

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.003

无资料小水库影响下的中型水库入库洪水模拟

李巧玲¹, 马亚楠², 李致家¹, 朱跃龙³, 刘志雨^{1,4}, 章彩霞⁵

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 淮河水利委员会水文局(信息中心), 安徽 蚌埠 233001;
3. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100; 4. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心), 北京 100053;
5. 安徽省黄山市水文水资源局, 安徽 黄山 245000)

摘要: 为研究小水库蓄泄作用对中型水库入库洪水过程的影响,以分布式新安江模型为基础,将子流域单元内的小水库聚合为一个虚拟水库对模型汇流结构进行改造。以安徽省重点中型水库——东方红水库为例,采用不考虑小水库影响的分布式新安江模型对 2014—2017 年共 14 场发生在汛初、汛中和汛末的洪水进行模拟,结果显示,模型能够较好地模拟汛中比较大的场次洪水,对于汛末洪水的模拟效果稍差。选择发生在汛末的 2015090420 号和 2017070101 号洪水,采用考虑小水库影响的分布式新安江模型模拟上游五里源和高塌水库蓄泄对东方红入库洪水的影响,对比分析模拟结果可知,子单元流域面积内加入虚拟水库的新安江模型,在径流深、洪峰和纳什效率系数方面模拟结果均优于新安江模型,径流深相对误差分别降低了 23.2%、18.4%,洪峰相对误差分别降低了 52.2%、53.5%,纳什效率系数提高了 0.92、0.42。

关键词: 中型水库; 入库洪水; 虚拟水库; 无资料小水库; 新安江模型; 子流域单元

中图分类号: P338.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)03-0213-07

Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs

LI Qiaoling¹, MA Yanan², LI Zhijia¹, ZHU Yuelong³, LIU Zhiyu^{1,4}, ZHANG Caixia⁵

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology Bureau (Information Center) of the Huaihe River Commission, Bengbu 233001, China;
3. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;
4. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), MWR, Beijing 100053, China;
5. Huangshan Bureau of Hydrology and Water Resources, Anhui Province, Huangshan 245000, China)

Abstract: Based on the distributed Xin'anjiang model, the model concentration structure was modified by aggregating the small reservoirs within the sub-basin into a virtual reservoir, aiming to study the storage and discharge effect of small reservoirs on the flood process. Taking Dongfanghong Reservoir, a key medium-sized reservoir in Anhui Province, as an example, 14 floods occurred at the beginning, middle and end of flood season during 2014-2017 were simulated by the distributed Xin'anjiang model, which neglected the influence of small reservoirs. It is shown that the model can well simulate relatively large floods in the middle flood season, but not so well for floods in the end of flood season. Taking two flood events occurred in the end of flood season, No. 2015090420 and No. 2017070101, as examples, the distributed Xin'anjiang model considering the influence of small reservoirs was employed to simulate the storage and discharge effects of upper small reservoirs (Wuliyan and Gaoe reservoirs) on the floods for Dongfanghong Reservoir. According to the comparison, it is found that the results of the Xin'anjiang model with the virtual reservoir in the sub-basin are better than those of the Xin'anjiang model, with the relative error of runoff depth decreased by 23.2% and 18.4% respectively, the relative error of flood peak decreased by 52.2% and 53.5% respectively, and the Nash efficiency coefficient increased by 0.92 and 0.42 respectively.

Key words: medium-sized reservoirs; reservoir floods; virtual reservoirs; ungauged small reservoirs; Xin'anjiang model; sub-basins element

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508104); 江苏水利科技项目(2018055)
作者简介: 李巧玲(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水文预报研究。E-mail: liqiaolinghhu@hhu.edu.cn
引用本文: 李巧玲, 马亚楠, 李致家, 等. 无资料小水库影响下的中型水库入库洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 213-219.
LI Qiaoling, MA Yanan, LI Zhijia, et al. Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 213-219.

