

中国防汛抗旱

CHINA FLOOD & DROUGHT MANAGEMENT

福建龙岩市“2024.6.16”极端强降水雨洪特征分析

卞逸舒 刘珏 何荣才 肖秀珠

Analysis of the characteristics of the "2024.6.16" extreme heavy rainfall and floods in Longyan City of Fujian Province — A case study of Mianhuatan Reservoir

BIAN Yishu, LIU Jue, HE Rongcai,

在线阅读 View online: <http://www.cfdm.cn/article/doi/10.16867/j.issn.1673-9264.2025139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沿江城市降雨特性及雨洪关系分析——以四川泸州市为例

Study of rainfall characteristics and rainfall-flood relationship in riverine Cities—Case study of Luzhou City, Sichuan Province

中国防汛抗旱. 2024, 34(4): 62–65. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2023196>

河南卫辉市“2021.7”特大暴雨洪水分析

Analysis of "2021.7" extremely heavy rainstorm and flood in Weihui City of Henan Province

中国防汛抗旱. 2024, 34(5): 82–86. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2023233>

基于“三道防线”的福建省桃溪流域洪水模拟与预报

Flood simulation and prediction in the Taoxi Watershed in Fujian Province based on "Three Lines of Defense"

中国防汛抗旱. 2025, 35(2): 87–92. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2024029>

广东河源市2024年4月暴雨洪水成因分析

Cause analysis of rainstorm flood in Heyuan City of Guangdong Province in April 2024

中国防汛抗旱. 2024, 34(10): 96–101. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2024229>

尼尔基水库洪水预报方案分析及应用研究

Analysis and application of flood forecasting plans of Nierji Reservoir

中国防汛抗旱. 2022, 32(4): 77–81. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2021018>

郑州“7·20”特大暴雨移置合肥市洪涝分析

Flood analysis in Hefei City transposed by Zhengzhou "7·20" extremely heavy rainstorm case study

中国防汛抗旱. 2024, 34(7): 61–64. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2023390>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2025139

卞逸舒, 刘珏, 何荣才, 等. 福建龙岩市“2024.6.16”极端强降雨雨洪特征分析——以棉花滩水库为例[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(5): 43–48. BIAN Yishu, LIU Jue, HE Rongcai, et al. Analysis of the characteristics of the “2024.6.16” extreme heavy rainfall and floods in Longyan City of Fujian Province — A case study of Mianhuatan Reservoir[J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(5): 43–48. (in Chinese)

福建龙岩市“2024.6.16”极端强降雨雨洪特征分析 ——以棉花滩水库为例

卞逸舒¹ 刘珏² 何荣才³ 肖秀珠¹

(1. 福建省气象服务中心, 福州350001; 2. 福建省龙岩市气象局, 龙岩364000;
3. 福建棉花滩水电开发有限公司, 龙岩364000)

摘要: 针对2024年6月16日福建龙岩市的强降雨过程, 以棉花滩水库流域为例, 系统分析了此次强降雨过程的降水时空分布特征及水库入库流量的变化规律。通过分析降水量与水库入库流量的相关性, 建立了雨洪关系经验模型, 并提出了临界面降水量预警指标, 同时引入了半分布式水文模型TOPMODEL 对该洪水过程进行模拟预报。结果表明: 此次强降雨过程累计面降水量大, 且强降雨主要集中在流域下游, 导致水库入库洪水短时间内迅速上涨, 并形成超100年一遇洪峰; 此次洪水过程的有效降水预警时长为12 h, 降水预警指标为100 mm; TOPMODEL 水文模型对此次洪水过程模拟效果良好, 模型确定性系数达0.97, 径流深误差和洪峰误差分别为3.77%和8.35%。

关键词: 强降雨; 入库流量; 雨洪关系; 洪水预报; 福建龙岩市; 棉花滩水库

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2025)05-43-06

0 引 言

2024年6月16日福建龙岩市遭遇了一场暴雨至局部特大暴雨的强降雨天气, 全市超过1/4气象站降水量突破历史纪录。此次降水过程具有极端性强、致灾风险高、累计降水量大等特点。棉花滩水库位于龙岩市境内, 是汀江干流上的重要水利工程, 兼具发电和防洪功能, 属于大(1)型水库。在此次强降雨过程中, 棉花滩水库入库洪水起涨迅猛, 入库流量从16日14时的1 180 m³/s增长至23时的9 860 m³/s, 短短10 h增长了7.36倍, 为棉花滩水库自2002年建库以来的最大洪峰流量, 洪水强度超100年一遇。面对如此严峻的洪水形势, 福建棉花滩水电公司通过预泄腾库等措施, 成功将水库下游超100年一遇洪水降为

