

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0094

石彬, 李巧玲, 王越, 等. 考虑暴雨中心的子流域划分在洪水预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 944-952, 965. SHI B, LI Q L, WANG Y, et al. Application of sub-basin delineation method considering rainstorm center in flood forecasting[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 944-952, 965. (in Chinese)

考虑暴雨中心的子流域划分在洪水预报中的应用

石彬, 李巧玲, 王越, 李旻喆, 李致家, 黄迎春

(河海大学水文水资源学院, 南京 210024)

摘要:为研究降雨分布不均对水库近坝区洪水预报精度的影响,以五强溪近坝区流域为研究区域,选取 2014—2020 年 20 场历史洪水资料,采用反距离权重法绘制流域暴雨中心图,并据此进行子流域划分,其中,13 场洪水用于模型率定,7 场洪水用于模型验证。选取 2021 年 4 场洪水进行检验,对比分析仅依据自然子流域划分和考虑暴雨中心的洪水预报结果。结果表明:两种子流域划分方法在其最优参数下的洪水模拟精度相似,考虑暴雨中心划分的洪水模拟确定性系数均值为 0.83,略高于仅依据自然子流域划分洪水模拟确定性系数,4 场洪峰误差均在 10% 以内,洪量误差均在 20% 以内,达到了甲级精度标准,说明考虑暴雨中心对子流域进行划分是合理的。

关键词: 水库近坝区流域; 暴雨中心; 子流域划分; 新安江模型; 洪水预报

中图分类号: TV214; P338.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



准确可靠的洪水预报在防洪决策中起着重要作用^[1],近坝区时空分布不均的降雨所形成的洪水^[2]使得传统的预报方案通常难以对洪水做出有效的预报,流域面降雨的非均匀性是影响洪水预报精度的一个重要因素,一场降雨落在流域不同位置的下垫面中产汇流情况也不尽相同,降雨分布不均问题可以在子流域划分^[3-6]过程中考虑。

国内外学者对子流域划分方法进行大量研究。Jong-Gun 等^[7]研究认为,子流域划分对水文模拟结果的影响大于模型参数的影响,而且子流域数量的多少同样影响模拟精度。叶爱中等^[8]提出了一个新的从 DEM 直接提取河网与划分子流域的方法来确定流域中每个网格的流向。Hüseyin Akay 等^[9]以土耳其的 Gokirmak 和 Kocanaz 两相邻地区为研究区域,探讨了子流域划分对无资料流域水文参数地区水文特征曲线估算工作的影响。降雨空间分布对洪水预报精度的影响很大,是子流域划分中需要考

虑的重要因素,但鲜有学者进行相关研究。一次降雨过程在流域面上分布差异很大,可能局部暴雨频发,单一的降雨输入过程难以描述降雨空间分布的不均匀性,给洪水预报工作带来了巨大的挑战^[10]。

为了考虑降雨分布不均对洪水预报精度的影响,构建数字河网模型,结合降雨资料制作暴雨中心图,为子流域划分提供依据;将三水源新安江模型分布式^[11-14]结构应用于五强溪近坝区流域的洪水预报^[15-19],为近坝区子流域划分与洪水预报提供新的思路和方法。

1 研究区流域概况

五强溪近坝区流域位于湖南省西北部,流域面积 8 033 km²,属亚热带季风气候,年平均降雨量约 1 500 mm,多年平均流量 2 040 m³/s,实测最大流量 27 000 m³/s,年径流系数大于 0.4,地下水位较高,包气带薄,土壤比较湿润,属于典型的蓄满产流,暴雨

收稿日期: 2022-01-25 修回日期: 2022-07-11 网络出版时间: 2022-09-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20220927.1459.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508104)

作者简介: 石彬(1996—),男,河北雄县人,主要从事水文预报和流域水文模型研究工作。E-mail: 201301010025@hhu.edu.cn

通信作者: 李巧玲(1982—),女,河南许昌人,副教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail: liqiaolinghu@hhu.edu.cn

中心多集中在流域的中下游库区附近。五强溪水库是流域下游控制性水库,五强溪近坝区流域选取河溪、浦市、高砌头 3 个控制站作为入流,以五强溪坝上水文站作为流域出口,浦市—五强溪区间河道长 160 km,沅陵到强溪坝上区域均可视为水库库区,库区面积占比较大,当上游降雨、水库开闸放水时,上游来水汇入库区的时间短,汇流迅速,突发性强。库区一旦发生短时暴雨,降雨落在库区水面上直接产流,与其上游来流遭遇会使坝前水位迅速升高,洪水预报难度大。

2 子流域划分方法

2.1 流域提取流程

采用地理空间数据云里 SRTMDEM 90M 分辨率原始高程数据,获取的原始 DEM 数据图幅较大,需要进行填洼、流向计算、流量计算、河网提取等一系列处理^[20],提取五强溪近坝区流域基本流域单元图方可对子流域进行划分。其中, Jenson

