法。3 种汇流方法对 20140824 次洪水模拟结果确定性系数均较低,依次为 0.45、0.42、0.54,检查发现该洪水过程为双峰洪水且两个峰值之间相隔时间较短,3 种汇流方法第二洪峰模拟值均低于实际峰值,使得径流深模拟值偏小,确定性系数偏低。

20150808 号洪水中分段 MK 法洪峰流量模拟值偏大,逐网格 MK 法模拟值偏小,逐网格 MCT 法洪峰流量模拟情况最优(图 4(a))。如图 4(b)所示,20160624 号洪水中分段 MK 法洪峰流量的模拟值稍高于实测值,相比而言其他两种方法的模拟效果更优。由图 4(c)可知,对于 20200711 号洪水,分段 MK 法及逐网格 MCT 法的径流深模拟结果优于逐网格 MK 法,逐网格 MCT 法洪峰模拟效果优于其他两种方法。如图 4(d)所示,对于 20210701 号洪水,逐网格 MCT 法洪峰流量模拟结果以及峰型模拟情况优于其他两种方法,分段 MK 法及逐网格 MK 法洪峰流量模拟值均偏小。

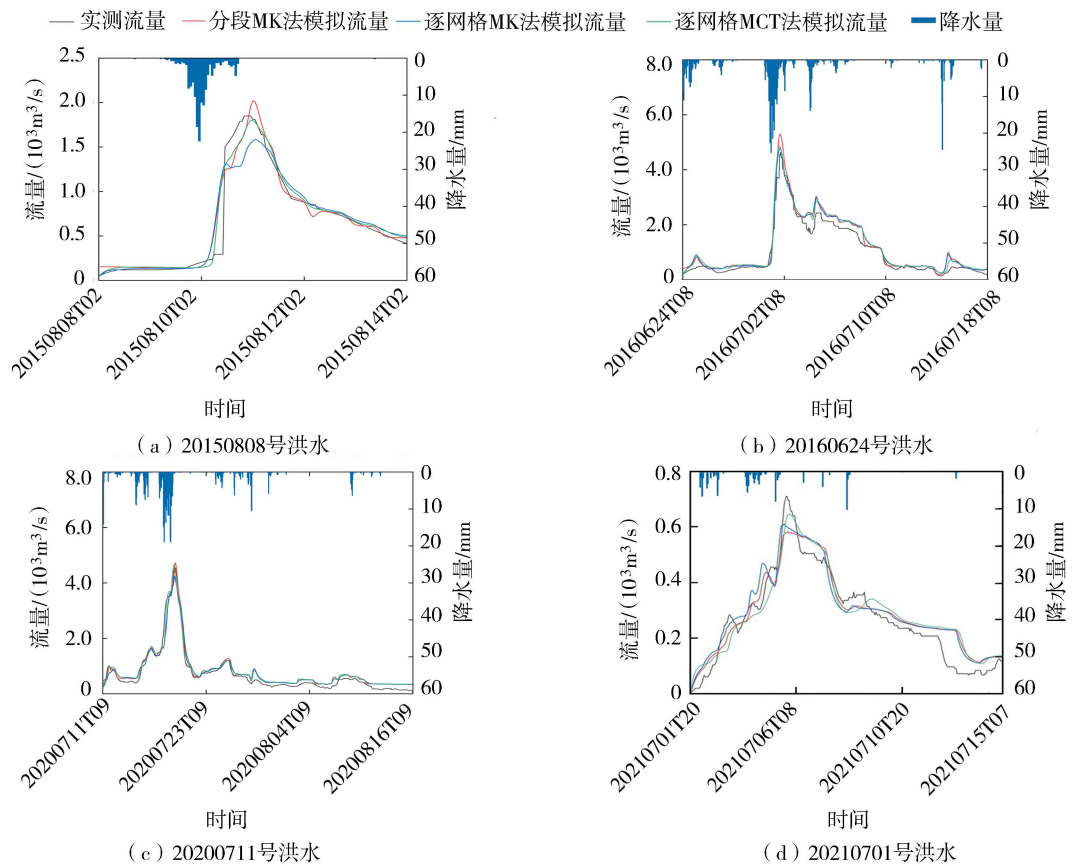


图4 实测与模拟洪水过程线对比

Fig. 4 Comparison of measured and simulated flood process lines

在物理意义上逐网格 MK 法和逐网格 MCT 法比分段 MK 法更加充分地考虑了流域调蓄作用时空分布差异对上游水库泄水汇流过程的影响,同时逐网格 MCT 法在逐网格 MK 法基础上更进一步考虑了流域下垫面河道水力因素的空间分布。

