

土地利用变化和水库调控对洪水过程的影响 ——以赣江上游平江流域为例*

陈峻琳^{1,2}, 温天福^{1,3**}, 李国芳², 肖 勇¹, 张静文^{1,3}, 鲁翔宇^{1,4}

(1: 江西省水利科学院, 南昌 330029)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(3: 水旱灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330029)

(4: 南昌工程学院水利工程学院, 南昌 330029)

摘 要: 1980s 以来土地利用变化及水库调控作用对赣江上游洪水形成过程产生了较大影响, 解析洪水过程对下垫面变化的响应对防洪减灾意义重大。本文以赣江上游平江流域为例, 根据下垫面差异将 1981—2021 年划分为 1981—1992 年、2000—2010 年、2011—2021 年 3 个时期, 分别记为 85 时期、05 时期及 20 时期, 采用情景分析法设置不同时期土地利用和水库调控情景, 通过构建 MIKE SHE 模型并模拟各种情景下的洪水过程, 进一步分析土地利用变化及水库调控对洪峰、洪量及峰现时间的影响程度。结果表明: 85 时期至 20 时期, 平江流域草地、耕地分别减少 3.49% 和 1.72%, 林地、建设用地分别增加 3.98% 和 1.41%。受土地利用变化的影响, 20 时期对比 85 时期洪水过程洪峰减少 6.14%、洪量减少 7.03%, 峰现时间延后 1.5 h, 洪峰、洪量、峰现时间在下垫面变化的影响中分别占 48%、50% 及 51%; 水库调控对洪水过程发挥削峰错峰作用, 洪峰降低 6.60%, 洪量减少 5.72%, 峰现时间增加 12.29%, 在洪峰、洪量及峰现时间变化中的贡献度分别为 52%、50% 及 49%。土地利用变化一定程度上降低洪峰和洪量, 而峰现时间延迟程度存在明显差异, 其中大洪水、中洪水响应程度低于小洪水, 与用地扩张及植被覆盖增长的土地利用转换机制有关; 在水库调控影响下, 大洪水洪峰和洪量敏感性最强, 中洪水次之, 小洪水相对弱, 大、中、小洪水峰现时间都有延迟但相差不大。本研究分析了水库调控与土地利用变化对洪水过程的影响程度, 可为流域洪水预报提供科学参考。

关键词: 土地利用变化; 水库调控; 洪水过程; MIKE SHE; 平江流域; 赣江上游

Effects of land use change and reservoir operation on flood process: A case study of Pingjiang River Basin in the upper Ganjiang River*

Chen Junlin^{1,2}, Wen Tianfu^{1,3**}, Li Guofang², Xiao Yong¹, Zhang Jingwen^{1,3} & Lu Xiangyu^{1,4}

(1: *Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, P.R.China*)

(2: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(3: *Jiangxi Key Laboratory of Flood and Drought Disaster Defense, Nanchang 330029, P.R.China*)

(4: *School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, P.R.China*)

Abstract: Due to land use change and reservoir operation, the flood process has been greatly affected in the upper reaches of the Ganjiang River Basin since the 1980s. It is of great significance to analyze the influence of land use change and reservoir operation on the flood process in the upper reaches of the Ganjiang River. Taking the Pingjiang River Basin in the upper reaches of the Ganjiang River as an example, based on different underlying surface conditions, this study divided the watershed land use from 1981 to 2021 into 1981–1992, 2000–2010 and 2011–2021, recorded as 85 period, 05 period, and 20 period, respectively, used scenario analysis to create land use and reservoir operation scenarios for these three periods. The flood process was simulated using MIKE

* 2024-01-29 收稿; 2024-07-15 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (52169001)、水利部重大科技项目 (SKS-2022010)、国家重点研发计划项目 (2023YFC3206002) 和江西省水利科技项目 (202426ZDKT33, 202325ZDKT14) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: wen-tianfu@whu.edu.cn。

SHE under various scenarios, effects of land use change and reservoir operation on flood peak, flood volume, and peak time were further analyzed. Results showed that from 1985 to 2020, the proportion of grassland and cultivated land decreased by 3.49% and 1.72%, respectively, while forest land and construction land increased by 3.98% and 1.41% in proportion, respectively. Under such condition, the flood peak and volume for 2020 decreased by 6.14% and 7.03%, respectively, compared with those for 1985, and the peak time was delayed by 1.5 h, which accounted for 48%, 50%, and 51% of the effects of the changes in the underlying surface. Due to the effect of reservoir operation on the flood process, the flood peak and volume decreased by 6.60% and 5.72%, respectively, while the peak time increased by 12.29%, contributing to 52%, 50% and 49% of the changes in the flood peak, flood volume and peak time, respectively. Furthermore, the results showed that the flood peak and volume were reduced to a certain extent due to land use change, but the delay degree of peak time was different. The effects of major and medium flood events were lower than those of minor flood events, which related to the land use cover mechanism of land expansion and vegetation cover growth. Under the influence of reservoir operation, the peak and volume of major flood events were more sensitive than those of medium flood events, whereas those of minor flood events were relatively insensitive, and the peak time of these flood events was delayed. This study analyzed the impact of reservoir operation and land use change on the flood process, which can provide a scientific basis for watershed flood forecasting.

Keywords: Land use change; reservoir operation; flood process; MIKE SHE; Pingjiang River Basin; upper Ganjiang River

洪水是最典型、常见的自然灾害之一^[1],下垫面因素对洪水过程影响明显。流域下垫面变化对洪水的影响是水文研究的重点和难点,下垫面因素包括植被、土地利用变化、土壤、水库调控等^[2],其中土地利用变化通常有着较大空间尺度和较长时间尺度的特点,水库调控属于强烈人类活动,两者均对洪水形成过程产生重要影响。