和 Domingue 于 1988 年提出的洼地处理方法应用最为广泛,主要包括两个部分:洼地标定及抬升算法与平坦栅格增高处理,流向计算则采用 D8 法。

2.2 暴雨中心图制作

暴雨中心图为子流域划分提供依据,制作需进行空间确定性插值,采用反距离权重法进行插值^[21-23]。插值原理:即离得近的两个物体,它们的性质就越相似,反之,相似性越小。分析所选全部场次洪水,统计每场洪水每个站点的时段降雨资料,求得该场洪水每个站点 24 h 平均雨量,将水文、雨量站作为离散点,雨量值作为插值数据,使用 IDW 插值法处理便可完成暴雨中心图绘制,选取其中 3 场洪水作为代表,见图 1,根据每个雨量站点的降雨数据,插值计算得到流域空间上的雨量分布;利用颜色表示雨量的大小,颜色越蓝代表雨量越大,颜色越红代表雨量越小,暴雨中心图深蓝色的圈状区域即暴雨中心位置。

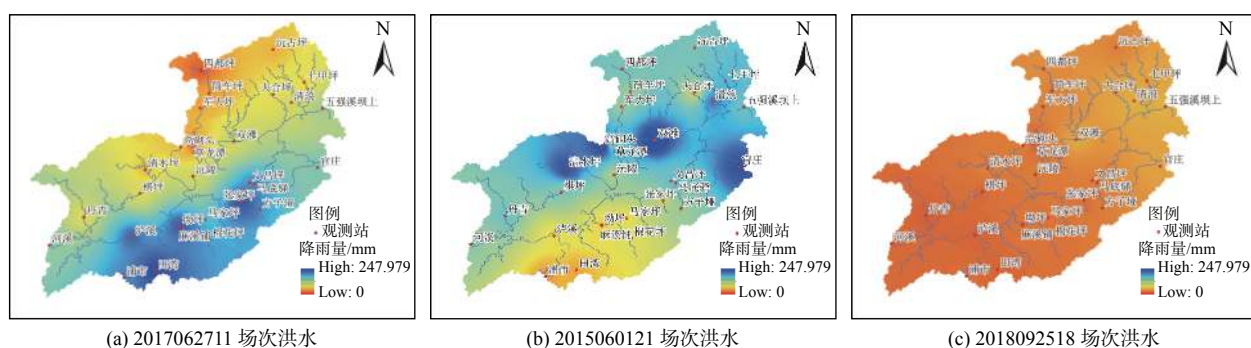


图 1 IDW 绘制的暴雨中心图

Fig. 1 Storm center map made by Inverse Distance Weighted method

图 1(a)为 2017062711 场次洪水的暴雨中心图,降雨时段长 50 h,暴雨中心位于浦市、坳坪和张家坪附近;图 1(b)为 2015060121 场次洪水的暴雨中心图,降雨时段长 70 h,暴雨中心位于高砌头、双滩和官庄附近。在所选 20 场场次洪水中有 3 场洪水不是由降雨因素形成,降雨稀少但上游来水较多也是构成洪水的关键,以图 1(c)2018092518 场次洪水为代表的暴雨中心图中不存在暴雨中心。

2.3 基于暴雨中心图划分子流域

根据自然子流域划分方法,结合研究区内水系干支流分布特点和水文站网分布情况,基于数字地面高程模型,选取适当的集水面积阈值,将流域划分为浦市—沅陵、高砌头—沅陵、沅陵—五强溪库区、五强溪库区 4 个子流域。

考虑暴雨中心划分子流域,要分析所有场次洪水的暴雨中心位置,见图 2,保证五强溪库区附近每场洪水的多个暴雨中心均在不同的子流域内,使其符合每个子流域至多存在一个暴雨中心的原则。考虑到库区附近暴雨频繁,库区降雨后立即产流的特性,五强溪库区需依据暴雨中心位置精细划分,离库区较远的浦市子流域与库区附近相比降雨对洪水影响较小,在子流域划分时可包含 2~3 个暴雨中心。

具体划分方法为:针对第一场洪水,基于暴雨中心图描绘的暴雨中心位置,在按照流域提取出的分水岭得到流域基本单元的基础上,通过合并等方法调整子流域单元初步划分结果,保证该场洪水在库区附近的多个暴雨中心均细分在不同的子流域内;

第一场洪水暴雨中心图的划分结果在第二场洪水暴雨中心图中并不一定适用,可能会出现库区附近划分子流域时存在多个暴雨中心的情形,则需重复上述划分步骤将库区附近暴雨中心划分开,离库区