5年一遇, 不仅确保了大坝防洪安全, 还为下游低洼地区群众争取到了6 h的宝贵时间进行转移, 有效减轻了下游地区的防洪压力。

强降雨是引发洪涝灾害的主要原因之一, 当强降雨超出地表的吸收能力和河流的排泄能力时, 就会形成洪水^[1]。水库防洪在气象防灾减灾体系中占据着重要地位, 通过水库的调蓄能力, 可以有计划地控制洪水, 削减洪峰流量^[2-4], 从而减轻防洪区的洪灾损失。

为提升强降雨预警和洪水预报能力, 水文与气象学者开展了大量研究。张义等^[5]对北京门头沟区“23·7”特大暴雨洪水的成因进行分析, 并提出了针对性的改进策略; 陈曦桐等^[6]使用洪水演进法还原了2023年黑龙江省莲花水库的调蓄洪水过程, 并分析了洪水的特点与组成; 王淑英

收稿日期: 2025-03-15

第一作者信息: 卞逸舒, 女, 硕士, 助理工程师, E-mail: Bianysnuist@163.com。

通信作者信息: 肖秀珠, 女, 硕士, 正高级工程师, E-mail: xxzcuckoo@sina.com。

等^[7]从降水特征、山洪过程及人类活动3个方面,分析了剡溪小流域“2023.7.22”短历时暴雨山洪的致灾特征,结果表明短时强降水是此次山洪致灾的主要原因;朱雪梅等^[8]以培秀河小流域为例,分析了南方山区小流域内产汇流的变化规律,并构建了小流域洪水预警方案。此外,众多水文模型也被广泛应用于洪水模拟,如中国山洪水文模型 CNFF^[9]、半分布式模型 TOPMODEL^[10]、分布式模型 SWAT^[11]等。张艳军等^[12]以官山河流域为例,基于 TOPMODEL 模型构建了山区水文模型;张浩等^[13]通过构建 HEC-HMS 水文模型,对渠江流域洪水进行了模拟,其结果为渠江流域洪水预报分析提供了参考。

本文以 2024 年 6 月 16 日棉花滩水库的强降水致洪过程为研究对象,基于地面自动气象站逐小时降水资料和水库逐小时入库流量资料,并结合地理信息技术,深入剖析水库入库流量与降水的耦合变化特征,建立雨洪关系经验模型及洪水预报模型,开展水库入库流量预测及洪水预报检验分析。研究旨在为该流域水文气象服务提供经验参考,提升南方山区流域洪水预报水平,并为洪水灾害风险预警和洪水调度提供参考依据。

1 研究区域及数据来源

棉花滩水库地处福建龙岩永定区,集雨面积 7 907 km²。研究区位于中亚热带湿润季风气候区,多年平均降水量 1 650 mm。流域内土地利用类型以林地、草地和耕地为主,土壤质地主要为粉黏壤土。

本研究收集的基础数据包括:①逐小时降水数据,采用 2024 年 6 月 16—17 日棉花滩水库流域地面自动站观测资料,数据来源于福建省气象信息中心;②逐小时入库流量数据,由福建棉花滩水电开发有限公司提供;③数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,来源于国家基础地理信息中心。所有数据均经过严格的质量控制,通过异常值识别与剔除、缺失值插补等处理,确保了数据的可靠性与完整性。