洪水过程变化响应可运用水文模型和经验统计^[3]两种方法。相对于经验统计法,具有物理机制的水文模型通过蒸散发、产流及汇流参数在一定程度上反映下垫面变化的影响。土地利用变化改变地表蒸发及不透水面积,影响坡面汇流及河网汇流,对洪水要素产生一定影响^[4]。当前研究多采用水文模型法,基于流域多年土地利用/覆盖变化^[5],或将模型与情景分析法^[6-8]相结合,设置不同情景分析土地利用类型转换对不同量级洪水的影响程度^[9]。如孙延伟等^[10]构建秦淮河流域 HEC-HMS 模型,设置全流域及不同位置不透水面扩张情景,发现小洪水的洪峰响应均大于大洪水,且下游主干河区域比河源区域不透水面扩张大、小洪水洪峰涨幅差距明显。上述研究的不足在于研究单个下垫面因素下洪水响应较多,而多因素影响下分离出土地利用变化的作用的研究相对少。此外,在洪水发生时可通过水库调蓄作用削峰和推迟峰现时间,进一步降低下游防洪风险^[11],特别是大中型水库调节对洪水发挥的拦蓄、削峰作用明显^[12-13],徐卫红等^[14]基于长江中下游一、二维耦合水动力模型,发现针对 1954 年、1998 年两场洪水,三峡水库分别减少荆南三口分洪量 1.58% 和 0.61%,分别减少洪峰流量 24.6% 和 18.4%。由于水库功能及水文气象差异的原因,水库调控对洪量影响更为显著^[15]。国内外研究对洪峰、洪量分析较多,而结合峰现时间变化定量分析水库调控下不同量级洪水响应较少。MIKE SHE 模型作为分布式水文模型,具有很强的物理机制,可以很好地反映降雨及下垫面要素的时空变化,结合情景设置可用于洪水模拟^[16]、洪水风险分析^[17]以及洪水过程变化研究。

平江流域位于赣江流域上游,1989 年 6 月 7—8 日、12—13 日两次暴雨的总降雨量为 130~200 mm,1996 年 8 月 1—2 日全流域降雨量为 258.5 mm,遭遇 15 年一遇洪水,洪峰达到 $1890 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[18];1980 年流域土壤侵蚀严重,甚至淤塞河道、水库,在 1981—2000 年植树造林对水土流失进行有效治理,流域植被率达到 73.3%^[18];1970 年流域内大型水库——长冈水库大坝工程竣工,1985—2004 年进行加固处理^[19]。水库兴建及土地利用变化情况表明流域下垫面变化显著,本研究运用 MIKE SHE 模型模拟不同时期流域场次洪水过程,采用情景分析法深入分析不同量级洪水对土地利用变化及水库调控的响应,对于流域防洪风险管理具有十分重要的意义。

1 研究区及数据资料

1.1 研究区概况

平江是赣江上游右岸一级支流,由潋江(东河)、潋水(北河)汇合,流入贡水,流域面积 2857 km^2 ,主河

道长 150 km,比降 1.25‰,多年平均降雨量为 1585 mm,平均气温为 18.8 ℃^[20]。平江流域主要土地利用类型为林地、农业用地、草地以及城市建设用地等,主要植被类型为人工针叶林和亚热带常绿阔叶林^[21]。支流潯江上游建有一座大(Ⅱ)型长冈水库,具有防洪兼顾发电功能,水库控制面积 848.5 km²,按 100 年一遇洪水设计,2000 年一遇洪水校核,总库容为 3.57 亿 m³,防洪库容为 1.14 亿 m³^[22]。流域洪水由暴雨形成,洪涝灾害频发,春汛发生在 3—4 月但峰量不大,夏汛发生在 5—6 月但峰高、峰量大,秋汛发生在 7—8 月,受到台风影响形成短历时洪水^[23]。平江流域水系如图 1 所示。

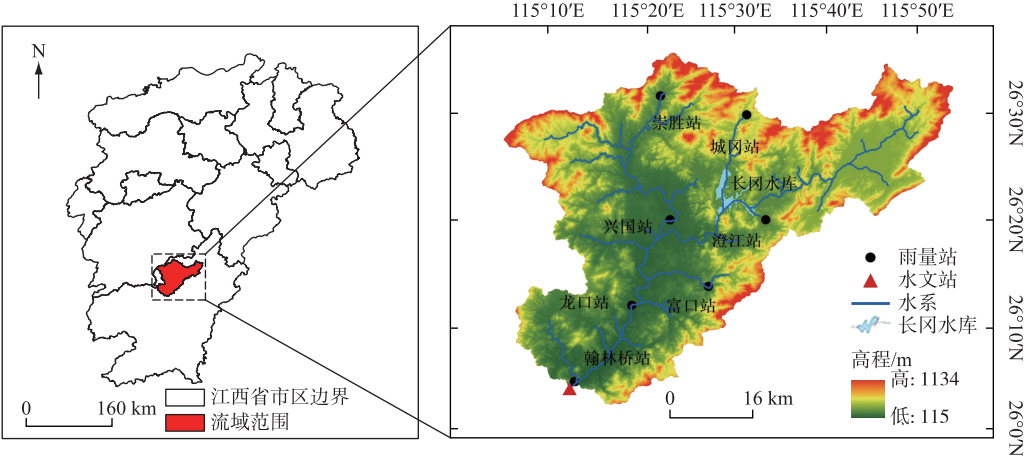


图 1 平江流域水系
Fig.1 The river network of Pingjiang River Basin

1.2 数据来源及预处理

研究数据包括 DEM、土地利用、土壤属性、水位流量、降雨蒸发、水库特征值及洪水摘录,见表 1。流域土地利用可分成林地、灌木、耕地、草地、建设用地及水体六类;土壤类型分为壤土、粉质壤土、黏土、砂质黏壤土、砂质壤土 5 类,由土壤—植物—空气—水 (SPAW) 模型计算土壤水文常数;流域雨量站有澄江站、城冈站、崇胜站、兴国站、富口站、龙口站和翰林桥站,水文站为翰林桥站,位于流域出口处,是流域控制性水文站;平江流域 28 场洪水从翰林桥站资料中按洪峰、洪量较大的原则选取,对 1970—2021 年的年最大洪峰流量序列,运用频率分析得出重现期,按照《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)将洪水量级划分为大洪水($Q_{\max}>1990\text{ m}^3/\text{s}$)、中洪水($1990\text{ m}^3/\text{s}\geq Q_{\max}\geq 1550\text{ m}^3/\text{s}$)和小洪水($Q_{\max}<1550\text{ m}^3/\text{s}$)。

表 1 数据情况
Tab.1 Summary on data

名称	基本情况	数据来源
DEM	2000 年 90 m 分辨率	地理空间数据云 SRTMDEMUTM DEM 数字高程数据产品 (http://www.gscloud.cn)
土地利用	1985—2020 年 30 m 分辨率	《CLCD 1985—2020 年全国 30 m 土地覆盖数据集》 ^[24]
土壤	2020 年 1:100 万比例	HWSO 数据集 ^[25] (FAO 粮农组织)
水位流量	1970—2021 年场次	江西省水文监测中心
降雨量	1981—2021 年场次	江西省水文监测中心
洪水摘录	1981—2021 年场次	江西省水文监测中心
蒸发量	1981—2021 年逐日	江西省水文监测中心
长冈水库特征值	水位—库容,水位—下泄能力 防洪调度规则	《江西省大型水库资料汇编》(江西省水利厅主编)