根据《中国统计年鉴—2020》,我国有水库 98 112 座,其中大型水库 744 座,中型水库 3 978 座,小型水库 93 390 座。目前大型水库均有洪水预报模型及预报方案,中型水库大多没有成熟的预报模型和方案。随着国民经济的发展,中型水库对准确及时的预报需求逐渐增强,开展中型水库入库洪水预报研究,可为保障人民群众生命财产安全,发挥水库综合效益提供重要技术支撑^[1-3]。

小水库对大流域的作用不显著,但对小流域的作用不容忽视。在汛初期,小水库拦蓄径流,削峰错峰,减少洪涝灾害;随着降水增多,小水库蓄水量达到最大蓄水能力,此时若继续降水,小水库来多少泄多少,基本不蓄水;到了汛末和非汛期,为了增加灌溉面积,削减骨干水库供水高峰,缓解旱灾,小水库以拦蓄洪水为主^[4-5]。根据以上特点,假设小水库在水系上的分布方式为并联形式,将小水库的作用分为拦蓄径流和调节径流。

小水库一般无资料或者资料比较匮乏,很难获得流量、溢洪道泄洪以及汛期水库实际运行情况的资料^[6-10]。此前大多学者将流域内水库聚合为一个水库^[11-14],难以考虑小水库在空间上的聚集程度^[15]。本文将子流域单元内的小水库聚合为一个虚拟水库,并对模型汇流结构进行改造,考虑同一时刻不同子流域单元内水库在空间上表现出不同的蓄泄形态,即同一时刻有的子流域单元以拦蓄为主、有的子流域单元无影响(来多少泄多少)、有的子流域单元以泄流为主。将改造前后的模型应用于中型水库——东方红水库的入库洪水模拟,并进行分析比较,量化流域上游无资料小水库蓄泄对中型水库入库洪水的影响,以期提高洪水模拟的精度。

1 研究区域和数据

东方红水库为年调节水库,为安徽省重点中型水库,位于新安江水系二级支流东亭河(虞山溪)上。水库坝址以上流域集水面积 60 km²,主河道长 11.8 km,平均坡降 21.0‰。建库以来历史最高水位 292.89 m(1991 年),最大出库流量 383 m³/s(1991 年)。流域气候常年湿润,降雨比较充沛,河道坡降陡,洪水汇流速度快,是典型的山溪性河流。东方红水库坝址以上流域设有半源、芦村、丰登、东方红共 4 个雨量站。流域内的五里源和高塌水库是小(二)型水库,难以获取水库水位-库容-泄流曲线、汛期泄水流量、水库的调度运行规则等。流域水系、小水库及雨量站网分布如图 1 所示。

中型水库对中小流域的调蓄作用相对较强、集水面积较大,运行过程中具有一定的调度规则,水库资料相对较齐全。东方红水库汛期为每年 5 月 1 日至 9 月 30 日,主汛期为 5 月 1 日至 8 月 31 日,后汛期为 9 月 1—30 日,非汛期为 10 月 1 日至翌年 4 月 30 日。水库出库总流量包括大坝下泄流量和渠道发电流量,渠道发电流量采用历年实测水位-流量关系曲线查算。根据流域查勘搜集到的《东方红水库水文资料整编成果表》,笔者整理出 2014—2017 年东方红水库的逐日、逐时段出库流量数据。基于水量平衡原理,采用水库水位-库容关系曲线进行线性插值,反推计算出时段平均入库流量作为东方红水库的时段平均入库流量。

2 模型原理与应用

2.1 模型构建思路

三水源新安江模型^[16]将流域划分为多个子流域单元,每个子流域单元的模型结构一致,属于分布式概念性水文模型,与基于栅格的分布式水文模型相比,具有输入数据少、参数少、使用简单、运算速度快等特点,在我国湿润和半湿润地区的洪水预报中应用广泛^[17-22]。本文以新安江模型为基础,对汇流结构进行改造,增加考虑小水库蓄泄影响的虚拟水库模块,如图 2 所示。