最远的子流域依据其面积权重允许存在至多 3 个暴雨中心,分析全部 20 场洪水雨量资料所绘制的暴雨中心图,调整细化后得到考虑暴雨中心子流域划分结果。见图 2。

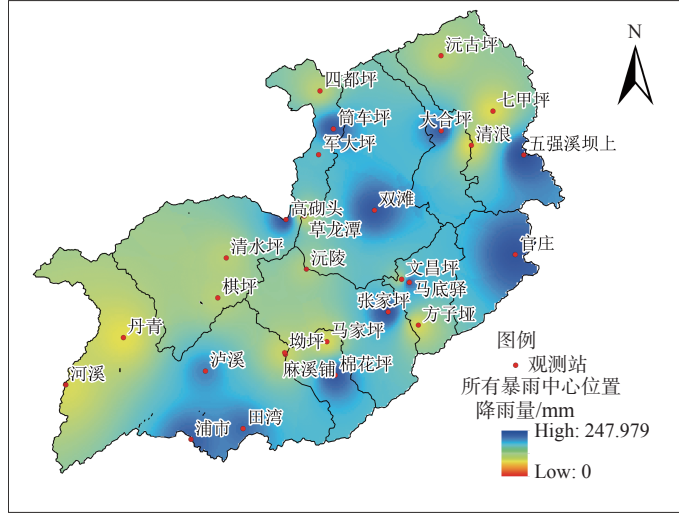


图 2 所有场次洪水的暴雨中心位置及子流域划分结果

Fig. 2 Location of rainstorm center of all flood events and sub basins divided by rainstorm center

与自然子流域划分相比,考虑暴雨中心划分流域方法不仅增加了子流域的数量,还考虑了降雨空间分布不均问题对洪水模拟精度的影响,使子流域划分变得更加精细合理。该划分方法依据流域内现有水文站及雨量站点的降雨资料,数据可靠,划分结果具有稳定性,若未来发生暴雨中心偏移的情况,需依据新的降雨及暴雨中心数据采用子流域划分方法进行修正。

2.4 不同划分方法面雨量对比

以 2014070300 场次洪水为例,与仅依据自然子流域划分方法相比,考虑暴雨中心划分方法将五强溪坝上、官庄、马底驿、张家坪和棉花坪等暴雨中心区域进行精细划分,保证库区附近每个子流域至多存在一个暴雨中心,除高砌头子流域一致外,考虑暴雨中心划分方法在依据自然子流域划分的基础之上将五强溪库区、沅陵—五强溪、浦市—沅陵 3 个子流域均进行了细分,见图 3。

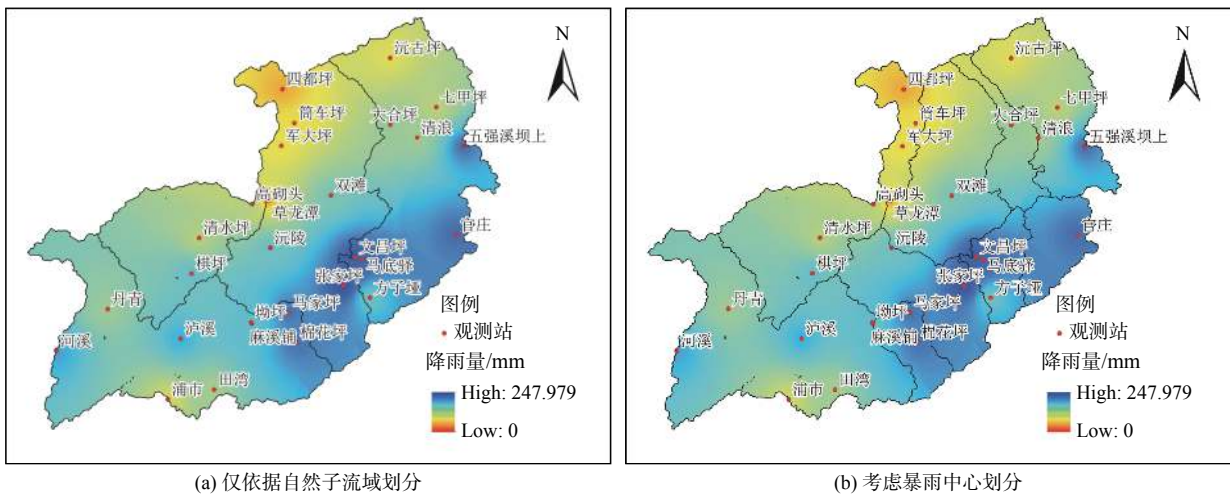


图 3 两种划分方法的子流域内暴雨中心数量对比

Fig. 3 Comparison of the number of rainstorm centers in subwatershed by the two subwatershed division methods

由表 1 计算得到官庄及马底驿子流域每小时面平均雨量分别为 2.85 mm 和 2.72 mm,均大于依据

自然子流域划分的五强溪库区 2.30 mm 面平均雨量,沅陵和双滩子流域每小时面平均雨量为 2.69 mm

和 2.05 mm 均大于沅陵—五强溪子流域 1.87 mm 面平均雨量,仅依据自然子流域划分方法将多个暴雨中心划分在同一个子流域中,面雨量得到了均化,而考虑暴雨中心位置精细划分后存在暴雨中心的子流域面平均雨量增大,更加接近实际降雨。