2 研究方法

2.1 MIKE SHE 模型

2.1.1 模型原理 MIKE SHE 模型是 1990s 初丹麦水力学研究所对 SHE 模型改进而形成的具有很强物理机理的分布式水文模型^[26]。模型主要由坡面流、河流和湖泊、非饱和带、蒸散发、饱和带 5 个子模块组成,每个子模块可模拟一个主要的水文过程,但不包含河道汇流计算。采用 MIKE Hydro River 水动力模型模拟河道汇流,耦合 MIKE SHE 时设置的河道会投影到相邻网格边界,与坡面流等进行水量交换。MIKE Hydro River 水动力模型以隐式有限差分法计算,并间断计算水位点与流量点数值,用马斯京根法模拟洪水演进。

2.1.2 模型构建 根据模拟范围、精度及计算步长划分为水平 170 个、垂向 160 个网格,网格大小 500 m×500 m。土地利用模块中叶面积指数(LAI)参考文献[27-28],根系深度参考模型植被属性文件取值,LAI、根系深度(RD)在年内根据生长周期赋值,将流域土地利用类型分为六类,主要洪水场次发生在 5—8 月,取值见表 2。模型中离散网格,在土地利用模块中每个网格都有对应的 LAI 与 RD 值,通过不同时期土地利用矢量文件导入后,面积变化引起网格对应参数值发生改变以反映土地利用的变化。根据 SPAW 模型计算出 5 种土壤类型水文常数见表 3。

表 2 5—8 月不同土地利用类型中叶面积指数、根系深度的变化
Tab.2 Monthly changes of LAI, RD in different types of land use from May to August

时间	林地		灌木		耕地		草地		建设用地		水体	
	LAI	RD/mm	LAI	RD/mm	LAI	RD/mm	LAI	RD/mm	LAI	RD/mm	LAI	RD/mm
5 月	5	650	2.3	320	4.5	800	3.5	500	1	200	0	0
6 月	6	700	2.5	350	4	600	4	700	0.95	170	0	0
7 月	6.5	800	2.3	320	3.5	500	4	700	0.9	150	0	0
8 月	5	650	2.2	310	3	400	4	700	0.9	150	0	0

表 3 土壤水文常数
Tab.3 Soil hydrological constant values

土壤类型	饱和含水量/%	田间持水量/%	凋萎系数/%	饱和水力传导度/($\times 10^{-6}$ m/s)
壤土	45.7	28.0	14.3	4.05
粉质壤土	47.2	30.6	14.2	3.54
黏土	44.4	27.6	16.0	3.34
砂质黏壤土	44.6	27.2	15.4	3.66
砂质壤土	41.9	24.5	10.5	1.68

MIKE Hydro River 与 MIKE SHE 耦合时在指定河道与坡面流进行水量交换。模型根据流域水系设置主要河道,主要支流发源于山区,上边界设置为闭合边界,翰林桥水文站作为下边界,按马斯京根法进行河道演算。选定水库所在河道位置添加断面,导入描绘水库形状的 shape 文件和 DEM,根据挡水与泄水建筑物运用额外库容面积法概化水库功能,设置控制表达式模拟水库调度过程。长冈水库调度规则为:当库水位达到汛限水位(190.0 m)且低于防洪高水位(192.44 m),根据实际来水情况按入库流量或下游安全泄量 500 m³/s 下泄;当库水位超过防洪高水位(192.44 m),在保障水库大坝安全的前提下,开闸敞泄。

2.2 模型精度评价方法

选用确定性系数、相对误差及合格率 3 个指标评价模型模拟精度。根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008),单场洪水过程确定性系数不低于 0.7,洪峰和洪量相对误差在 20% 以内,峰现时间误差不超过 3 h,则模拟的洪水过程为合格。

确定性系数(DC)是洪水模拟过程与实测过程之间的相似程度,公式如下:

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \overline{y_0}]^2} \tag{1}$$

式中, $y_0(i)$ 为实测值, $y_i(i)$ 为模拟值, $\overline{y_0}$ 为实测值的均值, n 为资料系列长度。

相对误差是模拟值与实测值的绝对误差与实测值之间的比值, 公式如下:

$$RE = \frac{y_i - y_0}{y_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中, RE 为相对误差(%), y_i 为模拟值, y_0 为实测值。

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008), 一次模拟的误差小于许可误差(70%)时为合格预报。合格模拟次数占总次数的比例为合格率, 代表模型整体模拟水平, 合格率计算公式为:

$$QR = \frac{n}{m} \times 100\% \tag{3}$$

式中, QR 为合格率(%), n 为合格模拟次数(次), m 为总次数(次)。

2.3 情景分析法

将 1981—2021 年平江流域土地利用划分 3 个阶段来反映下垫面变化, 分别是 1981—1992 年、2000—2010 年、2011—2021 年。1981—1992 年流域列入“全国八片水土保持重点治理区”^[29], 开展水土流失治理, 下垫面变化不大; 1992—2000 年采取一系列措施恢复林地, 且流域内有大型水库的加固处理, 流域下垫面变化较大, 不作为研究阶段; 2000—2010 年水土流失治理取得成效, 下垫面变化缓慢, 作为研究阶段; 2011—2021 年人口聚集、城镇化增加但较为集中, 在流域中占比较小, 流域下垫面变化也趋于稳定, 作为研究阶段。3 个阶段选取 1985 年、2005 年及 2020 年作为典型年, 代表 3 个阶段下垫面条件, 并记为 85 时期、05 时期、20 时期。以不同时期土地利用情况及是否考虑水库调控设置了 6 种情景: 85 时期有水库调控下土地利用情景、05 时期有水库调控下土地利用情景、20 时期有水库调控下土地利用情景、85 时期无水库调控下土地利用情景、05 时期无水库调控下土地利用情景、20 时期无水库调控下土地利用情景。6 种情景组成不同的下垫面条件, 模拟流域场次洪水过程, 考虑有水库调控作用, 分析不同时期下垫面变化下洪峰、洪量及峰现时间差异, 量化下垫面变化对洪水过程的影响; 考虑无水库情景下, 模拟不同时期下垫面变化下洪峰、洪量及峰现时间, 并与有水库调控下的结果对比, 量化水库调控对洪水过程的影响。