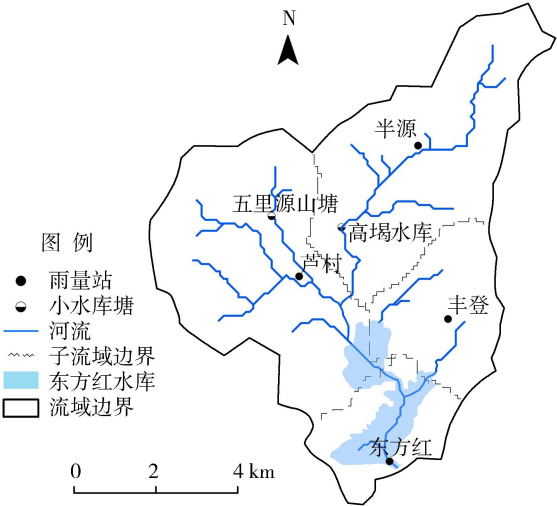


图 1 东方红水库以上流域概况
Fig.1 An overview of upper basin of Dongfanghong Reservoir

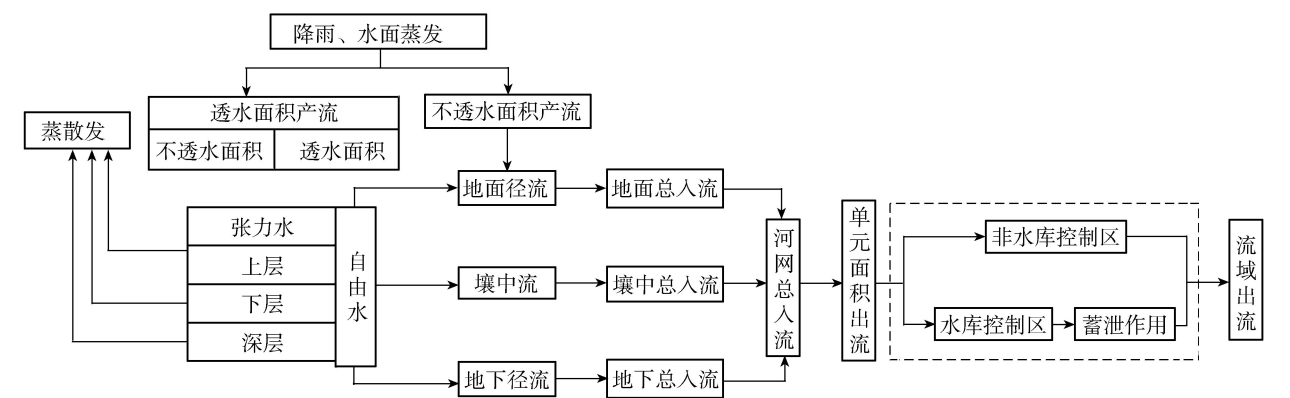


图 2 加入虚拟水库模块的新安江模型结构

Fig.2 Xin'anjiang model structure with virtual reservoir module

2.2 虚拟水库模块

对于无资料小水库,具体思路:(a)观察水库、雨量站、水系特征以及流域分水岭,将流域划分为若干个子流域单元;(b)将子流域单元面积划分为虚拟水库控制区和非水库控制区(天然流域),将子流域单元内的所有小水库作为一个虚拟水库,提取各小水库以上流域集水面积,统计小水库库容,将各小水库控制的集水面积、库容求和,以此作为虚拟水库的集水面积和库容。(c)非水库控制区的流量正常出流进入河道,水库控制区的流量需经过虚拟水库的蓄泄作用,之后进入河道进行演算。

子流域单元内若虚拟水库蓄满,正常出流;若虚拟水库未蓄满,在各子流域单元内,按照虚拟水库控制区的集水面积占子流域单元总面积的比例分割流量,水库控制区的流量先补充虚拟水库,至虚拟水库蓄满后,正常出流。经过虚拟水库影响后的 t 时刻流量 Q'_t 为

$$Q'_t = \begin{cases} Q_t & V_{t-1} = V_{\max} \\ Q_t - Q_t \frac{a}{A} & V_{t-1} + Q_t \frac{a}{A} \Delta t \leq V_{\max} \\ Q_t - \frac{V_{\max} - V_{t-1}}{\Delta t} & V_{t-1} + Q_t \frac{a}{A} \Delta t > V_{\max} \end{cases} \tag{1}$$