2 研究方法

2.1 降水—流量相关性分析

为了分析降水与流量的关系,本研究对致洪暴雨过程的洪峰流量出现前的逐小时入库流量与对应时刻的逐小

时滑动累计面降水量进行滑动相关分析。 SCC 为累计降水量和累计流量的滑动相关系数。 SCC 取值范围为 $[-1, 1]$,正值表示正相关,负值表示负相关,0 表示不相关。当相关系数变化趋于稳定时,表明此时的累计时长即为有效预警时长, SCC 计算公式如下:

$$SCC = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (1)$$

式中: $Var(X)$ 、 $Var(Y)$ 分别为不同时段累计降水量方差、对应时段累计流量方差; $Cov(X, Y)$ 为两者之间的协方差。

通过分析两个序列之间的相关性随累计时间的变化,可确定降水量与流量之间的相关性特征。

2.2 洪水模拟

2.2.1 TOPMODEL 模型

TOPMODEL 是由英国里兹大学于 20 世纪 70 年代开发的半分布式流域水文模型,经过多年在全球各地的应用与改进已逐渐完善。该模型在地形指数分布的基础上,模拟地表径流和地下径流,由于模型结构简单、参数少,与地理信息结合,能真实反映下垫面的变化情况,因此在我国也有广泛应用^[14]。

2.2.2 模型率定与评价

模型率定的目标函数为效率系数 E , E 越接近 1, 模型拟合效果越好。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i^r(t) - Q_i^s(t)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_i^r(t) - Q_{ave}^r(t)]^2} \quad (2)$$

式中: $Q_i^r(t)$ 为第 i 个小时的实测流量, m³/s; $Q_i^s(t)$ 为第 i 个小时的模拟流量, m³/s; $Q_{ave}^r(t)$ 为实测平均流量, m³/s; n 为时间序列长度。

此外,模型还可输出平均径流深误差和洪峰误差,通过效率系数和许可误差来评价模拟结果的优劣,从而确定适用于本地业务应用的水文模型参数。

3 结果及分析

3.1 流域降水时空分布特征

如图 1 所示,棉花滩流域在此次强降水过程中,累计降水量的空间分布存在明显差异。2024 年 6 月 16 日 6 时至 17 日 0 时,共有 30 个自动站累计降水量超过 200 mm,其中 8 个自动站累计降水量超过 300 mm,这些站点均分

布在流域下游,且主要集中在龙岩上杭县。最大单站降水量出现在龙岩上杭县茶地镇,达 375 mm,创上杭气象站最大日降水量极值。

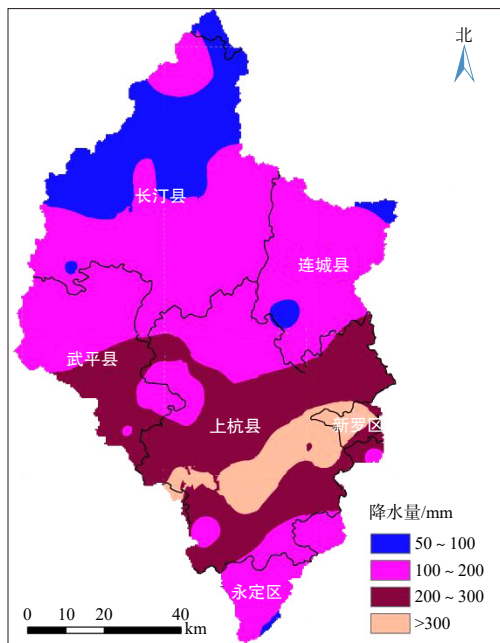


图 1 棉花滩流域2024 年 6 月 16 日 6 时至 17 日 0 时累计降水量分布

由于强降水主要集中在流域下游,水体迅速汇集,导致本次棉花滩水库入库洪峰出现时间略早于上游站点。对水库而言,这种降水空间分布特征使得从强降水开始到入库流量激增的时间间隔缩短,防洪泄洪任务更为紧迫^[15]。

棉花滩流域逐小时面降水量如图 2 所示。6 月 15 日 9 时至 16 日 9 时,流域内基本以小雨为主,小时面降水量低于 5 mm,16 日 10 时降水开始增强,16 日 11—19 时连续 9 h 面降水量超过 10 mm,其中 13 时达到峰值,小时面降

