

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.008

五强溪水库近坝区洪水预报方法研究

沙永兵^{1,2},黄迎春³,石彬⁴,龚定⁴,邝录章^{1,2},肖杨^{1,2},李巧玲⁴

(1.五凌电力有限公司,湖南长沙 410004; 2.湖南省水电智慧化工程技术研究中心,湖南长沙 410004;
3.福州大学土木工程学院,福州福建 350108; 4.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:针对五强溪水库近坝区洪水预报难度大、预报精度难以满足实际需求的现状,基于历史暴雨中心分布与流域产汇流特征划分单元流域,采用三水源新安江模型构建入库洪水预报新方案进行参数率定和历史洪水模拟,并综合剖析了洪水预报误差的主要原因。研究表明,构建的洪水预报新方案能够取得较高的洪水预报精度,在 2021 年实时洪水预报作业中取得了良好的应用效果。流域内水利工程泄洪资料的缺失是目前造成洪量及洪峰模拟误差的主要原因。

关键词:洪水预报;近坝区;单元流域划分;新安江模型;五强溪水库

中图分类号:P338.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)04-0058-08

Study on flood forecasting method in the near-dam area of Wuqiangxi Reservoir

SHA Yongbing^{1,2}, HUANG Yingchun³, SHI Bin⁴, GONG Ding⁴, KUANG Luzhang^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, LI Qiaoling⁴

(1. Wuling Power Corporation Ltd., Changsha 410004, China;
2. China Hunan Provincial Hydropower Intelligent Engineering Technology Research Center, Changsha 410004, China;
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Flood forecasting in the near-dam area of reservoir is challenging, and the accuracy of forecasting scheme usually cannot fulfill the requirements of flood prevention and scheduling. To address these problems, the entire near-dam area of Wuqiangxi Reservoir was divided into ten subbasins based on the distribution of historical rainfall centers and the characteristics of runoff generation and concentration. A new forecasting scheme was constructed using the three-source Xin'anjiang model, the model parameters were calibrated and the main causes of simulation errors were investigated based on typical flood events. The results show that the method proposed in this study can achieve the high accuracy of flood forecasting and is well applied in the real-time flood forecasting operation in 2021. The results also indicate that the lack of information on flood releases from water conservancy projects is the main cause of errors in runoff and peak flows.

Key words: flood forecasting; near-dam area; unit watershed division; Xin'anjiang model; Wuqiangxi Reservoir

五强溪水库作为沅水流域下游控制性水库,对沅水流域的防洪调度有显著的影响,是国家防洪重点水库之一^[1]。靠近水库坝址地区有近 7 000 km²的流域缺少水文控制站,水文资料相对匮乏。水库入库洪水原有预报方案流域分区少,降雨资料均化严重,难以把握暴雨中心发生的位置,且参数方案不够合理,这些问题导致了洪水预报精度难以满足水库入库流量实时作业预报与调度的需求^[2-3],而五强溪水库入库洪水的预报精度直接影响水库调度决策及下游洞庭湖等地区的防汛安全。因此,亟须进一步开展历史暴雨中心分布与流域产汇流特征分析,改进洪水预报方案,提高洪水预报精度及预见期,为沅水流域防洪决策提供有力依据^[4-6]。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFC1508102);国家自然科学基金(51909059,52079035);江苏省自然科学基金(BK20190492);中央高校基本科研业务费专项(B200202036)

作者简介:沙永兵(1971—),男,高级工程师,主要从事流域梯级水库防洪及发电生产管理研究。E-mail:sha_syb@wu-ling.com

通信作者:黄迎春(1984—),女,博士,主要从事洪水预报研究。E-mail:yingchunhuang@fzu.edu.cn

引用本文: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.

1 流域概况

五强溪流域属亚热带季风气候,多年平均降水量约为1 500 mm。降水量年内分布不均衡,暴雨发生频繁且多集中在4—9月,年最大洪水一般发生在5—7月。五强溪水库坝址以上流域集水面积超过8万km²,为季调节水库,调节库容较小。水库年平均流量约为2 000 m³/s。如图1所示,入库流量可以分为河溪、浦市、高砌头3个控制站以上流域来水和浦市至五强溪水库坝址区间流域来水4个部分。其中,浦市至五强溪水库坝址区间(以下统称近坝区)集水面积8 033 km²,区间洪水具有流程短、汇流快、突发性强的特性。近坝区暴雨洪水时常与3个上游控制站以上流域来水相叠加,使得库区水位迅速抬升,导致水库洪水预报与调度的时间短、难度大^[7]。本文收集整理了2014—2020年4个控制站(高砌头、河溪、浦市、五强溪坝上)的逐日与时段流量过程,以及近坝区28个观测资料较为齐全雨量站的逐日与时段降雨资料,从中选取了20场包括大、中、小不同量级的洪水进行五强溪水库近坝区洪水预报方法改进研究。