式中: Q_t —— t 时刻子流域单元出流计算结果, m^3/s ; V_{t-1} —— $t-1$ 时刻子流域单元内虚拟水库的蓄水量, 万 m^3 ; $V_{\max}$ ——子流域单元内虚拟水库总库容, 万 m^3 ; a ——子流域单元内水库控制区的面积, km^2 ; A ——子流域单元面积, km^2 ; Δt ——计算时段长,取 1 h 。

假设预热期(15 d)开始时刻水库初始蓄水量为 $V_{\max}$ 的 $1/3$,在预热期进行日模型计算,则预热期末(场次洪水计算初始时刻)虚拟水库的蓄水量 V_0 为

$$V_0 = \frac{1}{3} V_{\max} + \frac{a}{A} \Delta t \sum Q_t \tag{2}$$

2.3 流域划分与洪水选取

考虑雨量站点、小水库位置及水系特征等情况,将东方红水库以上流域划分为半源、芦村、丰登、东方红共 4 个子流域单元(图 1)。东方红、半源、芦村、丰登子流域的面积分别为 7 km^2 、 23 km^2 、 21 km^2 、 9 km^2 ,至出口断面河段数分别为 0、2、1、0。

选取 2014—2017 年共 14 场洪水进行流域次洪模拟,其中前 9 场洪水用于模型参数率定,后 5 场用于检验。由表 1 可知,东方红以上流域的场次洪水主要集中在 5—7 月 3 个月。14 场洪水中有 3 场汛初洪水,9 场汛中洪水,2 场汛末洪水。

3 结果与分析

3.1 日模型模拟结果与分析

日模型计算主要是为次洪模型计算提供初始状态值,本文采用 2014—2017 年的逐日水文气象数据率定新安江日模型参数,选择径流深相对误差(E_r)和纳什效率系数(N)作为评判标准进行分析。东方红水库以

上流域日模型参数率定结果见表2,模拟结果统计特征值见表3。由表3可知,新安江日模型模拟的 E_r 仅有1场在 $\pm 20\%$ 外,均值为 -6.19% 。日模型模拟的 N 仅有一场低于0.7,其均值为0.75。

表1 东方红以上流域洪水场次基本信息

Table 1 Basic information of flood events for the upper basin of Dongfanghong Reservoir

序号	洪号	类型	开始时间	结束时间	峰现时间
1	2014051313	汛初	20140513T030000	20140516T110000	20140514T010000
2	2014051611	汛中	20140516T110000	20140522T200000	20140517T030000
3	2014070506	汛中	20140705T060000	20140709T200000	20140705T210000
4	2014071208	汛中	20140712T080000	20140722T200000	20140715T120000
5	2015060708	汛中	20150607T080000	20150610T170000	20150608T050000
6	2015090420	汛末	20150904T200000	20150907T200000	20150905T060000
7	2016040508	汛初	20160405T080000	20160409T220000	20160407T060000
8	2016042001	汛中	20160420T010000	20160425T140000	20160421T030000
9	2016052708	汛中	20160527T080000	20160530T200000	20160528T100000
10	2016053021	汛中	20160530T200000	20160605T120000	20160601T120000
11	2016061817	汛中	20160618T170000	20160624T210000	20160619T190000
12	2017061106	汛初	20170611T060000	20170617T220000	20170612T000000
13	2017062301	汛中	20170623T010000	20170628T080000	20170624T070000
14	2017070101	汛末	20170701T010000	20170703T220000	20170702T050000

注:汛初指汛期偏前的时期,汛中指汛期偏中的时期,汛末指汛期偏后的时期。

表2 东方红水库以上流域新安江模型参数率定结果

Table 2 Parameters of Xin'anjiang model for the upper basin of Dongfanghong Reservoir