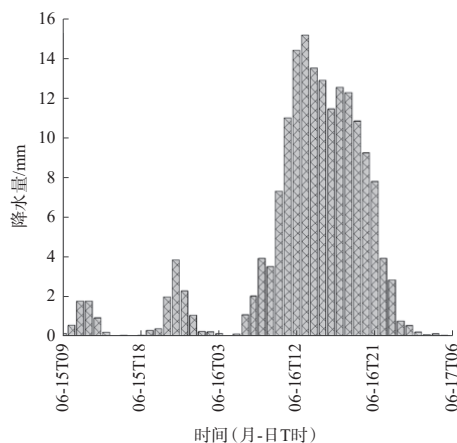


图 2 棉花滩流域逐小时面降水量

水量达 15.1 mm,过程累计面降水量达 156.1 mm。

3.2 棉花滩水库入库洪水特征

棉花滩水库入库流量和降水量如图 3 所示。6 月 16 日 14 时水库入库流量开始大幅增长,平均每小时增长 964.4 m³/s,并于 23 时达到峰值流量 9 860 m³/s。高峰值持续 4 h 后,在 17 日 3 时出现次峰值,随后迅速下降,呈现出“暴涨暴落”的特征。

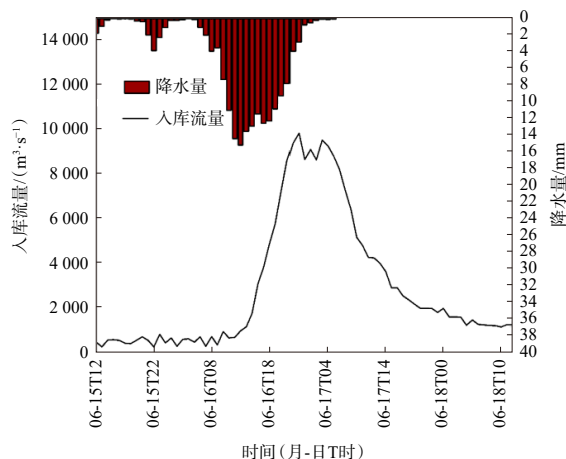


图 3 棉花滩水库入库流量和降水量

棉花滩水库入库流量和降水量变化曲线趋势一致,但棉花滩水库的入库流量峰值出现时间相比降水量峰值出现时间滞后 10 h。这种较小的洪峰与雨峰时间偏差表明水库的汇水时间快,与强降水中心集中在流域下游密切相关。此外,入库流量超过 8 000 m³/s 的高峰值持续时间达 10 h,洪水量大,给下游防洪调度带来较大压力。

3.3 降水量与入库流量的相关性

采用滑动统计方法,对 1—20 h 累计时段的降水量与入库流量进行相关性分析,得到不同累计时段降水量与入库流量的相关系数,如图 4 所示。从图中可以看出,1—12 h 滑动累计降水量与入库流量相关系数从 0.385 上升至 0.830,之后逐渐趋于稳定,这表明 12 h 累计降水量与入库流量的相关性最好,因此将 12 h 作为此次棉花滩水库洪水过程的有效降水量预警时长。

进一步分析 12 h 累计降水量与入库流量数据分析雨洪关系,如图 5 所示。散点图显示两者关系呈正相关,随着降水量的增加,入库流量先是缓慢增长,随后增速逐渐加快。当面降水量大于 100 mm 时,入库流量迅速上升。因此,可将 12 h 累计降水量超过 100 mm 作为此次棉花滩水库

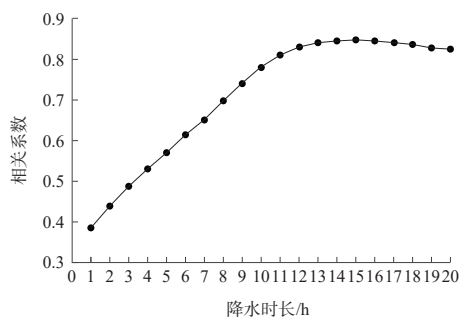


图4 不同累计时段入库流量与降水量的相关系数

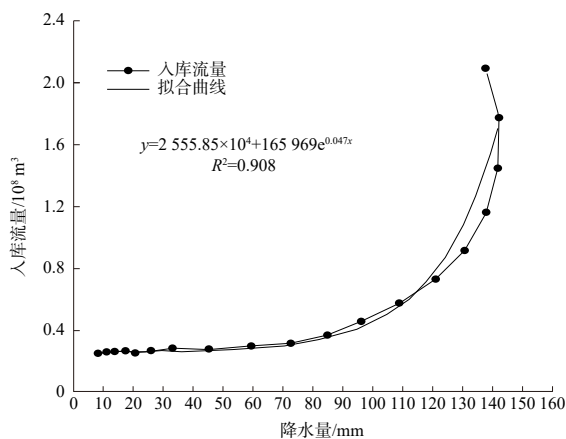


图5 12 h 累计降水量与入库流量散点图及拟合曲线

防洪预警的风险指标。拟合结果显示,变化曲线呈指数分布。应用拟合曲线的函数表达式,结合12 h有效时长内的降水数据,可以进行入库流量预报。结合水库水位—库容面积变化曲线,可以预测未来水位的上涨高度,为水库防洪调度提供参考依据。