2 单元流域划分

五强溪水库近坝区原有洪水预报方案将流域划分为浦市-沅陵、高砌头-沅陵、沅陵-五强溪库区、五强溪库区4个分区,采用分块新安江模型进行入库洪水预报。由该方案得到的单元流域面积均较大,未能充分考虑流域内降雨空间分布差异性大的特性,难以精准把握暴雨中心的位置,导致降雨径流模拟精度差,无法满足实际预报调度要求。研究表明,模型分块结构会对流域洪水模拟精度产生较大影响^[8]。因此,首先对五强溪流域暴雨的空间分布特征进行研究,针对所选场次洪水通过绘制暴雨中心分布图的方式逐一进行分析。统计结果表明,暴雨分布情况因不同场次洪水而异,暴雨中心较常出现在五强溪库区、官庄和浦市等地区。因此,按照自然子流域和暴雨中心分布对近坝区流域重新进行分区,保证每一个暴雨中心位于不同子流域内。同时针对历史暴雨事件较为集中的区域,通过适当增加流域分块数量的方式来精准掌控暴雨区降水量。改进后的五强溪水库近坝区流域分区结果如图2所示,其中,浦市-沅陵区间共分为4个子流域(编号1~4),沅陵-五强溪库区共分为6个子流域(编号5~10)。各单元流域占近坝区总面积的比值以及各单元流域出口距离五强溪水库坝上的河道长度如表1所示。

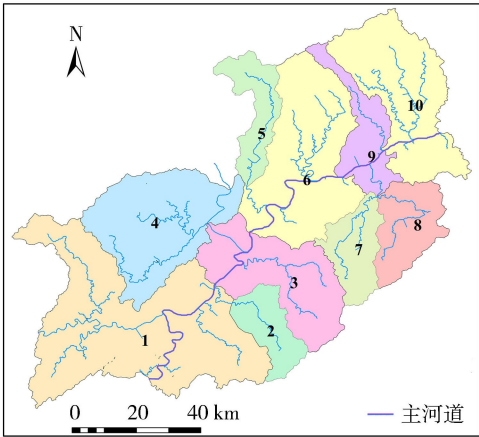


图2 五强溪近坝区流域分区

Fig.2 Subbasin division of near-dam area of Wuqiangxi Reservoir

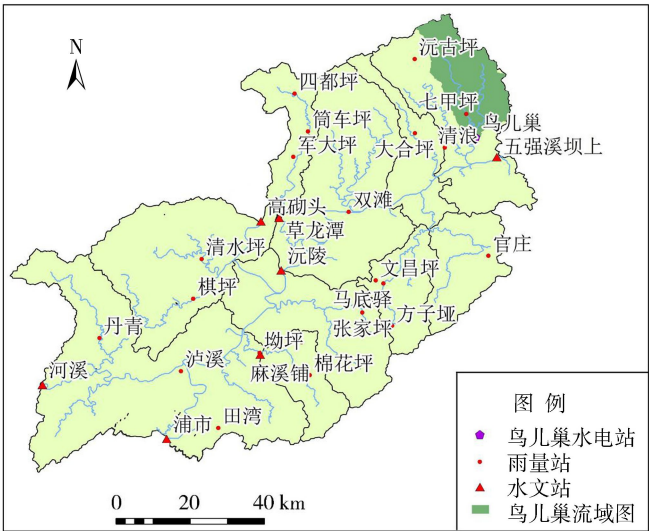


图1 五强溪水库近坝区水文、雨量站点分布
Fig.1 Distribution of hydrological and precipitation stations for near-dam area of Wuqiangxi Reservoir

表1 子流域面积比及河道长度			
Table 1 Size and river length of subbasins			
编号	名称	面积比	至坝上河道长度/m
1	浦市	0.25	179 318
2	坳坪	0.04	144 536
3	沅陵	0.11	84 143
4	高砌头	0.13	115 819
5	草龙潭	0.04	133 407
6	双滩	0.15	31 912
7	马底驿	0.04	38 405
8	官庄	0.05	38 405
9	大合坪	0.05	16 930
10	五强溪	0.13	0