3 结果分析

3.1 土地利用变化分析

3 个典型年的土地利用类型如图 2 所示, 其面积及占比变化见表 4。

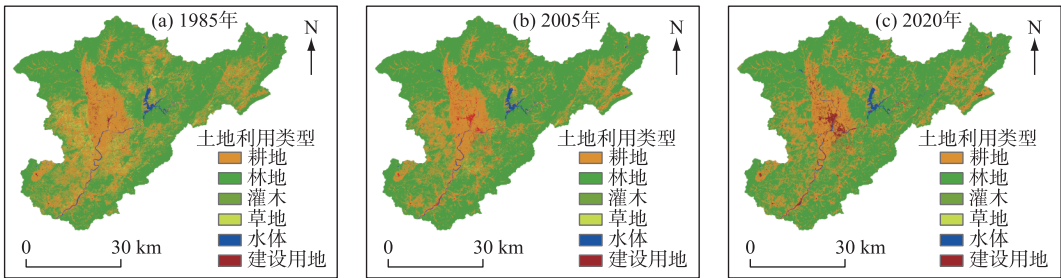


图 2 3 个典型年土地利用类型情况

Fig.2 Land use types situation in three typical years

表 4 3 个典型年土地利用类型面积、占比及面积变化量
Tab.4 Areas, proportion and changes in area of land use types in three typical years

土地类型	1985 年		2005 年		2020 年		85 时期至	05 时期至	85 时期至
	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	05 时期变 化量/km ²	20 时期变 化量/km ²	20 时期变 化量/km ²
耕地	777.30	26.79	656.96	22.64	727.41	25.07	-120.34	70.45	-49.89
林地	1965.00	67.72	2143.89	73.88	2080.42	71.70	178.89	-63.47	115.42
灌木	1.95	0.07	1.31	0.05	0.75	0.03	-0.64	-0.56	-1.20
草地	104.00	3.58	26.41	0.91	2.71	0.09	-77.59	-23.70	-101.29
水体	27.41	0.94	26.95	0.93	23.41	0.81	-0.46	-3.54	-4.00
建设用地	26.08	0.90	46.22	1.59	67.04	2.30	20.14	20.82	40.96
总计	2901.74	100.00	2901.74	100.00	2901.74	100.00	0	0	0

1985—2020 年,平江流域土地利用类型以林地和耕地为主,占总面积的 93%以上,耕地集中分布于流域西北部,草地零散分布,建设用地在兴国县城中心周围分布,水域面积包括平江干支流及水库等水利工程占地。1985—2020 年土地利用变化明显,耕地面积减少 1.72%,林地增加 3.98%,草地减少 3.49%,建设用地增加 1.41%,主要的土地利用类型变化是草地、耕地转化为林地及建设用地,草地面积比耕地面积减少更多,林地面积比建设用地面积增加更多,这与当地采取退耕还林措施和城镇化水平提高有关。1985—2005 年流域在水土流失治理中采用退耕还林、植树造林措施来涵养水源、保持水土^[23],耕地面积减少量大于草地,而林地面积增加量大于建设用地。2005—2020 年在水土流失取得成效后,《赣州市国土空间规划》(赣州市人民政府主编)预留一定数量耕地用于基本农田建设,发展粮食产业,同时加快推进城镇化建设水平,耕地面积与林地面积有相反变化方向,但相对于 1985—2005 年变化量更小,草地面积相对 1985—2005 年减少量更多,建设用地增加量更多。

3.2 模型参数率定及验证

将 28 场洪水根据下垫面时期划分,如 85 时期内选取 9 场,前面 6 场率定,通过控制变量法率定 MIKE SHE 中产流及汇流参数(坡面流、饱和带及河道演算等相关参数),以模拟下垫面条件。对于 05 时期、20 时期,采用与 85 时期相同的方式,选用相应时期的场次洪水和土地利用数据。模型中率定参数共 18 个,主要敏感参数 13 个,其中最敏感参数是初始地表水深、壤中流单位储水量、壤中流出流时间常数、壤中流下渗时间常数、河道糙率,敏感参数是地表蓄滞水深、快速基流单位储水量、快速基流出流时间常数、坡面流曼宁系数、河床渗漏系数、河道初始水深、延迟参数、形状参数。主要敏感参数率定见表 5,典型洪水模拟如图 3 所示。

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008),结果表明模拟 28 场洪水,22 场合格,合格率为 78.57%,其中 85 时期率定 6 场,5 场合格,合格率为 83.3%,验证期 3 场全合格,合格率为 100%;05 时期率定 9 场,6 场合格,合格率为 66.7%,验证期 3 场有 2 场合格,合格率为 66.7%;20 时期率定 5 场,4 场合格,合格率为 80%,验证期 2 场都合格,合格率为 100%,模拟精度达到乙级评价标准。部分典型洪水模拟评价结果见表 6。

3.3 下垫面变化下洪水响应

将 28 场洪水用于情景分析,其中 3 场大洪水、5 场中洪水及 20 场小洪水,构建 85 时期至 05 时期、05 时期至 20 时期、85 时期至 20 时期土地利用分布及有水库调控作用的 3 种下垫面情景,模拟洪水洪峰、洪量及峰现时间的变化情况,结果见表 7。

与 85 时期对比,20 时期洪峰降低 12.73%,洪量降低 13.26%,峰现时间延后 25.23%,即延后 3 h。模拟结果表明随着下垫面变化,洪水形成过程中峰现时间变化较明显,变化率比洪峰及洪量变化大,洪量相对洪峰的变化大,主要原因是退耕还林、修建梯田等措施治理水土流失^[30]引起流域不透水面积减小,增加地表粗糙度,削减汇流时洪峰流量及增加洪水历时;另一方面水库有一定的调蓄能力,对较大来水削减洪峰、错峰下泄。85 时期至 05 时期、05 时期至 20 时期下垫面条件变化对洪水过程的影响程度不同,85 时期至 05 时

表 5 不同时期主要敏感参数率定
Tab.5 Calibrated values of main sensitive parameters in different periods

类型	模型参数	85 时期	05 时期	20 时期
坡面汇流	地表蓄滞水深/mm	100	150	120
	初始地表水深/m	0.015	0.035	0.04
	壤中流单位储水量	0.07	0.12	0.15
	壤中流出流时间常数/d	4	5	3
	壤中流下渗时间常数/d	15	20	8
	快速基流单位储水量	0.25	0.25	0.3
	快速基流出流时间常数/d	20	10	10
坡面汇流	耕地	2.86	2.33	2.5
	林地	2	3	3.2
	草地	2.5	2.2	2.2
	灌木	1.5	1.2	1.2
	水体	30	30	30
	建设用地	25	25	25
河道汇流	河道糙率/(s/m ^{1/3})	0.032	0.035	0.035
	河床渗漏系数	5×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
	河道初始水深/m	0.5	0.5	0.6
	延迟参数	5	10	2
	形状参数	0.2	0.15	0.3