表 1 两种划分方法下各子流域每小时面平均雨量对比
Tab. 1 Comparison of hourly area average rainfall of each sub watershed under two sub-basin division methods

洪水场次	自然子流域	面平均雨量/mm	暴雨中心	面平均雨量/mm
2014070300	五强溪库区	2.30	五强溪坝上	1.84
			大合坪	1.79
			马底驿	2.72
			官庄	2.85
	高彻头—沅陵	1.80	高砌头	1.80
	沅陵—五强溪	1.87	沅陵	2.69
			草龙潭	0.86
			双滩	2.05
	浦市—沅陵	2.26	浦市-河溪	1.97
			坳坪	2.55

3 模型选择及评价指标

三水源新安江模型^[24-25]是一个概念性模型,采用其分布式结构进行计算,根据流域下垫面特征把研究区域划分成若干单元,对每个单元分别计算产汇流,演算叠加后求得出出口断面流量。参数反映流域下垫面特征,分布式模型各子单元参数可以相同,也可以不同。模型由蒸散发、产流、分水源和汇流 4 个模块构成,适用于湿润和半湿润地区,具有参数少、操作方便、运算速度快等优点。

模型参数主要分为 4 个层次:第一层次为蒸散发计算,通过 K 、 WUM 、 WLM 、 C 来建立三层蒸散发模型;第二层次为产流计算,通过 WM 、 B 来进行蓄满产流计算;第三层次为水源划分,通过 SM 、 EX 、 KG 、 KI 来对地面径流 RS 、地下径流 RG 、壤中流 RI 进行划分,并进行自由水蓄水库的出流计算;第四层次为汇流计算,汇流计算中又分为坡面汇流 (CS 、 CI 、 CG) 和河道汇流 (KE 、 MX)^[26-27]。

汇流采用分段马斯京根演算法,将演算河段划分为 n 个单元河段,并连续进行 n 次演算,以求得出流过程。该法主要是建立槽蓄方程,并与水量平衡方程联立求解,进行河段洪水计算。在有支流汇入的情况先分别计算出各支流的洪水演算公式,将每个上游站的流量分别进行演算,然后相加求得出流

过程。

对于入库洪水预报而言,洪峰、洪量与洪水过程均是重要指标,因此采用洪量相对误差 RR 、洪峰流量相对误差 RQ 和确定性系数 DC 这 3 个指标来评价洪水模拟精度,依据《水文情报预报规范》^[28] 中的规定,对模拟精度采用允许误差合格率法进行评定。

4 结果分析

4.1 参数率定

降雨空间分布和下垫面空间分布共同决定出口断面的流量过程,参数能反映流域下垫面特征,科学划分子流域能更好地考虑降雨的空间分布。通过 2014—2020 年 20 场历史洪水资料采用蒙特卡罗随机采样模型自动优选和人工调试相结合的方法对两种方法下新安江模型参数进行最优化率定。由于各子流域出口的流量资料缺少,不能精确率定每个子流域的参数,参数率定工作量变大,且更难去控制,洪水模拟结果变差,因此各子流域使用同一套参数为宜,率定结果见表 2。

模型中的参数系统反映了水文过程的物理规律,其中 SM 、 KG 、 KI 、 CI 、 CG 、 CS 为敏感参数。 SM 为自由水容量,受降雨资料时段均化影响较大, SM 越大,蓄水能力越大,仅依据自然子流域划分导致降雨均化面平均雨量变低,模拟洪峰偏小,为使模拟峰值更接近实际洪峰,其 SM 值为 6.255 远小于考虑暴雨中心划分的 SM 值; CS 、 CI 、 CG 值越大,表示各自的径流成分消退越慢,五强溪近坝区壤中流和地下水丰富, CI 值在 0.5 左右, CG 值在 0.9 以上,调试 CS 值对洪水的洪峰影响较大; KI 和 KG 和代表自由水出流快慢,一般 $KI+KG=0.7$,增大 SM 和 KG ,会增大地下径流的比重,就会减小次洪径流量; WM 、 WUM 、 WLM 、 B 、 C 、 IM 、 EX 、 KE 等为非敏感参数可以结合当地气候、地形下垫面条件等流域具体情况推求,对洪水模拟结果影响较小,故两种方法非敏感参数值相同。

4.2 次洪模拟结果

选取 2014—2017 年 13 场洪水用于率定,2018—2020 年 7 场洪水用于检验,模拟精度见表 3,由于子流域划分方法的不同,参数值和初始土壤含水量分布也随之改变,两种方法在其最优参数及各自初始土壤含水量条件下进行次洪模拟,结果表明:依据自然子流域划分的次洪模拟有 1 场用于率定的洪水

洪量误差大于±0.2 不合格;洪峰误差只有用于率定的 2015060121 号场次洪水和 2017052208 号场次洪水分别为-0.24 和 0.22 大于±0.2 不合格,其余全部合格;考虑暴雨中心划分子流域的次洪模拟洪量误