3.2 对流量时空分布的影响

率定期 20160624 号洪水及验证期 20200711 号洪水的水库放水过程如图 5 所示,由于横排头区间面积较小,横排头站的洪水主要以水库泄洪为主。两场洪水的涨洪段主要受佛子岭水库泄水影响,退水段响洪甸水库泄水量逐渐增大,成为影响流域洪水形成的主要成分。

20160624 号洪水及 20200711 号洪水 3 种汇流方法的流量空间分布模拟结果如图 6、图 7 所示。分段 MK 法河道汇流演算无法进行流量计算结果的空间分布展示,其区间方案采用逐网格 MK 法可以反映洪水过程中流域内部降水在流域各网格处计算产生的流量值的变化情况,以及暴雨中心的转移过程。与之相比,逐网格 MK 法及逐网格 MCT 法流量空间分布展示了上游水库对流域流量空间分布的影响。如图 6(a)、7(a)所示,两次降雨产生的洪水事件主要在横排头流域中游,随着洪水过程的进行逐渐转移至下游。20160624 号洪水,2016 年 7 月 1 日 11 时处于涨洪阶段,佛子岭水库和响洪甸水库泄水对下游洪水演算影响相当,泄水量分别为 450.00、407.00 m³/s。2016 年 7 月 2 日 0 时洪峰出现时刻,如图 6(b)(c)佛子岭水库泄水量为 1950.00 m³/s,对下游洪水演算的影响最大。2016 年 7 月 7 日 8 时处于洪水退水阶段,响洪甸水库泄水量为 1010.00 m³/s,影响稍大于泄水量为 810.00 m³/s 的佛子岭水库。对于 20200711 号洪水,洪水起涨时