模型	流域蒸发 折算系数	深层蒸散发 折算系数	张力水蓄水容量 曲线指数	流域平均张力 水容量/mm	上层张力 水容量/mm	下层张力 水容量/mm	不透水面积占 全流域面积的比例	自由水蓄 水容量/mm
日模型	0.603	0.284	0.15	120	20	60	0.01	10
次模型	0.603	0.284	0.15	120	20	60	0.01	38.622
模型	自由水蓄水容量 曲线指数	地下水 出流系数	壤中流 出流系数	地下水 消退系数	壤中流 消退系数	马斯京根法 流量比重系数	河网蓄水 消退系数	滞时
日模型	1.388	0.137	0.563	0.997	0.727	0.42	0.3	0
次模型	1.388	0.057	0.643	0.953	0.133	0.16	0.707	0

综合对比发现,2015 年的 R_s 偏小, N 值偏低。经分析发现:(a)由于半源、芦村和丰登站点的测雨设备出现故障,造成降雨资料缺失,年鉴记录中3个站点的降雨资料分别移用了临近站芳田和金家的平均雨量、金家雨量以及东方红和金家的平均雨量表示3个站点缺失的雨量数据,雨量资料的不准确导致模型对整个过程模拟较差。(b)由于2015年属于丰水年,水位资料波动幅度较大,在涨水段和洪峰过后的点距中出现大量正负相间的流量值,根据涨洪段的趋势采用线性插值方法对异常进行修正,也存在一定偏差。

综合考虑 R_s 和 N 两项指标,日模型总体上能够较好地模拟东方红水库以上流域的日降雨径流过程。模型模拟结果可信度高,可为次模型模拟提供初始状态。

3.2 次模型模拟结果与分析

东方红水库以上流域次模型参数率定结果见表2(次模型)。表4为东方红水库以上流域次洪模型计算结果特征值。由表4可知:

a. 从 E_r 角度看,率定期相对误差在 $\pm 20\%$ 之内的占比为8/9,合格率为88.9%,相对误差均值为 -3.3% ,绝对值均值16.6%;验证期在 $\pm 20\%$ 之内的占比为4/5,合格率为80%,相对误差均值为10.5%、绝对值均值为13.5%。

表3 2014—2017 年东方红水库以上流域日径流
模拟结果特征值

Table 3 Characteristics of daily runoff simulation
results for upper basin of Dongfanghong
Reservoir during 2014-2017

年份	P/mm	R_o/mm	R_s/mm	$E_r/\%$	N
2014	1 801.3	1 323.9	1 396.6	5.49	0.75
2015	2 210.7	2 313.8	1 746.6	-24.52	0.51
2016	2 388.8	2 269.0	2 111.4	-6.94	0.82
2017	1 883.2	1 323.9	1 481.1	1.22	0.91

注: P 为降雨量; R_o 为实测径流深; R_s 为模拟的径流深。

表 4 东方红水库以上流域次模型计算结果特征值

Table 4 Characteristics of flood simulation results with sub model for upper basin of Dongfanghong Reservoir										
时期	洪号	P/mm	R_o/mm	$q_{o,\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	R_s/mm	$E_r/\%$	$q_{s,\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$E_p/\%$	E_{tp}/h	N
率定期	2014051313	65.9	75.4	49.2	70.1	-7.0	51.0	3.6	-1	0.83
	2014051611	79.3	102.0	57	96.3	-5.6	59.0	3.5	1	0.83
	2014070506	70.9	95.4	65	77.5	-18.8	42.9	-33.9	2	0.85
	2014071208	201.6	218.6	63	190.2	-13.0	82.2	30.5	-1	0.68
	2015060708	153.6	167.0	121	136.3	-18.4	122.2	1.0	1	0.85
	2015090420	133.5	67.3	92.4	107.4	59.6	189.7	106.2	1	-0.67
	2016040508	113.2	128.2	78	121.1	-5.5	72.8	-6.7	0	0.97
	2016042001	153.2	179.4	83.1	146.3	-18.5	63.3	-23.8	0	0.83
检验期	2016052708	89.2	104.3	132	101.4	-2.7	135.0	2.3	1	0.94
	2016053021	152.0	172.5	229	159.8	-7.4	185.3	-19.1	0	0.95
	2016061817	222.5	201.6	179	216.9	7.6	176.5	-1.4	1	0.87
	2017061106	91.8	116.0	28	126.1	8.7	34.7	23.8	0	0.86
	2017062301	216.2	176.5	282	211.5	19.8	282.8	0.3	0	0.81
	2017070101	88.6	61.1	32.5	75.6	23.8	56.4	73.4	0	0.24