相比于原有预报方案的流域分区情况,本文所采用的流域分区方案综合考虑了不同流域分区方法的优点,保证了分块数量的合理性,并且每一个子流域都有一定数量的雨量站来精确掌握降雨的空间分布情况,流域内降雨资料的应用更加精确,能够在一定程度上降低降雨信息不确定性对洪水预报精度的影响^[9-10]。

3 方案构建与模型参数率定

3.1 模型与评价指标

根据五强溪水库洪水预报调度作业对洪水预报精度与预见期的实际要求,结合该流域产汇流特性以及入库洪水由3个控制站以上流域来水和近坝区产流构成的特点,采用三水源新安江模型构建近坝区入流的降雨产流预报方案,对河溪、浦市、高砌头以上流域来水,运用分段马斯京根河道演算方法直接演算至水库坝上。在各单元流域内,根据雨量站资料采用算数平均法计算面平均雨量,分别进行蒸散发、产流分水源和坡地河网汇流计算,得到各单元流域出口断面径流过程。然后,采用分段马斯京根法将各单元流域出口流量演算至坝址。作为分段马斯京根法重要参数之一的河道分段数,通常是根据各断面位置到水库坝头的距离进行确定。但是,考虑到水流进入库区后运动速度变慢,单纯按照距离进行该参数的确定可能与实际汇流情况不符。因此,采用文献[11]中提出的方案,在考虑河道汇流距离的基础上,通过历史洪水的率定效果对河道分段数进行修正。

参考文献[12-13]中三水源新安江模型参数的可能取值范围,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案,对历史资料进行模拟分析和模型参数率定。采用洪量相对误差、洪峰流量相对误差、峰现时差 ΔT 和确定性系数^[14] R^2 共4个指标评价模型模拟效果。

依据GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的规定,对模拟精度采用有效性检验法和允许误差合格率法进行评定。

3.2 日模型率定结果

首先对2014—2020年的逐日降雨径流过程进行模拟。根据河溪、浦市、高砌头、五强溪坝上4个水文站点逐日流量过程、近坝区各雨量站点日降雨资料和代表性蒸发站五强溪的逐日蒸发数据,对五强溪流域日模型参数进行率定。通过多次调试,最终得到如表2所示的新安江日模型参数率定结果和表3所示的日模型模拟结果的特征值。

表2 新安江日模型与次洪模型参数率定值

Table 2 Calibrated values of model parameters for daily and hourly simulation		
参数	日模型参数值	次洪模型参数值
蒸散发折算系数(K)	0.95	0.95
流域蓄水容量分布曲线指数(B)	0.38	0.38
深层散发系数(C)	0.046	0.046
张力水容量(WM)	119.794 mm	119.794 mm
上层张力水容量(WUM)	19.906 mm	19.906 mm
下层张力水容量(WLM)	64.36 mm	64.36 mm
不透水面积比例(IM)	0.03	0.03
自由水容量(SM)	29.499 mm	16.678 mm
流域自由水容量分布曲线指数(EX)	1.5	1.5
地下水出流系数(KG)	0.683	0.683
壤中流出流系数(KI)	0.017	0.017
地下水消退系数(CG)	0.956	0.928
壤中流消退系数(CI)	0.531	0.522
河网汇流滞时(L)	0	1 h
河网水流消退系数(CS)	0.63	0.878
单元流域马斯京根流量比重系数(X)	0.116	0.011
浦市以上来水马斯京根流量比重系数(X_1)	0.45	0.479
河溪以上来水马斯京根流量比重系数(X_2)	0.1	0.287
高砌头以上来水马斯京根流量比重系数(X_3)	0.2	0.367

由表3可以看出,五强溪流域模拟结果中,年径流量相对误差大都在规范允许的误差范围内,洪量合格率为85.7%,达甲级标准。模拟的年径流总量均存在偏大趋势,分析可能是由于模型未能考虑引水、灌溉等

水利工程的影响,导致流域长期水量平衡有一定偏差。日径流过程模拟的确定性系数均值达 0.83。

3.3 次洪模型率定结果

次洪模型设计以 1 h 为时段长,基于日模型参数率定结果以及模拟的土壤含水量情况,利用选取的 20 场洪水率定次洪模型参数。鉴于五强溪水库入库洪水来源较为复杂多变,多种来水相互交织,给单元流域产汇流和河道汇流演算参数的识别带来较大难度。因此,对所选的 20 场洪水进行归类,发现主要有以下 4 类:以浦市以上来水为主导、以高砌头以上来水为主导、以近坝区降雨径流汇入为主导、全流域大暴雨产流。河溪站以上来水量较少,对洪峰影响较小,未单独考虑。模型率定时,首先采用以单一上游来水为主导的洪水场次,识别相对应河段的马斯京根汇流参数,然后利用以近坝区降雨径流汇入为主的洪水场次,进行三水源新安江模型参数的率定,最后再根据全流域大暴雨洪水对所有率定的参数进行验证和调整。五强溪水库次洪模型参数率定值见表 2,表 4 为次洪模拟结果统计特征值。