差在率定期和检验期均为合格;确定性系数除 2014052300 号、2016062917 号、2016062720 号和 2019051905 号场次洪水外,均是考虑暴雨中心划分子流域的洪水模拟精度更高或与之相当。

表 2 新安江参数对比

Tab. 2 Sensitive parameter list

参数	参数意义	参数值		参数	参数意义	参数值	
		自然子流域	暴雨中心			自然子流域	暴雨中心
K	蒸散发折算系数	0.95	0.95	KI	壤中流出流系数	0.302	0.017
B	流域蓄水容量分布曲线指数	0.38	0.38	CG	地下水消退系数	0.945	0.928
C	深层散发系数	0.046	0.046	CI	壤中流消退系数	0.447	0.522
WM	张力水容量/mm	119.794	119.794	L	河网汇流滞时/h	1	1
WUM	上层张力水容量/mm	19.906	19.906	CS	河网水流消退系数	0.925	0.878
WLM	下层张力水容量/mm	64.36	64.36	KE	马斯京根蓄量常数	1	1
IM	不透水面积比例	0.03	0.03	MX	单元流域马斯京根流量比重系数	0.011	0.011
SM	自由水容量/mm	7.56	16.678	MX ₁	浦市以上来水马斯京根流量比重系数	0.479	0.479
EX	流域自由水容量分布曲线指数	1.5	1.5	MX ₂	河溪以上来水马斯京根流量比重系数	0.287	0.287
KG	地下水出流系数	0.398	0.683	MX ₃	高砌头以上来水马斯京根流量比重系数	0.367	0.367

表 3 次洪模拟精度对比

Tab. 3 Comparison table of secondary flood simulation accuracy

洪号	洪量误差		洪峰误差		确定性系数	
	自然子流域	暴雨中心	自然子流域	暴雨中心	自然子流域	暴雨中心
2014052300	0.07	0.02	0.10	0	0.87	0.86
2014070300	0.07	0.03	-0.11	-0.05	0.85	0.95
2014071400	0.04	0.02	-0.03	0	0.94	0.94
2015060121	0.01	-0.02	-0.24	-0.04	0.81	0.93
2015060718	-0.04	-0.06	-0.03	-0.08	0.81	0.82
2015062023	-0.01	-0.02	-0.09	-0.12	0.95	0.95
2016050703	0.13	0.07	0.02	-0.07	0.84	0.91
2016062017	-0.06	-0.05	-0.17	-0.18	0.82	0.72
2016062720	-0.05	-0.08	-0.05	-0.13	0.92	0.87
2016070311	0.05	0.02	-0.04	-0.06	0.93	0.97
2017052208	0.10	0.05	0.22	0.01	0.74	0.89
2017062711	0.10	0.08	0.05	0	0.94	0.94
2017081121	0.27	0.20	0.03	0.14	0.63	0.67
2018053010	0.06	0.02	0.02	0.01	0.71	0.92
2018092518	-0.03	-0.03	-0.10	-0.12	0.76	0.82
2019051905	0.02	-0.01	-0.02	-0.06	0.97	0.94
2019070700	0.02	0	0.07	-0.05	0.93	0.96
2020070800	-0.05	-0.08	-0.11	-0.1	0.86	0.87
2020071823	0.02	-0.04	-0.18	-0.18	0.85	0.86
2020091500	0.02	-0.02	0.04	-0.02	0.96	0.96

4.3 2021 年洪水模拟过程对比

2021 年 4 场洪水在两种子流域划分方法下模拟的洪水过程线及面雨量过程见图 4。

由 4 场洪水在依据自然子流域划分和考虑暴雨

中心划分子流域两种划分方法下的洪水过程线对比图可见,每一场洪水的洪水过程主要由浦市上游来水以及近坝区降雨径流共同影响;2021050300 号场次洪水在两种子流域划分方法下模拟效果都较

差,洪水模拟过程整体偏大,两种划分方法模拟洪峰均超过实际洪峰值;2021051100 场次洪水是一个典型的复式洪水,存在多个洪峰,经对比,考虑暴雨中心划分洪水过程整体拟合效果略差于按照自然子流域划分洪水过程线;2021060300 场次洪水按照自然子流域划分的模拟洪峰明显达不到实测洪峰值,

且峰现时间提前,考虑暴雨中心划分模拟峰值更接近实际峰值;2021063000 场次洪水是4场洪水里拟合效果最好的,同时也是一场复式洪水,经对比,两种子流域划分方法下模拟洪水过程线与实际洪水过程几乎一致。