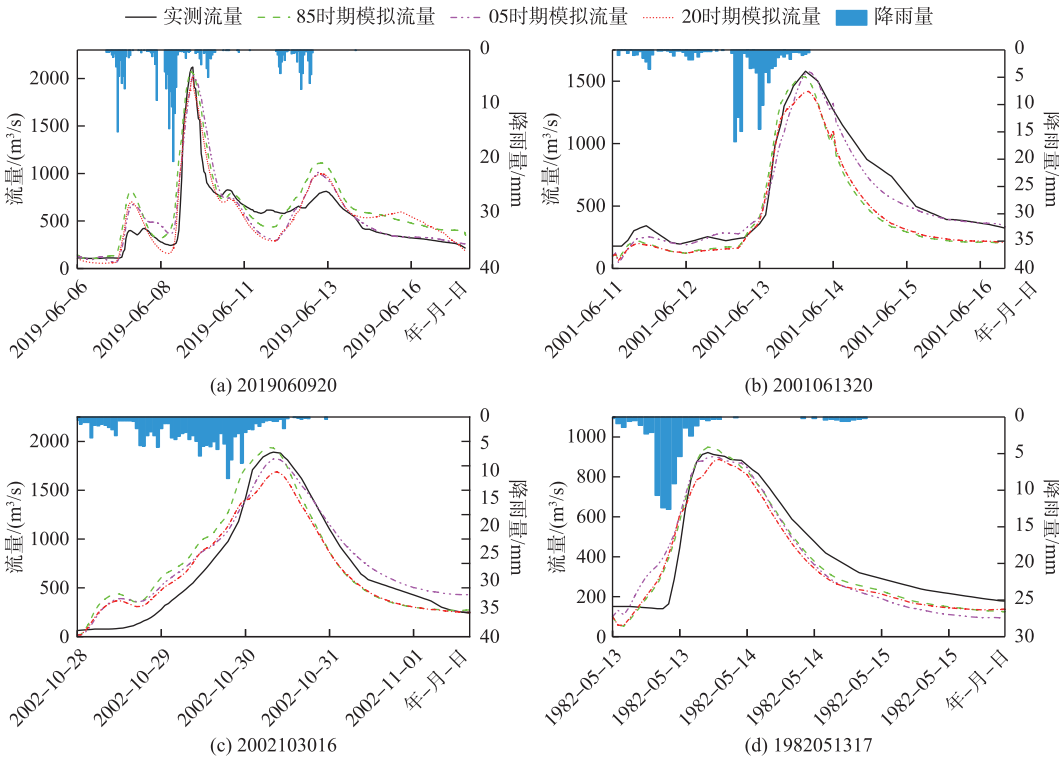


图 3 下垫面变化对典型洪水的影响
Fig.3 Effects of underlying surface changing on typical floods

表 6 部分洪水模拟评价
Tab.6 Assessments of some flood processes simulation

场次洪水	洪水编号	实测洪峰/ (m ³ /s)	模拟洪峰/ (m ³ /s)	洪峰误差/ %	洪量误差/ %	峰现时间 误差/h	确定性 系数	是否 合格
率定期	1985062420	1020	1626.84	37.3	79.7	-1	0.331	否
	1982051317	922	863.23	-6.8	-19.3	1	0.923	是
	1984052008	2150	1813.16	-18.6	-14.5	-3	0.773	是
	2002103016	1890	1836.85	-2.9	-12.3	-2	0.923	是
	2012062408	1100	1082.50	-1.6	-6.3	0	0.930	是
	2016071900	1990	1732.55	-12.9	-21.3	-3	0.890	否
	2019060918	2120	2023.10	-4.5	12.4	-2	0.735	是
验证期	2007061417	1220	1175.00	-3.7	-9.6	1	0.910	是
	2008061816	1360	1758.60	29.3	34.2	-1	0.725	否
	2016061613	1320	1142.10	-15.2	-17.5	-1	0.938	是
	2021052013	1140	1058.20	-7.2	14.6	-1	0.875	是

表 7 不同量级洪水各要素平均变化
Tab.7 Average changes of simulated flood factors in different magnitudes floods

要素	洪水 量级	85 时期	05 时期	20 时期	85 时期至 05 时期	05 时期至 20 时期	85 时期至 20 时期
					变化率/%	变化率/%	变化率/%
洪峰/(m ³ /s)	大洪水	1995.03	1879.53	1833.77	-5.72	-2.72	-8.44
	中洪水	1871.11	1757.60	1656.17	-6.00	-5.84	-11.84
	小洪水	1236.94	1195.83	1157.06	-12.04	-5.86	-17.90
	平均	1701.03	1610.99	1549.00	-7.92	-4.81	-12.73
洪量/亿 m ³	大洪水	4.33	4.07	3.98	-6.01	-2.33	-8.34
	中洪水	3.78	3.55	3.34	-6.87	-6.03	-12.90
	小洪水	2.43	2.21	2.09	-12.06	-6.49	-18.55
	平均	3.51	3.28	3.14	-8.31	-4.95	-13.26
峰现时间/h	大洪水	20	21	22	9.30	4.70	14.00
	中洪水	11	13	14	11.70	7.40	19.10
	小洪水	12	14	15	19.50	23.10	42.60
	平均	14	16	17	13.50	11.73	25.23

期下垫面变化下洪水洪峰、洪量变化更强烈,而对于峰现时间在不同下垫面时期变化程度相差不大。

不同量级的洪水对下垫面变化的响应不同,从 85 时期至 20 时期大洪水洪峰降低 8.44%、洪量减少 8.34%;中洪水洪峰降低 11.84%、洪量减少 12.90%,小洪水洪峰降低 17.90%、洪量减少 18.55%。大洪水对下垫面变化的敏感性相对最小,而中洪水次之,小洪水对下垫面变化最敏感,其中峰现时间按小时累计表现为大洪水延后 2 h,中洪水延后 3 h,小洪水延后 3 h,峰现时间的延迟程度是中小洪水相对大洪水更大。图 4 中箱型图反映以下特征:85 时期至 20 时期,大洪水洪峰影响量四分位区间为 7.2%~10.2%,中位数为 7.5%;中洪水洪峰影响量四分位区间为 10.2%~13.5%,中位数为 14%;小洪水洪峰影响量四分位区间为 10%~15.5%,中位数为 14.6%。大洪水洪量影响量四分位区间为 7%~9.5%,中位数为 8%;中洪水洪量影响量四分位区间为 10.5%~11.5%,中位数为 11%;小洪水洪量影响量四分位区间为 11%~20%,中位数为 17%。大洪水峰现时间影响量四分位区间为 10%~20%,中位数为 10%;中洪水峰现时间影响量四分位区间为 15%~35%,中位数为 10%;小洪水峰现时间影响量四分位区间为 8%~40%,中位数为 25%。整体上大洪水洪峰、洪量及峰现时间中位数都最小,其次是中洪水,小洪水四分位区间相对最大,而从四分位区间长度看,中洪水洪峰、洪量四分位区间长度最小,大洪水次之,小洪水最长,大洪水与中洪水峰现时间四分位区间等长,小