12 h 累计降水量与入库流量关系表明,当降水量超过某一阈值后,入库流量的增加速度明显加快,呈现出非线性的关系。其主要原因是降水初期土壤下渗吸收较多,地表径流增加较慢,表现为“雨大水小”;而当降水量继续增加并达到或超过某一阈值时,地表径流和河道汇流加剧,入库流量迅速增加,可能出现“雨小水大”的情况。在制定防洪措施时,应特别关注这种非线性关系,尤其是在预期降水较多时,需采取更为严格的防洪措施。

3.4 洪水模拟检验

在进行洪水模拟之前,需提取流域边界,计算流域地形指数、河道距离水库出口面积分布等地形水文特征。将

流域降水和蒸散发时间序列文件、模型参数文件,以及地形指数、河道距离和面积分布等地形特征文件输入到TOPMODEL中,可以得到流域出口流量序列。通过模型的确定性系数、径流深误差和洪峰误差等指标来评价模拟结果的准确性。

3.4.1 地形水文特征

降水在土壤含水饱和区域直接产生坡面流,径流首先在河道等地势较低处出现,并逐渐向河道两岸的坡地延伸。径流最容易出现在坡度小而汇水面积大的地方。因此,结合地形指数与河道至水库入口不同距离的面积分布,可以有效反映地形地貌特征对径流形成的影响程度。

图6为棉花滩流域地形指数频率分布图,图7为流域内河道距离水库出口的面积分布。

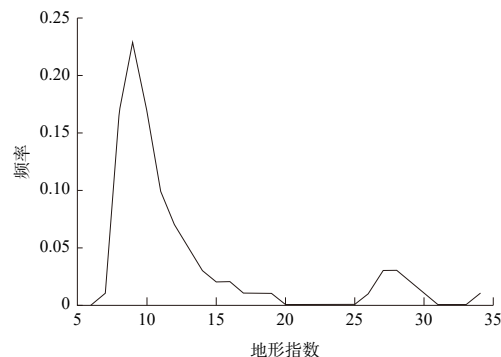


图6 棉花滩流域地形指数频率分布图

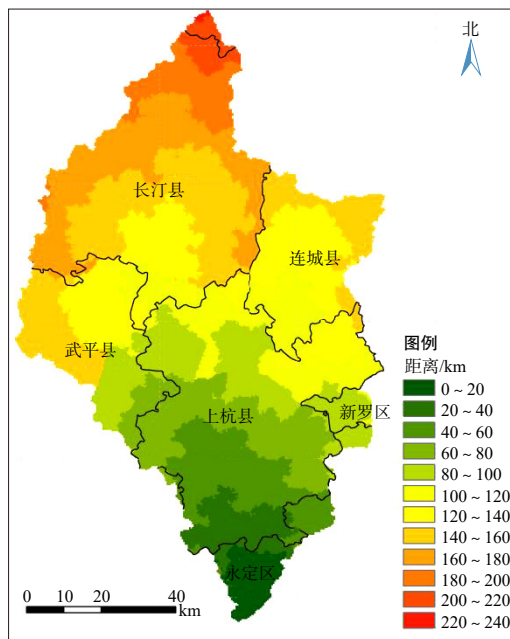


图7 河道至水库入口不同距离的面积分布图

从图中可以看出,流域地形指数为 8~10 的区域占比达 57%,其中以指数 9 的出现频率最高,达 23%。TOPMODEL 水文模型的汇流计算基于子流域的等流时线。流域内各点汇流到流域出口的距离可按照水流长度和流域各网格的拓扑关系推求,再结合汇流速度推求河道距离水库出口的面积分布。棉花滩流域呈南北纵向分布,河流总长度为 220 km。

3.4.2 模型参数率定及检验

采用主观经验结合蒙特卡洛方法对棉花滩水库流域 2024 年 6 月 16 日洪水过程的 TOPMODEL 水文模型进行参数率定。模型参数取值见表 1。经过率定,模型确定性系数达到 0.97,径流深误差 3.77%,洪峰误差为 8.35%,均达到《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)的甲等标准要求,表明洪水模拟效果良好。