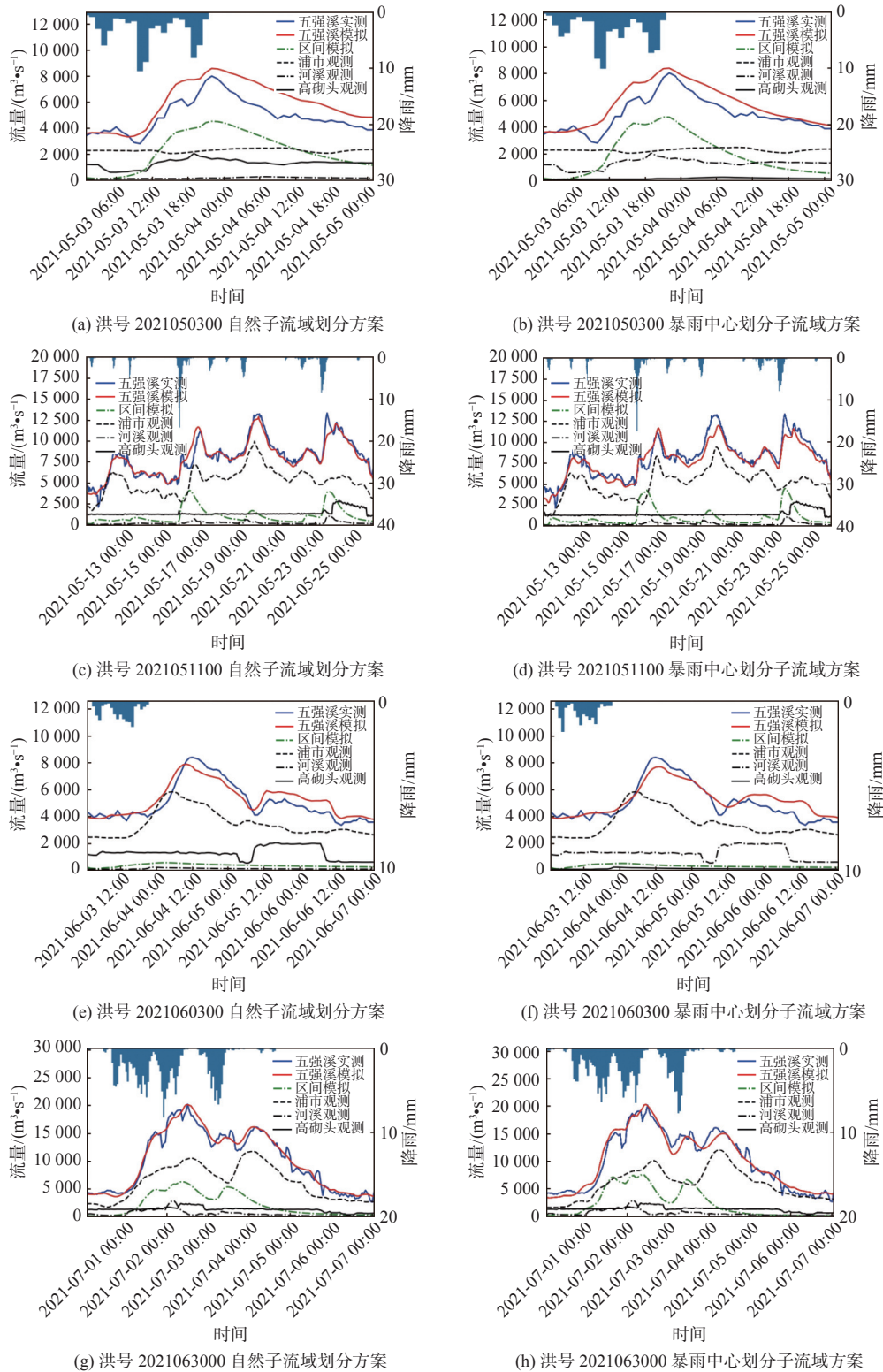


图4 各场次洪水在不同方案下的模拟过程线

Fig. 4 Flood simulation process line under different schemes

4.4 洪水模拟精度评定对比

选取的 4 场场次洪水的洪量误差、洪峰误差、确定性系数在两种不同流域划分方法精度评定对比见表 4。

表 4 不同子流域划分方法洪水精度评定对比
Tab. 4 Comparison of flood accuracy evaluation of different subwatershed division methods

洪号	洪量误差		洪峰误差		确定性系数	
	自然子流域	暴雨中心	自然子流域	暴雨中心	自然子流域	暴雨中心
2021050300	0.20	0.14	0.07	0.04	0.16	0.56
2021051100	-0.01	0.03	-0.04	-0.07	0.92	0.92
2021060300	0.04	0.03	-0.07	-0.07	0.83	0.85
2021063000	0.02	0	-0.01	0	0.96	0.96