注: $q_{o,\max}$ 为实测洪峰流量; $q_{s,\max}$ 为模拟洪峰流量; E_p 为洪峰相对误差; E_{tp} 为峰现时间误差。

b. 从 E_p 角度看,率定期在 $\pm 20\%$ 之内的占比为 5/9,合格率为 55.6%,相对误差均值 9.2%、绝对值均值 23.5%;验证期在 $\pm 20\%$ 之内的占比为 3/5,合格率为 60%,相对误差均值 15.4%,绝对值均值 23.6%。究其原因,率定期 2014070506 和 2016042001 号洪水模拟洪峰偏低,峰值附近入库流量呈锯齿状,插值得到的流量可能在某个时刻处于锯齿尖端,从而导致插值出的实测流量偏大。

c. 从 E_{tp} 角度看,率定期在 $\pm 3\text{ h}$ 之内的占比为 9/9,合格率为 100%,误差均值 0.4,绝对值均值 0.9;验证期峰现时间在 $\pm 3\text{ h}$ 之内的占比为 5/5,合格率为 100%,误差均值 0.2,绝对值均值 0.2。表明模拟的峰现时间与反推入流洪峰所对应的峰现时间一致,模拟效果较优。

d. 从 N 角度看,率定期除 2015090420 号和 2014071208 号洪水外,其余场次均在 0.83 以上,平均为 0.68,0.5 以上的场次占比 8/9;验证期除 2017070101 号洪水外,其余场次均在 0.81 以上,平均为 0.75,0.5 以上的场次占比 4/5。

从整体上看,径流深相对误差合格率为 85.7%,洪峰流量相对误差合格率为 57.1%;峰现时间合格率 100%,纳什效率系数均值 0.7。径流深和峰现时间模拟较好,纳什效率系数和洪峰较差,主要的原因一方面是入库流量根据出库流量反推,另一方面,汛末期受到小水库的影响较大。

3.3 小水库影响前后模拟结果对比分析

从表 1 和表 4 可以看出,新安江模型能够较好地模拟东方红水库以上流域汛中期比较大的场次洪水,对于汛末洪水的模拟效果稍差,因此选择 2015090420 号和 2017070101 号洪水采用虚拟水库的方法模拟上游五里源和高塌水库对东方红水库入库场次洪水的影响。表 5 为不考虑小水库影响和考虑小水库影响后的东方红水库入库流量模拟结果。图 4 为不考虑小水库影响和考虑小水库影响汛末期场次洪水过程模拟图。

表 5 小水库影响前后东方红水库入库洪水模拟结果比较

Table 5 Comparison between flood simulation results for Dongfanghong Reservoir before and after the influence of small reservoirs										
洪号	类型	R_o/mm	$q_{o,\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	R_s/mm	$E_r/\%$	$q_{s,\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$E_p/\%$	E_{tp}/h	N	
2015090420	不考虑小水库	67.3	92	107.4	59.6	189.7	106.2	1	-0.67	
	考虑小水库	67.3	92	91.8	36.4	141.7	54.0	1	0.25	
2017070101	不考虑小水库	61.1	33	75.6	23.8	56.4	73.4	0	0.24	
	考虑小水库	61.1	33	64.4	5.4	39.0	19.9	13	0.66	