表 3 新安江日模型模拟特征值

Table 3 Model characteristics for daily simulation

年份	实测洪量/ 亿 m ³	模拟洪量/ 亿 m ³	洪量相对 误差/%	确定性 系数
2014	710.2	779.3	10	0.84
2015	640.6	773.4	21	0.77
2016	731.4	868.6	19	0.85
2017	654.5	773.6	18	0.83
2018	435.3	503.1	16	0.79
2019	653.1	749.5	15	0.88
2020	864.4	951.7	10	0.81

表 4 次洪水模拟特征值

Table 4 Model characteristics for hourly simulation

洪号	实测洪量/ 万 m ³	模拟洪量/ 万 m ³	洪量相对 误差/%	实测洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	模拟洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰相对 误差/%	峰现时差/h	确定性系数
2014052300	358154	366956	2	17 400	17 300	0	0	0.86
2014070300	281 382	291 013	3	22 700	21 600	-5	2	0.95
2014071400	777 858	789 930	2	35 700	35 600	0	-2	0.94
2015060121	406 073	397 722	-2	17 800	17 100	-4	2	0.93
2015060718	231 033	217 027	-6	12 000	11 000	-8	1	0.82
2015062023	310 238	302 738	-2	19 200	17 000	-12	1	0.95
2016050703	270 373	288 828	7	13 200	12 200	-7	2	0.91
2016062017	80 714	76 774	-5	12 500	10 200	-18	-2	0.72
2016062720	194 129	178 792	-8	15 000	13 100	-13	7	0.87
2016070311	459 266	466 748	2	22 300	21 000	-6	3	0.97
2017052208	134 591	140 773	5	8 870	8 930	1	-3	0.89
2017062711	978 050	1 060 486	8	32 100	31 000	-3	-1	0.94
2017081121	202 147	241 713	20	13 100	15 000	14	3	0.67
2018053010	176 635	180 022	2	7 350	7 460	1	0	0.92
2018092518	72 188	69 876	-3	8 520	7 490	-12	6	0.82
2019051905	224 685	223 273	-1	14 000	13 100	-6	1	0.94
2019070700	595 597	593 114	0	14 000	13 400	-5	-11	0.96
2020070800	249 929	230 508	-8	26 000	23 400	-10	0	0.87
2020071823	164 610	158 043	-4	18 700	15 400	-18	1	0.86
2020091500	653 517	640 476	-2	20 800	20 400	-2	1	0.96

从表 4 可以看出,所选的 20 场不同类型洪水所模拟的洪量相对误差和洪峰相对误差均控制在±20% 范围内,合格率达 100%,模拟结果良好,达到了甲级精度标准。除 2017081121 号洪水模拟的洪量相对误差为 0.2 较大外,其余场次的洪量相对误差均小于 10%。模拟的洪峰流量从总体上看,略微偏大于实测洪峰流量。在峰现时差的控制上,峰现时差小于 3 h 的洪水场次为 85%,符合规范要求。2019070700 号洪水模拟洪峰出现时间与实测误差较大,主要是因为其为洪峰流量相近的复峰洪水,容易造成较大的峰现时间模拟误差。所选 20 场洪水模拟的确定性系数均值达到 0.89,其中有 11 场达到了 0.9 以上。

3.4 主要误差原因分析

率定结果表明,本文构建的五强溪水库近坝区洪水预报方案能够较好地模拟入库洪水过程,为水库防洪调度提供可靠依据。对比实测与模拟流量过程,对造成洪水模拟误差的原因进行了分析。图 3~6 分别为以浦市以上来水、高砌头以上来水、近坝区降雨径流汇入、全流域暴雨汇入等不同来水为主导的部分场次洪水模拟与实测流量过程。