洪水对应的四分位区间最长。85 时期至 05 时期,中洪水四分位区间长度及中位数都小于大洪水,小洪水四分位区间长度及中位数最大;05 时期至 20 时期,洪峰、洪量及峰现时间的四分位区间长度及中位数有不同的变化,与 85 时期至 20 时期对比,变幅更小。

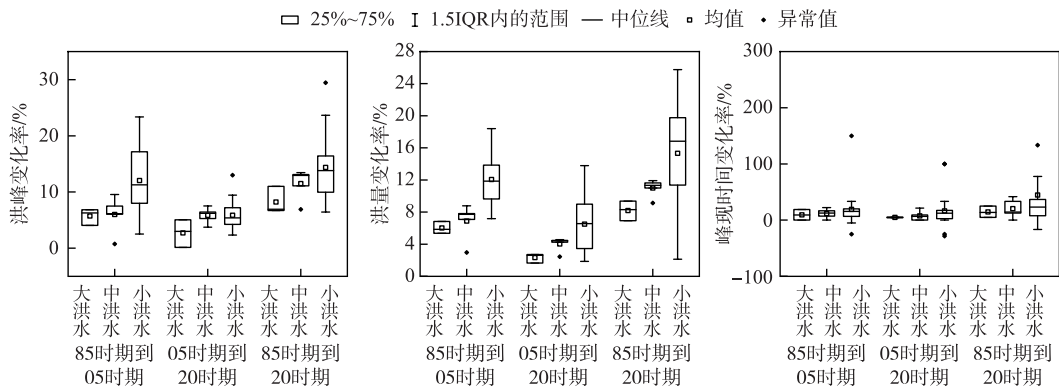


图4 下垫面变化对大、中、小洪水的影响

Fig.4 Effects of underlying surface changing on the major floods, medium floods and minor floods

3.4 长冈水库调控下洪水响应

对于不同时期水库调控对洪水的影响程度,以有无水库情景下洪水要素的差值分析其相对误差来反映。长冈水库调控的影响结果见表 8,影响程度如图 5、图 6 所示。图 6 以 20 时期 3 场典型洪水为例,在有水库情景与无水库情景下模拟洪水过程进行比较。

表 8 3 个时期长冈水库调控影响

Tab.8 Effects of Changgang Reservoir operation on flood process in three periods

指标	洪水 量级	85 时期		05 时期		20 时期		85 时期至 05 时期	05 时期至 20 时期	85 时期至 20 时期
		有水库	无水库	有水库	无水库	有水库	无水库	变化率/%	变化率/%	变化率/%
洪峰/(m ³ /s)	大洪水	1995.03	2382.51	1879.53	2287.80	1833.77	2248.33	4.99	1.98	6.97
	中洪水	1871.11	2037.87	1757.60	1932.49	1656.17	1834.42	4.92	1.61	6.53
	小洪水	1236.94	1386.68	1195.83	1351.14	1157.06	1313.56	4.78	1.48	6.26
	平均	1701.03	1935.69	1610.99	1857.14	1549.00	1798.77	4.90	1.70	6.60
洪量/亿 m ³	大洪水	4.33	4.64	4.07	4.11	3.98	4.33	4.63	1.85	6.48
	中洪水	3.78	4.08	3.55	3.85	3.39	3.70	4.17	1.60	5.77
	小洪水	2.35	2.51	2.25	2.42	2.03	2.20	4.07	0.86	4.93
	平均	2.82	3.02	2.68	2.89	2.48	2.70	4.29	1.43	5.72
峰现时间/h	大洪水	20	18	21	19	22	20	8.89	4.45	13.34
	中洪水	11	12	13	13	14	14	8.67	3.40	12.07
	小洪水	12	11	14	12	15	14	8.42	3.05	11.47
	平均	13	12	15	13	16	15	8.66	3.63	12.29

85 时期至 20 时期洪峰减少了 6.60%,洪量减少了 5.72%,峰现时间增加了 12.29%,水库调控对洪峰变化贡献度在下垫面变化中占 52%,对洪量变化贡献度在下垫面变化中占 50%,对峰现时间变化贡献度在下垫面变化中占 49%,反映了水库调控对洪峰的削减作用相对洪量强一些,对峰现时间的延迟作用较明显,但从贡献程度看与土地利用变化的贡献持平。从 85 时期至 05 时期下垫面变化与 05 时期至 20 时期下垫面变化对比,前两个时期下垫面变化中水库调控对洪峰、洪量及峰现时间影响更大,长冈水库调控可有效削减洪峰与延缓峰现时间,保证下游居民安全,发挥重要的防洪作用。此外,长冈水库调控下大洪水响应程度大于

中洪水,而局部降雨引起的小洪水,由于入库前充分被土壤吸收补充缺水,这是因为遭遇强降雨时,水库水位上涨明显,根据来水条件和控制规则错峰调洪,减轻下游防洪压力,而局部降雨引起的小洪水,由于入库前充分被土壤吸收补充缺水,对下游防洪压力相对较小。图5中水库调控的贡献度在不同下垫面时期存在变化,总体上与大洪水、中洪水及小洪水对水库调控的响应规律符合。如图6所示,不同洪水量级下长冈水库调控前后洪水过程存在明显差异。

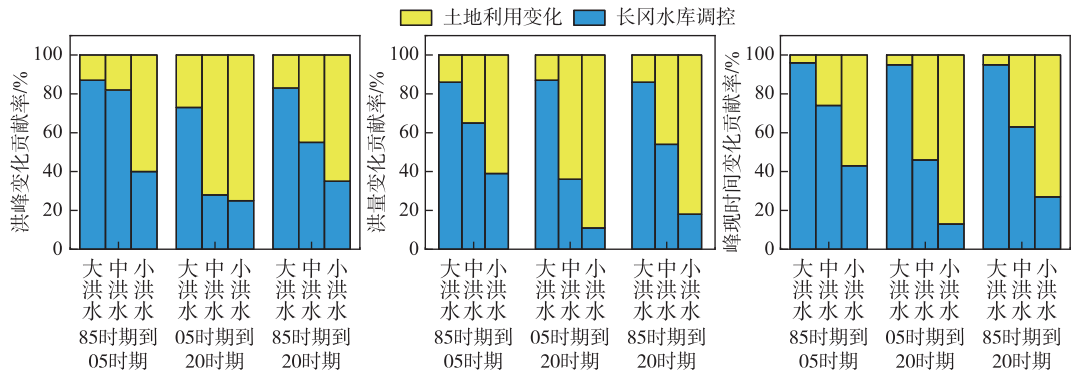


图5 3个时期间各因素对大、中、小洪水贡献率

Fig.5 Contribution rate of different factors on major floods, medium floods and minor floods in three periods