表 1 TOPMODEL 水文模型参数

参数	含义	取值
SZM	流域土壤导水率空间分布的形状参数	20
$\ln(T_0)$	饱和土壤导水率的自然对数	$2 \text{ m}^2/\text{h}$
TD	土壤水分受重力作用下排的时间延迟参数	1 h
$SR_{\max}$	根系层最大蓄水容量	0.01 m
RV	为坡面汇流速度	5 000 m/h
ChV	河道汇流速度	18 000 m/h
SR_{init}	根系层初始土壤水分亏缺量	0

对此次洪水过程的实测流量和模拟流量进行对比分析(图 8)。从图中可以看出,模拟洪水流量过程线和实测洪水流量过程线拟合度较好,洪峰峰值接近。然而,实测洪水流量过程线表现出了小幅度的双峰结构,这主要是水库水位测量仪器不稳定性所致。此外,模拟峰现时间较实际峰现时间有一定滞后。

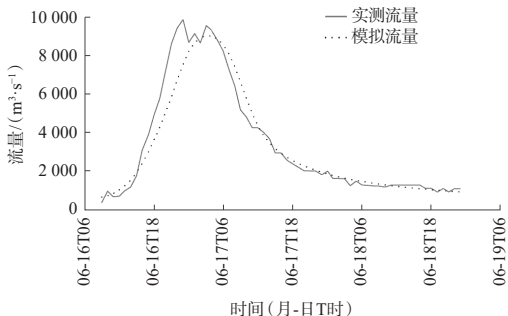


图 8 模拟洪水流量过程线和实测洪水流量过程线拟合图

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)本研究分析了 2024 年 6 月 16 日福建龙岩市棉花滩水库极端降水事件的特征及其雨洪响应。结果表明,此次事件具有显著的极端性,流域内 30 个自动站累计降水量超过 200 mm,其中 8 个站点突破 300 mm,导致水库出现超 100 年一遇洪水,洪峰流量达 $9\,860 \text{ m}^3/\text{s}$ 。强降水中心主要分布在流域下游,使得入库洪峰出现时间较上游站点提前约 2 h,这一空间分布特征显著影响了流域汇流过程。

(2)通过相关性分析发现,累计降水量与入库流量的相关系数在 12 h 后趋于稳定,表明 12 h 累计降水量可作为该水库洪水预警的关键时效指标。这一发现为水库防洪预警提供了重要参考。

(3)基于 12 h 累计降水量与入库流量的关系,构建了雨洪关系指数分布函数。研究结果表明,12 h 累计降水量超过 100 mm 可作为水库防洪预警的临界阈值,这一结果为水库防洪调度提供了科学依据。

(4)TOPMODEL 水文模型的模拟结果显示,洪峰流量模拟精度较高,但峰现时间存在约 1 h 的滞后。这表明模型在洪水预报方面具有一定的适用性,但仍需进一步优化。建议后续研究通过引入更高精度的 DEM 数据和优化土壤参数空间化方案来改进模型性能。

(5)通过科学调度,棉花滩水电公司成功将下游超 100 年一遇洪水降为 5 年一遇,显著减轻了防洪压力。这一成功案例为类似流域的洪水管理提供了重要参考,同时也凸显了精细化预报在防洪调度中的关键作用。

4.2 讨论

本研究通过对 2024 年 6 月 16 日福建龙岩市棉花滩水库极端降水事件的分析,揭示了极端降水的时空分布特征及其对洪水过程的影响,提出了基于 12 h 累计降水量的洪水预警指标,并通过水文模型验证了其适用性。未来,随着模型优化、数据精度提升和多源数据融合技术的应用,洪水预警和调度能力将进一步提升,特别是在引入高精度 DEM 数据、优化土壤参数空间化方案及结合人工智能技术方面,有望实现更精准的洪水预报和智能化调度。同时,本研究的成果对提升水库防洪能力、减轻洪水损失、促进流域综合管理具有重要的现实意义,为类似流域的洪水管