数据对比说明考虑暴雨中心划分的洪水确定性系数均值为 0.83, 高于依据自然子流域划分的均值 0.72, 除 2021050300 场次洪水外的 3 场洪水在两种划分方法下模拟精度较高且大致相当, 2021050300 场次洪水无论是从洪量误差、洪峰误差还是确定性系数 3 个指标下均是考虑暴雨中心划分的洪水模拟精度更高, 其中依据自然子流域划分的 2021050300 号洪水的洪量误差略小于 0.2, 依据自然子流域划分的 3 场洪水洪峰误差均为负值, 由于该划分方法将近坝区多个暴雨中心划分在同一个子流域内, 计算面平均雨量时使雨量得到了均化, 是导致整体模拟洪峰低于实测洪峰的重要原因之一。考虑暴雨中心划分子流域方法即考虑了降雨空间分布不均的问题, 面平均雨量更接近实际降雨, 2021063000 号场次洪水洪峰误差为 0, 洪水模拟精度得到了提高。从洪水的成因来说, 模拟结果不仅取决于流域下垫面状态的空间分布, 还取决于降雨的空间分布, 由表 4 可以看出 2021060300 号场次洪水洪量和确定性系数均是考虑暴雨中心划分误差更小, 2021050300 号和 2021063000 号场次洪水的 3 个评价指标均是考虑暴雨中心划分模拟效果更好, 考虑暴雨中心划分整体确定性系数更高, 说明考虑暴雨中心划分的洪水模拟精度略高于依据自然子流域划分洪水模拟精度。

5 结论

以湖南省五强溪近坝区流域为例, 考虑暴雨中心划分子流域新安江模型与只依据自然子流域划分新安江模型进行洪水模拟精度对比, 主要结论

如下:

在两种子流域划分方法的各自最优参数下, 考虑暴雨中心进行子流域划分模拟的洪水过程比只依据自然子流域划分的洪水过程整体模拟精度要高, 洪峰误差小, 确定性系数高。

考虑暴雨中心进行子流域划分, 即考虑了降雨空间分布对流域洪水模拟的影响, 近坝区流域相比较其他流域, 降雨落在库区流程短、汇流快, 对洪水过程模拟的影响大, 说明依据暴雨中心对近坝区流域划分合理。

该研究只考虑了降雨空间分布对子流域划分的影响, 没有考虑下垫面等因素以及子流域数量对流域划分的影响, 因此还需要进一步就子流域划分方法进行研究。

该划分方法应用于近坝区洪水预报, 提高预报精度, 为防汛部门防灾、减灾决策提供依据, 降低流域洪涝灾害带来的损失, 保障人民群众生命财产安全, 为我国水库近坝区子流域划分提供新方法和新思路, 具有重要的经济和社会效益。

参考文献 (References):

- [1] 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. (GONG J F, CHEN H B, ZHU F, 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. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2021.0223.
- [2] OPPEL H, FISCHER S. A new unsupervised learning method to assess clusters of temporal distribution of rainfall and their coherence with flood types[J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): 0001-0016. DOI: 10.1029/2019WR026511.
- [3] 张峰, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 分布式水文模型子流域划分方法[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 101-105. (ZHANG F, LIAO W H, LEI X H, et al. A review on sub-basin delineation methods for distributed hydrological models[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(3): 101-105. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.03101.
- [4] 张晓娇, 焦裕飞, 刘佳, 等. 基于DEM的大清河子流域划分方法[J]. 人民黄河, 2020, 42(6): 13-17. (ZHANG X J, JIAO Y F, LIU J, et al. Study on method of sub-basin partition of Daqing River based on DEM[J].

- Yellow River, 2020, 42(6): 13-17. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.003.
- [5] 郭文慧,于泳,李璐,等.基于DEM的丹江口水源区治理区小流域划分研究[J].中国水土保持,2018(5): 51-54,69. (GUO W H, YU Y, LI L, et al. Study on small watershed division of Danjiangkou water source region based on DEM[J]. Soil and Water Conservation of China, 2018(5): 51-54,69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0941.2018.05.015.
- [6] 雷晓辉,王海潮,田雨,等.南水北调中线受水区分布式水文模型子流域划分研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(3): 10-13. (LEI X H, WANG H C, TIAN Y, et al. Subbasin delineation for the service areas of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.03.003.
- [7] JONG-GUN K, YOUNSHIK P, DONGSUN Y, et al. Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(4): 963-972. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2009.00339.x.
- [8] 叶爱中,夏军,王纲胜,等.基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J].水利学报,2005,36(5): 531-537. (YE A Z, XIA J, WANG G S, et al. Drainage network extraction and subcatchment delineation based on digital elevation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 531-537. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.05.004.
- [9] HÜSEYİN A, MÜSTEYDE B K. Flash flood potential prioritization of sub-basins in an ungauged basin in Turkey using traditional multi-criteria decision-making methods[J]. Soft Computing, 2020, 24(18): 14251-14263. DOI: 10.1007/s00500-020-04792-0.
- [10] 刘佳,邱庆泰,王维,等.考虑非均匀暴雨中心空间分布的洪水预报方法[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(1): 46-53. (LIU J, QIU Q T, WANG W, et al. The Flood forecasting method considering the spatial distribution in the inhomogeneous rainstorm center[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2021, 52(1): 46-53. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2021.01.009.
- [11] 王中根,郑红星,刘昌明,等.黄河典型流域分布式水文模型及应用研究[J].中国科学:技术科学,2004,34(S1): 49-59. (WANG Z G, ZHENG H X, LIU C M, et al. Study on distributed hydrological model and its application in typical Yellow River basin[J]. Scientia Sinica Technologica, 2004, 34(S1): 49-59. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-7259.2004.z1.006.
- [12] FATICHI S, VIVONI E, OGDEN F, et al. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 45-60. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.026.
- [13] MORENO H A, VIVONI E R, GOCHIS D J. Limits to flood forecasting in the Colorado front range for two summer convection periods using radar nowcasting and a distributed hydrologic model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1075-1097. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0129.1.
- [14] 宋玉,李致家,杨涛.分布式水文模型在淮河洪泽湖以上流域洪水预报中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(2): 127-131. (SONG Y, LI Z J, YANG T. Application of distributed hydrological model to flood forecasting for upper reaches of the Huaihe River above Hongze Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2006, 34(2): 127-131. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2006.02.003.
- [15] 马亚楠,李致家,刘墨阳,等.洪泽湖以上流域洪水预报研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4): 19-26,36. (MA Y N, LI Z J, LIU M Y, et al. Watershed flood forecasting for the Hongze Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 19-26,36. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0080.
- [16] 李雨桐,蔡宴朋,付强,等.华中多雨人口密集型流域洪水预报(英文)[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4): 689-699. (LI Y T, CAI Y P, FU Q, et al. Flooding prediction for a rainy dense population river basin of central China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 689-699. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0072.
- [17] 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 C, LI Z J, ZHANG K, et al. Fine-scale flood forecasting for small-and medium-sized rivers based on Grid-Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2021, 49(1): 19-25. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.004.
- [18] 廖如婷,胡珊珊,杜龙刚,等.基于HEC-HMS模型的温榆河流域水文模拟[J].南水北调与水利科技,2018,16(6): 15-20. (LIAO R T, HU S S, DU L G, et al. Hydrological simulation of Wenyu River basin based on HEC-HMS model[J]. South-to-North Wa-