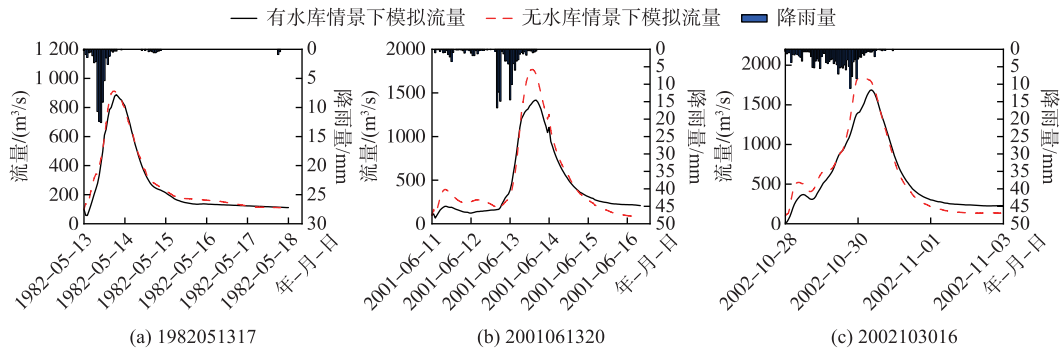


图6 同一时期水库调控对典型洪水影响

Fig.6 Effects of reservoir operation on the typical floods at the same period

在下垫面变化下模拟结果扣除水库调控下洪水模拟结果,得到土地利用变化对流域洪水过程的影响,结果表明85时期至20时期,土地利用变化造成洪峰减少6.14%,占下垫面变化下洪峰变化的48%,土地利用变化造成洪量减少7.03%,占下垫面变化下洪量变化的50%,峰现时间延后12.94%,占下垫面变化的51%,即1.5 h,进一步证实平江流域土地利用变化下,洪峰及洪量有一定程度的降低,对洪水过程的坦化更大,但是占比接近,对峰现时间改变程度与水库调控类似。其原因一是建设用地面积增加导致不透水面积增大,改变了下垫面条件,减弱了下渗过程补充土壤缺水,使短历时降水更易形成地表径流汇入河道,而林地面积增加导致地表植被覆盖增加,地表粗糙度增加,降雨被植物根系充分吸收,补充下渗缺水,控制汇流速度,影响地表容蓄水量及行洪路径^[31];二是建设用地与林地面积都有增加,但是在流域中分布有差异,建设用地主要集中在兴国县城及赣县部分地区,但林地在流域空间上覆盖较广。模拟结果对比分析表明,对不同量级洪水土地利用变化发挥的作用也有差异。85时期至20时期,土地利用变化导致大洪水洪峰降低1.47%、中洪水洪峰降低5.31%、小洪水洪峰降低11.34%,大、中、小洪水洪量分别降低2.39%、4.43%、14.26%,峰现时间分别增加0.66%、7.03%、31.13%,从趋势看随洪水量级的减少,土地利用变化发挥的影响越明显。

4 讨论

4.1 土地利用变化下流域洪水响应

相对于 1960—2001 年,赣江上游 2002—2020 年年均降雨量减少,年均流量和大于 2 年一遇的洪水发生频率均大幅下降,大于 5 年一遇的典型洪水来水区域和主雨带也呈由上游向下游转移的趋势^[32]。平江流域处于赣江上游,1970—2021 年流域整体上也呈现出重现期大的洪水发生频率减少的趋势。

通过对不同下垫面时期分析并设置情景得出土地利用变化对洪水的影响,平江流域土地利用变化表现为城市化扩张、林地覆盖度增加等,改变了下垫面原有状态,影响洪水产汇过程中下渗、蒸发及坡面汇流。由于流域内土地利用类型时空分布的差异性,洪水过程呈现出洪峰、洪量减少的趋势。由于小洪水往往是局部区域产水,起涨快、退水也快,洪水历时相对短,而较大洪水是全流域产水,洪水历时相对长,在持续降雨条件下洪峰较大,洪水特性表现出涨水段、退水段持续时间久,水分在流域滞蓄时间长,对土地利用变化的响应时间相对更长,导致敏感性降低^[33]。奉化江皎口水库在流域土地利用/覆盖变化(LUCC)下,洪量较洪峰变化明显,LUCC 对小洪水过程影响更明显,5 年一遇以上洪水的洪峰和洪量分别增加 3% 和 7.6%,而小于 2 年一遇洪水的洪峰和洪量分别增加 5.41% 和 11.91%^[34];秦淮河流域不透水面扩张情景分析出城市化促进不同量级洪水形成,小洪水最敏感^[10];隽水河流域土地利用类型改变对中小洪水影响幅度更为显著,居住用地对洪峰、洪量增幅大^[35];以未来土地利用模拟(FLUS)模型探索人类和自然影响下中国 2000—2010 年 LUCC 对洪水的影响^[36]。对比本研究与前人研究,都反映了不同量级洪水对土地利用变化的响应有明显的差异,但是,一方面由于流域面积大小不同,土地利用类型变化幅度不同,洪峰、洪量等的变化程度有明显差异,且前人研究对于峰现时间影响较少考虑;另一方面,部分土地利用变化下流域洪水响应研究结合土地利用预测模型及当地相关的国土规划,设置不同土地利用情景,更科学地分析不同土地利用类型对洪水过程的影响。平江流域覆盖了兴国县全境,根据《兴国县国土空间规划》(2021—2035),潞江镇、高兴镇、埠头乡、长冈乡及古龙岗镇将加快城镇化建设,森林覆盖率增加与建设用地扩张都将是未来土地利用变化的趋势,尤其是城镇化发展不能忽视。未来可结合土地利用预测模型及当地规划进一步分析不同土地利用类型对洪水的影响。