理提供了科学依据和实践经验。在全球气候变化背景下,极端降水事件可能更加频繁,未来研究可尝试结合气候模型进一步评估洪水风险变化趋势,推动跨流域协同防洪和精细化调度策略的广泛应用,为区域防洪减灾和可持续发展提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1] 王卓然,刘杰.2021年强降水影响下的海河平原地下水动态特征研究[J].水文,2022,42(6):68-72.
- [2] 潘洋洋,谭军,李平,等.湖南省涪天河水库应对极端暴雨的防洪调度研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(6):57-64.
- [3] 王洪娜.雨量站空间分布对山区小流域库水位预报影响研究[J].水利科技,2024(4):15-19.
- [4] 杨辉辉,李媛媛,黄锋,等.面向多区域防洪的珠江流域水库群协同调度模型研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(10):27-34.
- [5] 张义,魏保义,费明龙,等.北京市门头沟新城“23·7”特大暴雨洪水灾害成因分析及对策研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(10):15-19.
- [6] 陈曦桐,崔盈.2023年牡丹江暴雨洪水及莲花水库防洪作用[J].黑龙江水利科技,2024,52(2):75-76.
- [7] 王淑英,孙英军,王雨歌.浙江省剡溪小流域“2023.7.22”短历时暴雨山洪致灾成因分析[J].中国防汛抗旱,2024,34(5):32-37.
- [8] 朱雪梅,吴立愿.南方山区小流域“暴雨—产流—汇流”及洪水预警初步研究——以培秀河为例[J].广西水利水电,2024(5):52-55.
- [9] 尹雅清,刘恒语,李匡,等.天津市杨庄水库“2024.8.10”暴雨洪水复盘分析[J].中国防汛抗旱,2025,35(4):63-69.
- [10] 杨晓洲.基于TOPMODEL模型的安墩水流域洪水模拟研究[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [11] 王中根,刘昌明,黄友波.SWAT模型的原理、结构及应用研究[J].地理科学进展,2003(1):79-86.
- [12] 张艳军,宋圆馨,董文逊,等.基于暴雨壤中流机制的山区水文模型研究与应用[J].工程科学与技术,2023,55(1):287-295.
- [13] 张浩,蒋林杰,付成华.基于HEC-HMS水文模型的中小流域洪水模拟预报分析[J].四川水利,2024,45(1):55-60.
- [14] 肖秀珠,张红梅,刘君,等.TOPMODEL水文模型在九龙江北溪流域洪水模拟中的应用[J].水利科技,2017(2):1-4.
- [15] 姜志宏.水口水库“2002.06.15”暴雨洪水分析[J].水利科技,2004(1):9-10.
- [16] 王淑英,孙英军,王雨歌.浙江省剡溪小流域“2023.7.22”短历时暴雨山洪致灾成因分析[J].中国防汛抗旱,2024,34(5):32-37.
- [17] 李永坤,毛富增,李明阳,等.基于改进的新安江模型的设计洪水修订方法——以潮河流域为例[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):49-54.
- [18] 李悦,刘冀,杨少康,等.不同目标函数对新安江模型参数的敏感性和不确定性影响分析[J].水文,2024,44(2):1-7,18.
- [19] 李丽,路顺昌,王加虎,等.自适应随机搜索算法在水文模型参数优选中的并行效率研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(8):15-19.
- [20] 李金城,常学秀,高伟.目标函数权重对PEST-HSPF水文率定的影响研究[J].水文,2017,37(6):9-14.
- [21] 邹强,王学敏,李安强,等.基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J].水利学报,2016,47(8):967-976.

编辑 江 密

(上接第42页)

- [2] 赵丽平,任明磊,刘昌军,等.小型水库洪水预报模型研究及应用[J].中国防汛抗旱,2024,34(4):77-82.
- [3] 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,2021.
- [4] 王佩兰.三水源新安江流域模型的应用经验[J].水文,1982(5):24-31.
- [5] BEVEN K.TOPMODEL: A critique[J].Hydrological Processes, 1997, 11(9):1069-1085.
- [6] 徐杰.湿润流域实时洪水预报研究[D].南京:河海大学,2020.
- [7] 赵丽平,邢西刚,宋君,等.分布式新安江模型在横锦水库洪水预报中的应用[J].中国防汛抗旱,2022,32(7):72-76.
- [8] 曲丽英.高分辨率数值降雨预报在中小流域洪水预报中的适用性评

编辑 姚力玮