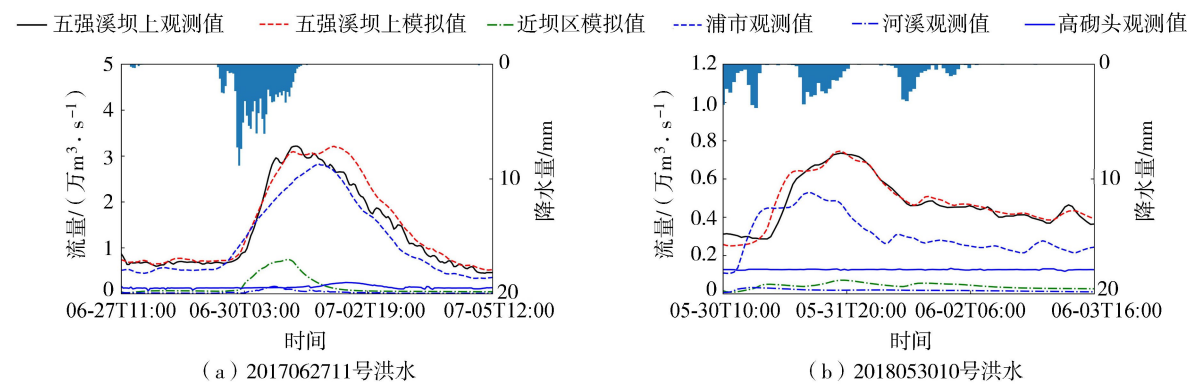


图3 以浦市以上来水为主导的入库洪水模拟与实测过程

Fig.3 Simulated and observed hydrographs for flood events mainly caused by upper water of Pushi

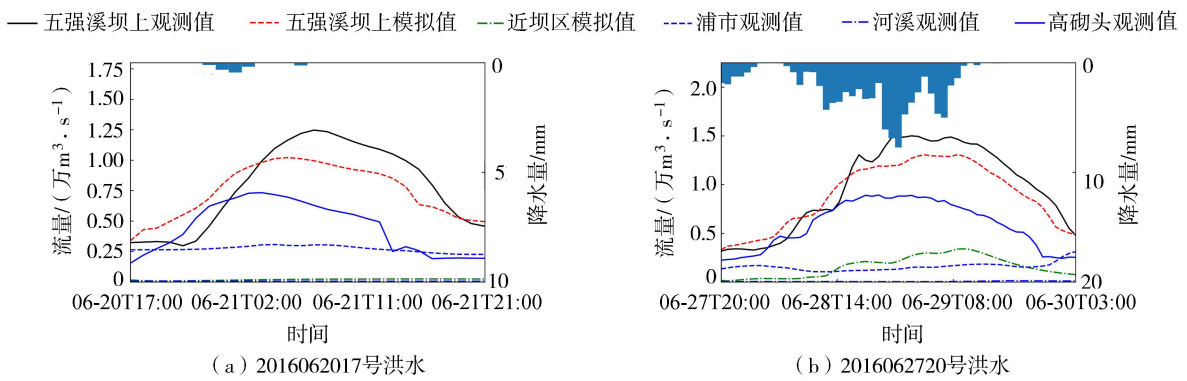


图4 以高砌头以上来水为主导的入库洪水模拟与实测过程

Fig.4 Simulated and observed hydrographs for flood events mainly caused by upper water of Gaoqitou

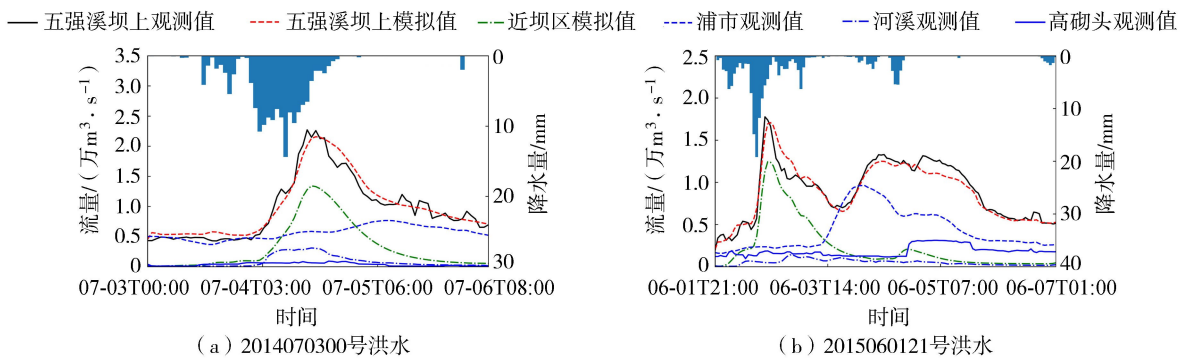


图5 以近坝区降雨径流汇入为主导的入库洪水模拟与实测过程

Fig.5 Simulated and observed hydrographs for flood events mainly caused by rainfall runoff inflow of near-dam area