从图 3 和表 5 可以看出,考虑小水库蓄泄影响下的洪水预报模拟过程比新安江模型模拟过程效果好。从洪量角度看,2015090420 号洪水基于虚拟水库的模拟方法计算出的 E_r 比新安江模拟降低了 23.2%,2017070101 号洪水考虑小水库影响后 E_r 低于 10%,达到了允许误差在 20% 的合格标准,而新安江模型模拟不合格。

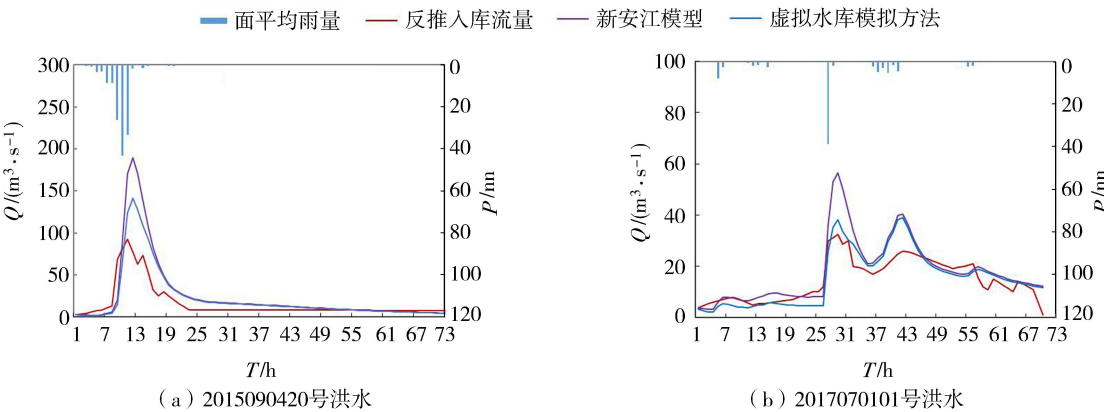


图3 小水库影响前后场次洪水模拟过程比较

Fig. 3 Comparison between flood processes before and after the influence of small reservoirs

从洪峰角度看,2015090420 号洪水基于虚拟水库的模拟方法计算出的 E_p 比新安江模拟降低了 52.2%, 2017070101 号洪水考虑小水库影响后 E_p 在 20% 的许可范围内,而新安江模拟出的 E_p 为 73.4%,大大高于 20% 的许可误差。

从峰现时间角度看,2015090420 号洪水考虑基于虚拟水库的模拟方法和新安江模拟的峰现时间一致,而 2017070101 号洪水峰现时间偏差较大,主要原因是该场次洪水为多峰洪水,峰值接近,实测第一个主峰为峰现时间,模拟第二个主峰稍偏大为峰现时间,从而导致偏差较大。从 N 角度看,2 场汛末期场次洪水基于虚拟水库的模拟方法计算出的 N 均好于新安江模拟结果。

综上,子单元流域面积内基于虚拟水库的改进新安江模型方法应用在汛末的场次洪水模拟中,在径流深、洪峰和纳什效率系数方面模拟结果均优于新安江模型,表明单元流域内虚拟水库的方法发挥了作用,可提高模拟精度。

4 结 语

结合雨量站点、小水库位置等多源信息划分子流域单元,将子流域单元内的小水库聚合为一个虚拟水库在汇流上进行改造,构建了虚拟水库模块,并与分布式的概念性三水源新安江模型进行耦合计算,能够考虑到小水库在空间上聚集程度的不同及其蓄泄组合的动态变化过程。在东方红水库的应用表明,考虑小水库蓄泄影响的洪水模拟过程比新安江模型模拟过程效果好,对于汛末的洪水更为明显,在径流深、洪峰和纳什效率系数等指标方面较优,模拟精度得到提高。研究成果可为无资料小水库影响下的中小河流洪水预报提供借鉴。值得注意的是,本文假设小水库在水系上的分布方式为并联形式,没有考虑相互间的影响,后续研究需考虑不同小水库之间的串并联关系,厘清其中的水力联系。

参考文献:

[1] 王玉虎. 三水源新安江模型在中小型水库洪水预报中的应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.