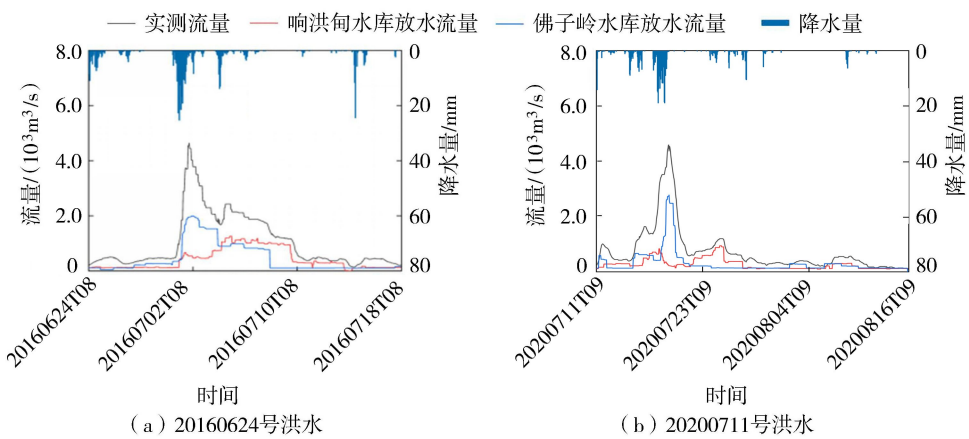


图 5 上游水库放水过程示意图

Fig. 5 Discharge process diagram of upstream reservoir

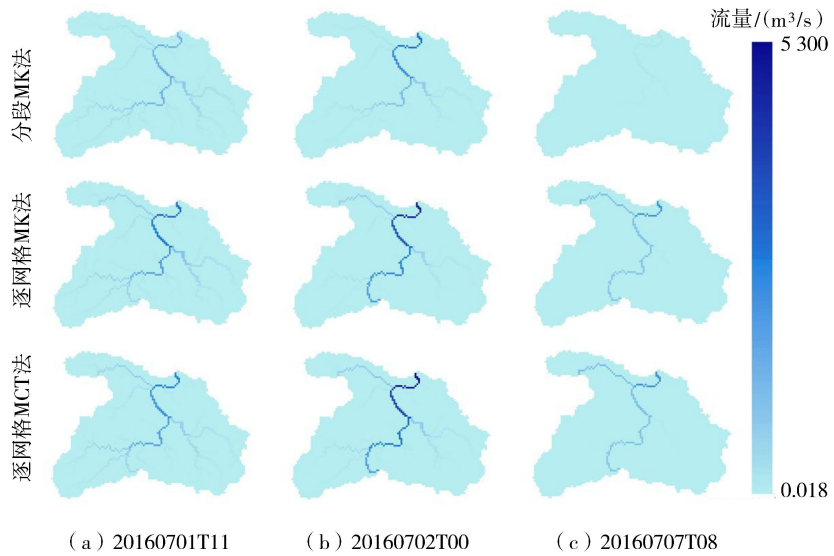


图 6 20160624 号洪水分段 MK 法、逐网格 MK 法、逐网格 MCT 法流量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of discharge for the flood No. 20160624 with segmented MK method, grid-based MK method and grid-based MCT method

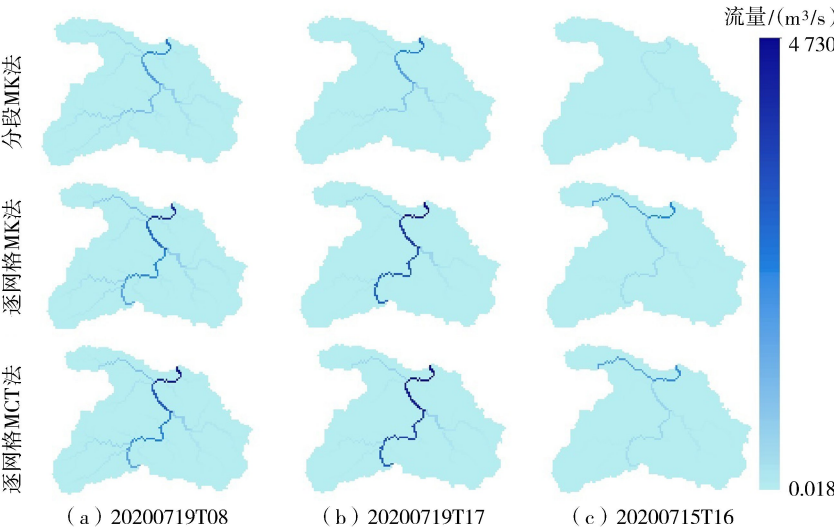


图 7 20200711 号洪水分段 MK 法、逐网格 MK 法、逐网格 MCT 法流量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of discharge for the flood No. 20200711 with segmented MK method, grid-based MK method and grid-based MCT method

刻,流域真实洪水过程发生在靠近上游佛子岭水库处(图7(b)(c))。佛子岭水库下泄网格入流量 $1\,340.00\text{ m}^3/\text{s}$,逐网格MK法、逐网格MCT法库前网格模拟出流量分别为 $1\,341.92$ 、 $1\,338.29\text{ m}^3/\text{s}$ 。随着降雨过程的推移以及佛子岭水库泄水量的增加,洪水逐渐向下游转移。洪峰出现时刻,出口断面河道网格流量达到峰值 $4\,590.00\text{ m}^3/\text{s}$ 。逐网格MK法、逐网格MCT法出口断面网格模拟出流量分别为 $4\,232.00$ 、 $4\,570.00\text{ m}^3/\text{s}$ 。相较而言,逐网格MK法模拟结果偏小,逐网格MCT法模拟结果更优。选取的退水时刻,降水量及佛子岭水库泄水量逐渐减小。响洪甸水库下泄网格入流量为 $942.00\text{ m}^3/\text{s}$,逐网格MK法库前网格模拟出流量为 $935.69\text{ m}^3/\text{s}$,逐网格MCT法库前网格模拟出流量为 $942.05\text{ m}^3/\text{s}$ 。受到响洪甸水库泄水量增加的影响,靠近该水库的支流河道网格流量较上一时段有所增加。

整体来看,相较于分段MK法,逐网格MK法与逐网格MCT法在空间上可以更加真实地反映同一时刻不同位置的上游水库放水对河道汇流影响的差异,同时在时间上两种方案可以反映不同时刻同一水库的放水对河道汇流影响的变化。