从模拟过程线可以看出,五强溪水库洪峰主要是由浦市以上来水和近坝区降雨径流导致。由浦市以上来水为主导的洪水场次,洪峰和流量过程线模拟结果均与实测较为一致(图3);由高砌头上游来水为主导的洪水模拟精度普遍较差,模拟洪量与洪峰明显小于实测洪水过程(图4);以近坝区降雨产流汇入为主导的洪水场次,在洪峰模拟上能够取得较高精度,但在峰现时差的模拟上易出现延迟(图5);当发生全流域大暴雨时,浦市、河溪、高砌头上游来水和近坝区流域产流均对洪峰有一定的影响,该类型洪水模拟的精度也有待进一步提高(图6)。

针对以高砌头以上来水为主导的洪水场次在模拟时出现的洪量、洪峰均明显偏小的现象,进一步分析应是受靠近坝址位置的水利工程蓄泄影响。通过流域内水利工程情况分布调查,发现在沅水左岸一级支流洞庭溪下游河段建有鸟儿巢中型水库,其流域如图1中绿色区域所示。该水库控制流域面积381 km²,库容3000万m³。鸟儿巢水库与高砌头以上流域地理位置临近,均位于五强溪水库西北方向。由图4可见,2016062720号洪水高砌头以上流域来水量较大,而鸟儿巢水库所在的10号子流域面平均降水量达

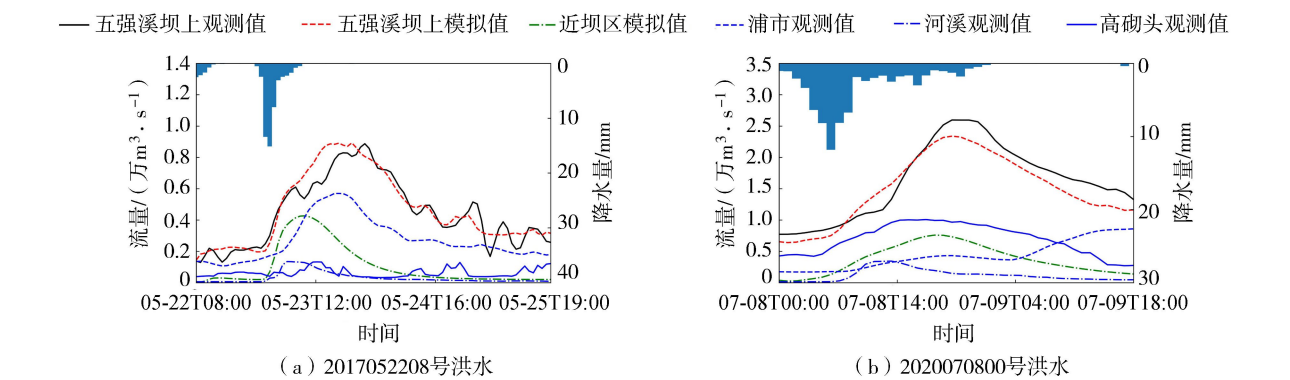


图 6 全流域暴雨产流汇入导致的入库洪水模拟与实测过程

Fig. 6 Simulated and observed hydrographs for flood events caused by runoff inflow of heavy rainfall across the entire basin

97.5 mm, 因此判断鸟儿巢水库以上流域发生大洪水的概率较高, 水库管理方可能进行开闸泄洪, 从而加大了五强溪水库的入库洪水量, 因缺乏鸟儿巢水库泄洪资料, 导致预报洪量偏小 8.0%, 洪峰误差也相对较大。

通过调查发现, 鸟儿巢水库曾在 2020 年 7 月 7—11 日进行开闸泄洪, 由图 6 所示的同时期 2020070800 号洪水模拟结果可以看出, 受到鸟儿巢水库泄洪影响, 模拟洪量为 230 508 万 m³, 实测洪量为 249 929 万 m³, 洪量减少了约 8%, 充分证实了鸟儿巢水库对五强溪水库入库洪水的影响。因缺乏鸟儿巢水库泄洪数据, 在预报方案中未能考虑该水库蓄泄对五强溪水库入库洪水模拟的影响。鸟儿巢水库坝址与五强溪水库坝址靠近, 蓄泄情况对模拟洪峰与洪量的影响较大, 若能在实际预报调度中加入鸟儿巢水库的泄洪信息, 能够有效改善该类型洪水的预报精度。在预报方案中增加水利工程蓄泄信息, 进一步考虑上游水库等工程泄洪对入库洪水的影响, 是提高洪水预报精度的关键。