- ter Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 15-20. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0147.
- [19] OLEYIBLO J O, LI Z J. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China[J]. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(1): 14-22. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.002.
- [20] 左文君, 张金存, 贾超. 基于DEM的城市数字河网提取[J]. *水电能源科学*, 2010, 28(2): 26-29. (ZUO W J, ZHANG J C, JIA C. Extraction of digital urban river network based on DEM[J]. *Science of Hydropower and Energy*, 2010, 28(2): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2010.02.009.
- [21] 蒋永健, 陆颖, 祁昌军, 等. 适用于分布式水文模拟的空间插值方法改进[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 69-74. (JIANG Y J, LU Y, QI C J, et al. An improved spatial interpolation method for distributed hydrological simulation[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 69-74. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0137.
- [22] LY S, CHARLES C, DEGRE A. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: The use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2259-2274. DOI: 10.5194/hess-15-2259-2011.
- [23] MENDEZ M, CALVO-VALVERDE L. Assessing the performance of several rainfall interpolation methods as evaluated by a conceptual hydrological model[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 1050-1057. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.595.
- [24] 张露, 张佳宾, 梁国华, 等. 基于API模型与新安江模型的察尔森水库洪水预报[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1056-1059. (ZHANG L, ZHANG J B, LIANG G H, et al. Flood forecast of Chaersen Reservoir based on API model and Xin'anjiang model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 1056-1059. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.06.007.
- [25] 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 Q L, MA Y N, LI Z J, et al. Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2021, 49(3): 213-219. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.003.
- [26] 王玉虎, 周玉良, 宗雪玮, 等. 新安江模型在董铺水库洪水预报中的应用研究[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(3): 55-60. (WANG Y H, ZHOU Y L, ZONG X W, et al. Application of Xin'anjiang model in flood forecasting for Dongpu Reservoir[J]. *Science of Hydropower and Energy*, 2016, 34(3): 55-60. (in Chinese))
- [27] 山成菊, 纪碧华, 张群羚. 基于新安江模型的横锦水库入库洪水预报研究[J]. *浙江水利水电学院学报*, 2021, 33(1): 28-31, 37. (SHAN C J, JI B H, ZHANG Q L. Research on flood forecast of Hengjin Reservoir based on Xin'anjiang model[J]. *Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power*, 2021, 33(1): 28-31, 37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2095-7092.2021.01.006.
- [28] GB/T 22482—2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482—2008, Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))

Application of sub-basin delineation method considering rainstorm center in flood forecasting

SHI Bin, LI Qiaoling, WANG Yue, LI Minzhe, LI Zhijia, HUANG Yingchun

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Floods in near-dam areas due to spatial and temporally uneven rainfall are often difficult to forecast effectively with conventional forecasting schemes, where the non-uniformity of rainfall at the basin level is an important factor affecting the accuracy of flood forecasting. There have been many studies on sub-basin division methods, but the problem of uneven rainfall distribution has rarely been studied. The spatial distribution of rainfall represented by the location of the storm center is used to refine the sub-basin division, and to improve the accuracy of flood forecasting in the near-dam area.

(下转第 965 页)