4 结 论

- a. 与分段MK法相比,逐网格MK法及逐网格MCT法将上游水库的泄水过程融入网格间的汇流演算过程中,因此在输出流域出口断面流量的同时,两种逐网格汇流计算方法可以输出任意网格单元的流量过程。
- b. 逐网格MCT法在逐网格MK法基础上考虑了流域下垫面河道水力特性的空间分布情况,更进一步提升了流域各网格内流量模拟的精度。但目前逐网格MCT法只将河道网格概化为矩形河道,未考虑河道断面变化对洪水模拟的影响。
- c. 横排头流域3种汇流方法洪峰模拟结果均较好,率定期与验证期的全部洪水的平均洪峰模拟合格率均为100%。逐网格MK法及分段MK法全部洪水的平均径流深合格率均为76.9%,小于逐网格MCT法(84.6%)。整体来看逐网格MCT法全部洪水的平均确定性系数为0.82,优于逐网格MK法(0.79)与分段MK法(0.78),对于受水库泄水影响流域的洪水预报具有较强的适应性和可靠性。

参考文献:

[1] 吴瑞林. 水库对流域环境的影响[J]. 内蒙古水利,2020(2):73-74. (WU Ruilin. Impact of reservoir on watershed environment [J]. Inner Mongolia Water Resources,2020(2):73-74. (in Chinese))

[2] 卓闻涛. 考虑上游水利工程影响的碧流河水库预报调度方式研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[3] 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 QINUO, 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))

[4] 沙永兵,黄迎春,石彬,等. 五强溪水库近坝区洪水预报方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):58-65. (SHA Yongbing, HUANG Yingchun, SHI Bin, et al. Study on flood forecasting method in the near-dam area of Wuqiangxi Reservoir[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):58-65. (in Chinese))

[5] 沈凯琦,赵超,张翔宇,等. 下岸水库对永安溪水文情势的影响分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):174-180. (SHEN Kaiqi, ZHAO Chao,ZHANG Xiangyu,et al. Analysis of the influence of the lower bank reservoir on the hydrological regime of Yongan River [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):174-180. (in Chinese))

[6] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):1-7. (RUI Xiaofang. Reunderstanding of watershed hydrological model [J]. Progress in Water Resources and Hydropower Science and Technology,2018,38(2):1-7. (in Chinese))

[7] 张珂,周佳奇,张企诺,等. 栅格岩溶分布式水文模型[J]. 水资源保护,2022,38(1):43-51. (ZHANG Ke,ZHOU Jiaqi, ZHANG QINUO,et al. Distributed karst hydrological model with grid [J]. Water Resources Conservation,2022,38(1):43-51. (in Chinese))

[8] 罗玉玲,张甜甜,章玉霞,等. 基于网格新安江模型的汇流方法研究[J]. 水利规划与设计,2023(2):101-105. (LUO Yuling,ZHANG Tiantian,ZHANG Yuxia,et al. Research on confluence method of Xin'an River based on grid model [J]. Water Resources Planning and Design,2023(2):101-105. (in Chinese))

[9] 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))

[10] WANG W C, TIAN W C, XU D M, et al. Muskingum models' development and their parameter estimation; a state-of-the-art review [J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(8): 3129-3150.

[11] 罗宇轩, 陈华, 林康聆, 等. 变参数非线性马斯京根分段演算模型研究与应用[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 101-106. (LUO Yuxuan, CHEN Hua, LIN Kangling, et al. Research and application of nonlinear Musjingen piecework model with variable parameters [J]. *Yangtze River of China*, 2021, 52(10): 101-106. (in Chinese))

[12] 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.

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

[14] MAZZETTI C. TOPKAPI 模型与应用指南[M]. 南京: 河海大学出版社, 2014.

[15] PONCE V M, CHANGANTI P V. Variable-parameter Muskingum-Cunge method revisited[J]. *Journal of Hydrology*, 1994(4): 433-439.

[16] JOHNSON D L, MILLER A C. A spatially distributed hydrologic model utilizing raster data structures [J]. *Computers and Geosciences*, 1997, 23(3): 267-272.

[17] TODINI E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(6): 1645-1659.

[18] 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.

[19] 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))

[20] YAO C, ZHANG K, YU Z, et al. Improving the flood prediction capability of the Xin' anjiang model in ungauged nested catchments by coupling it with the geomorphologic instantaneous unit hydrograph [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 1035-1048.

[21] WANG G T, YAO C, OKOREN C, et al. 4-Point FDF of Muskingum method based on the complete St Venant equations [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 324(1): 339-349.

[22] 童睿轩, 吴勇拓, 王春阳, 等. 基于自相似河网结构的中小流域蓄量消退系数计算方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 17-25. (TONG Ruixuan, WU Yongtuo, WANG Chunyang, et al. Study on estimating method of confluence parameter for small and medium-sized watershed based on self-similar river networks [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 17-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 09 - 04 编辑: 刘晓艳)