本文所构建的洪水预报方案中, 因缺乏子流域的出口流量信息进行单个子流域模型参数的识别, 10 个不同子流域采用的是同一套模型参数进行产汇流演算。五强溪近坝区面积较大, 子流域间水文气象与下垫面条件存在一定的差异, 模型参数肯定存在差别。若通过与流域下垫面特征构建相关关系, 进而分别推求子流域的模型参数, 应有可能进一步提高近坝区洪水的模拟精度^[15-16]。可以进一步通过构建模型参数与流域下垫面特征相关关系等方法, 推求不同单元流域模型参数的分布情况^[17-19]。

在河道洪水演算中, 采用的是较为简便、实用的马斯京根方法。然而, 洪水进入水库库区后, 水面加宽、水深增大, 水库的边界条件和动力因素发生变化, 导致水库内洪水波的传播方式、速度和时间也会产生较大差异。因此, 在下一步的研究中, 应进一步分析洪水波随时间和沿程的变化规律, 建立水文水力学洪水演进智能模型。

3.5 改进预报方案的验证

2021 年 5—6 月, 五强溪流域陆续出现了 3 次较大的洪水过程, 运用本文所构建的五强溪水库近坝区洪水预报改进方案, 成功进行了实时洪水作业预报, 取得了较好的预报效果, 洪水预报特征值如表 5 所示, 模拟洪水过程线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 2021050300 号洪水洪量相对误差较大, 分析可能是由于前期较为干旱, 流域内水利工程蓄水导致实测入库流量较小。在最为关键的洪峰模拟上, 预报 5 月 3 日洪水过程, 预报洪峰 8 380 m³/s, 实测洪峰 8 020 m³/s; 预报 5 月 18 日洪水过程, 预报洪峰 12 500 m³/s, 实测洪峰 13 300 m³/s; 预报 6 月 3 日洪水过程, 预报洪峰 7 690 m³/s, 实测洪峰 8 390 m³/s, 为水库进行洪水预报与调度提供了可靠的决策依据。

表 5 五强溪水库 2021 年入库洪水预报特征值

洪号	实测洪量/ 万 m ³	模拟洪量/ 万 m ³	洪量相对 误差/%	实测洪峰/ (m ³ · s ⁻¹)	模拟洪峰/ (m ³ · s ⁻¹)	洪峰相对 误差/%	峰现时差/h	确定性系数
2021050300	87 772	99 632	14	8 020	8 380	4	0	0.56
2021051812	660 969	633 808	-4	13 300	11 500	-14	3	0.90
2021060300	176 536	183 151	-4	8 390	7 690	-8	1	0.82