[2] 冯娜. 考虑上游中小型水库影响的上犹江水库洪水预报研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[3] 詹新焕,王立辉,张明芳,等. 龙角山水库入库洪水实用预报方法对比研究[J]. 水电能源科学,2021,39(1):75-78. (ZHAN Xinhuan, WANG Lihui, ZHANG Mingfang, et al. A comparative study on practical forecasting methods of flood in Longjiaoshan reservoir[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2021, 39(1): 75-78. (in Chinese))

[4] 马亚楠. 考虑库塘坝影响的中小河流洪水预报研究[D]. 南京:河海大学,2020.

[5] HABETS F, MOLENAT J, CARLUER N, et al. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: a review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 850-867.

[6] 温雪莹,梁国华,何斌. 玉石水库影响下的碧流河水库洪水预报方法[J]. 水电能源科学,2018,36(2):68-84. (WEN Xueying, LIANG Guohua, HE Bin. Flood forecasting method of Biliuhe reservoir under the influence of Yushi Reservoir[J]. Water Resource and Power, 2018,36(2):68-84. (in Chinese))

[7] 孙新国,彭勇,张小丽,等. 基于聚合水库蓄放水模拟的洪水预报研究[J]. 水利学报,2017,48(3):308-316,324. (SUN Xinguo, PENG Yong, ZHANG Xiaoli, et al. A method for flood forecasting based the operation chart of aggregated reservoir

- [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(3):308-316,324. (in Chinese))
- [8] 马琴, 刘懿, 孟长青, 等. 基于虚拟水库模型的无资料地区小流域山洪预警方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6):54-57. (MA Qin, LIU Yi, MENG Changqing, et al. Method of mountain flood warning in small watershed without data based on virtual reservoir model[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2019, 37(6):54-57. (in Chinese))
- [9] 韩通, 李致家, 刘开磊, 等. 山区小流域洪水预报实时校正研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 208-214. (HAN Tong, LI Zhijia, LIU Kailei, et al. Research on real-time correction method of flood forecasting in small mountain watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(3): 208-214. (in Chinese))
- [10] 黄薇, 张欣, 孙映宏, 等. 无调控小水库群对寿昌江流域洪水预报的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 51-53. (HUANG Wei, ZHANG Xin, SUN Yinghong, et al. Influenced of unregulated small reservoirs on flood Forecasting in Shouchangjiang Basin[J]. Water Resource and Power, 2019, 37(6): 51-53. (in Chinese))
- [11] GUNTNER A, KROL M S, DE ARAUJO J C, et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in arge data-scarce semiarid region[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques, 2004, 49(5): 901-918.
- [12] PAYAN J, PERRIN C, ANDREASSIAN V, et al. How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3):380-384.
- [13] 葛于晋. 考虑中小水库影响的门楼水库洪水预报调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [14] 孙新国. 水利工程影响下的洪水预报及历史暴雨洪水重现研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [15] 崔欢欢, 梁国华, 何斌. 改进的 TOMODEL 模型在门楼水库洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 65-69. (CUI Huanhuan, LIANG Guohua, HE Bin. Flood forecasting research of Menlou Reservoir based on modified TOMODEL [J]. Water Resource and Power, 2018, 36(1): 65-69. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] FANG Yuanhao, ZHANG Xingnan, CORBARI C, et al. Improving the Xin'anjiang hydrological model based on mass-energy balance[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21: 3359-3375.
- [18] 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))
- [19] 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))
- [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] 龚珺夫, 陈红兵, 朱芳, 等. 新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 581-594, 650. (GONG Junfu, CHEN Hongbing, ZHU Fang, et al. Application of Xin'anjiang Model in the flow prediction of ungauged small- and medium-sized catchments in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 581-594, 650. (in Chinese))
- [22] 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))

(收稿日期:2021-04-01 编辑:刘晓艳)