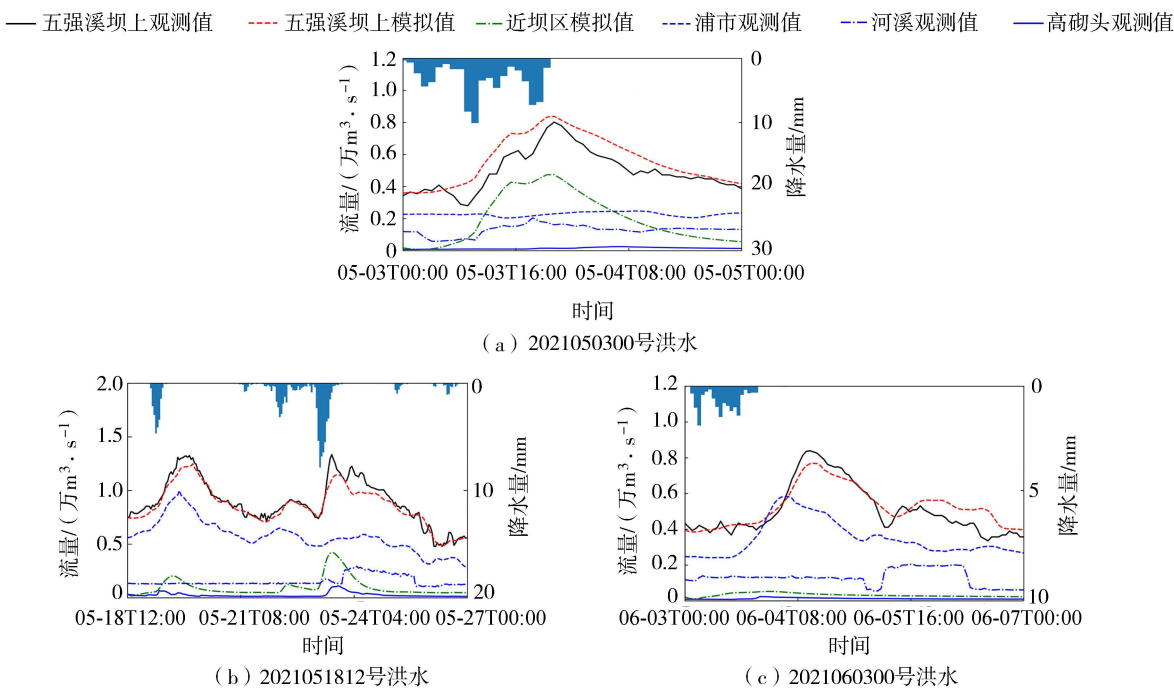


图 7 2021 年五强溪水库入库洪水预报与实测过程
Fig. 7 Simulated and observed hydrographs of flood events in 2021 for Wuqiangxi Reservoir

5 结 语

本文针对五强溪近坝区洪水预报难度大,原有预报方案入库流量预报精度不高、难以满足实际需求的难题,基于历史洪水暴雨中心与流域产汇流特征分析,采用三水源新安江模型构建五强溪水库近坝区流域入库洪水预报方案,对典型历史洪水进行了模拟与参数率定,并对主要误差原因进行剖析,改进的预报方案在 2021 年实时洪水预报作业中取得了良好的应用效果。研究表明,基于暴雨中心和自然子流域的流域分区方法能够有效提高模型对暴雨中心的掌控,降低降雨不确定性对洪水模拟精度的影响。本文所构建的五强溪近坝区洪水预报方案,能够适用于不同类型的洪水预报,为水库防洪调度提供可靠的科学依据。同时,研究发现,历史洪水场次模拟效果差的主要原因是缺乏流域内水利工程蓄泄的相关信息,尤其是对入库洪峰与洪量的预报精度影响较大。

参考文献:

[1] 柯美智. 五强溪水库控制流域降雨产流分析[J]. 华中电力,2011(6):47-48. (KE Meizhi. Rainfall-runoff analysis control of Wuqiangxi Hydropower Reservoir[J]. Central China Electric Power,2011(6):47-48. (in Chinese))
[2] 杨钊华,王军,梁忠民,等. 考虑资料缺失的小型水库影响的洪水预报方法研究[J]. 中国农村水利水电,2021(3):98-102. (YANG Zhaohua,WANG Jun,LIANG Zhongmin,et al. Research on flood forecasting method considering the influence of small reservoir with missing data[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(3):98-102. (in Chinese))
[3] 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. (in Chinese))
[4] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (LIU Zhiyu,LIU Yuhuan,KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))
[5] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia,ZHU Yuelong,LIU Zhiyu,et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium sized rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):13-18. (in Chinese))

Chinese))

[6] 黎楚安,陈洋波,叶盛,等. 上犹江水库入库洪水预报的流溪河模型研究[J]. 水力发电学报,2021,40(7):1-12. (LI Chu'an, CHEN Yangbo, YE Sheng, et al. Study on Liuxihe model for inflow flood forecast of Shangyoujiang Reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):1-12. (in Chinese))

[7] 李致家,董增川,梁忠民,等. 大流域洪水预报与洪水调度管理方法研究[J]. 水力发电,2004,30(1):12-15. (LI Zhijia, DONG Zengchuan, LIANG Zhongming, et al. Flood forecasting and flood management of large watershed[J]. Water Power, 2004,30(1):12-15. (in Chinese))

[8] 李致家,孔凡哲,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京:河海大学出版社,2010.

[9] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.

[10] HUANG Yingchun, BARDOSSY A, ZHANG Ke. Sensitivity of hydrological models to temporal and spatial resolutions of rainfall data[J]. Hydrology & Earth System Sciences,2019,23(6):2647-2663.

[11] 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))

[12] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[13] 戴健男,李致家,黄鹏年,等. 新安江模型参数不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(6):618-622. (DAI Jiannan, LI Zhijia, HUANG Pengnian, et al. Uncertainty analysis of Xin'anjiang model parameters[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2011,39(6):618-622. (in Chinese))

[14] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles-science direct [J]. Journal of Hydrology,1970,10(3):282-290.

[15] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xin'anjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology,2012,468-469(6):47-62.

[16] YAO Cheng, ZHANG Ke, YU Zhongbo, 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(2):1035-1048.

[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 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))

[18] 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))

[19] 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 - 10 - 30 编辑:胡新宇)