4.2 水库调控作用下流域洪水响应

水库通过调蓄洪量对河流洪水过程进行调控,特别是应对大中型洪水等极端水文事件,水库可在洪水发生期间大量蓄水和推迟峰现时间来降低下游洪水风险。水库调控下流域洪水响应研究大多以水文模型为方法,在模型中设置水库单元^[37]或者概化水库的调蓄能力^[14]。其中一类研究对象是设计洪水,在大干沟水电站采用地区组合法分析受温泉水库调控下设计洪水响应^[13];另一类是实测洪水,为本研究分析对象。平江流域长冈水库调控是以 MIKE Hydro River 一维概化,影响程度见表 9,平均下垫面条件下水库调控前后模拟洪峰变化为-13.38%,模拟洪量变化为-7.32%,模拟峰现时间延迟 1.5 h,水库调控对洪峰的削弱作用较大,同时延迟了峰现时间。实际上,洪峰流量和洪峰滞后时间随天然洪水的大小和洪水过程的形状不同而异^[38],从表 9 可看出,大洪水与中洪水对水库调控更敏感,其中大洪水受到的影响最大,小洪水对长冈水库调控的敏感性相对小。在不同下垫面时期,平江流域大洪水、中洪水及小洪水的洪峰、洪量及峰现时间具有明显差异。受水库调控影响,大洪水洪峰削减程度大于中洪水及小洪水,大洪水洪量减少量也大于中洪水及小洪水;中洪水洪峰减少程度大于小洪水,而洪量减少程度与小洪水相近;大洪水峰现时间延迟 2 h,而中洪水及小洪水延迟 1 h。本研究充分考虑洪水大小与洪峰流量、洪峰滞后时间的关系,而富水流域水库对设计洪水影响分析则考虑了洪水大小及洪水过程形状两因素^[38],同时引出了受水库调蓄的常见 3 种类型:单库下游有防护对象、串联两级水库不承担下游防护对象的防洪、串联两级水库下游有防护对象。平江流域有一座大型防洪水库,而中型水库位于流域支流边界附近且以灌溉为主要功能,对洪水过程影响较弱,根据《江西省兴县长冈水库调度规程》(兴县长冈水库管理局主编),水库下游防护对象主要包括兴国县、赣县、赣州市等城镇,保护人口 30 余万,属于第一类受水库调蓄影响类型。但是在面对流域性的洪水,尤其是超标准的特大洪水,仍有必要使用上下游水库群等联合防洪调度,分担防洪压力,共同抵御洪水灾害^[39-40]。长冈水库位于平江上游支流上,对流域出口断面的洪水影响有一定限度。因此,考虑在平江干流

兴国县以下河段设置一个虚拟水库,通过串联水库方式分析水库群联合调控下对洪水的影响程度,可以为未来流域防洪提供科学依据。

表 9 长冈水库调控下洪水要素平均变化率
Tab.9 Average change rates of flood factors under the operation of Changgang Reservoir

指标	洪水量级	有水库	无水库	变化率/%
洪峰/(m ³ /s)	大洪水	1902.78	2306.21	-17.49
	中洪水	1761.63	1984.93	-11.25
	小洪水	1196.61	1320.45	-9.38
	平均	1620.34	1870.53	-13.38
洪量/亿 m ³	大洪水	4.13	4.65	-11.25
	中洪水	3.57	3.88	-7.82
	小洪水	2.21	2.38	-7.01
	平均	2.66	2.87	-7.32
峰现时间/h	大洪水	21	19	10.52
	中洪水	14	13	7.69
	小洪水	13	12	5.40
	平均	14.5	13	8.75

4.3 模型不确定性分析

水文模型的不确定性研究是水文科学研究的重要问题,而模型参数的不确定性分析是其重点之一^[41]。相关研究采用 GLUE 方法分析新安江模型参数的不确定性^[42],当以确定性系数为标准并保持不变,新安江模型中自由水蓄水容量、流域平均张力水容量及表层自由蓄水库对地下水的日出流系数不确定性大,上层张力水容量、下层张力水容量、蒸散发折算系数不确定性小。整体上模型参数中不确定性主要反映在表征土壤蓄水能力的参数。本研究通过对 MIKE SHE 模型主要敏感参数做不确定性分析,初始地表水深变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为 0.59%~0.61%,洪量变化为 1.81%~1.95%;曼宁系数变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为 2.28%~2.45%,洪量变化为 3.14%~3.44%;河道糙率变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为-1.36%~-1.16%,洪量变化为-0.58%~-0.58%,壤中流单位储水量变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为-1.78%~-1.75%,洪量变化为-0.45%~-0.44%;壤中流出流时间常数变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为-5.91%~-2.85%,洪量变化为-1.15%~2.29%;壤中流下渗时间常数变化 $\pm 10\%$,洪峰变化为 1.07%~1.28%,洪量变化为 0.66%~0.86%。当以确定性系数为标准并保持不变,MIKE SHE 模型中壤中流出流时间常数和曼宁系数的不确定性相对大, R^2 变幅在 0.28~0.875 之间,其次是壤中流下渗时间常数及壤中流单位储水量,说明模型不确定性较大的参数能反映土壤蓄水能力。国内外对 MIKE SHE 模型参数不确定性也开展相关研究,当以 Nash 系数为标准并保持不变,MIKE SHE 模型中饱和渗透系数、水平传导度及蒸散发经验系数不确定性小,壤中流下渗时间常数不确定性较大^[43]。将 LAI 以不同比例缩放,并对比模拟过程,计算月径流在 5%及 95%的不确定性边界,采用 GLUE 方法,分析不同情景预测的不确定性差异为 $\pm 10\%$ ^[44]。研究中对于土地利用模块叶面积指数、根系深度主要是参考经验值,并未参与率定,其取值范围不同,对模拟结果会存在不确定性,未来可结合 GLUE 法^[45]进一步对模型参数不确定性研究,减少异参同效作用对结果的影响。

5 结论

将赣江上游平江流域下垫面时期划分 85 时期、05 时期及 20 时期,并分析了近 40 年土地利用变化,耕地、草地转化为林地及建设用地,其中耕地面积减少 1.72%,草地面积减少 3.49%,林地面积增加 3.98%,建设用地增加 1.41%。构建 MIKE SHE 模型并设置土地利用变化及有无水库调控的不同下垫面情景,模拟流域洪水洪峰、洪量及峰现时间的变化情况,并进一步对大、中、小洪水响应研究,主要结论如下:

1)在下垫面变化影响下,85 时期至 20 时期下垫面变化引起洪峰降低 12.73%,洪量减少 13.26%,峰现时间延长 3 h;洪量的降低相对洪峰更大,峰现时间变化较明显,其中 85 时期至 05 时期下垫面变化对洪水过

程的影响更显著。通过情景分析可以看出,85 时期至 20 时期土地利用变化引起洪峰减少 6.14%, 洪量减少 7.03%, 峰现时间延后 1.5 h, 洪量对土地利用变化的响应相对洪峰更明显, 大洪水洪峰、洪量变化程度最小, 中洪水次之, 小洪水最大, 大、中、小洪水峰现时间延迟程度有差异。

2) 在长冈水库调控影响下,85 时期至 20 时期洪峰的削减程度大于洪量的减少幅度, 分别是 6.60% 和 5.72%, 峰现时间增加 12.29%, 对于不同重现期的洪水来说, 大洪水主要受到水库调控影响, 中洪水受到的影响减弱, 小洪水对水库调控的响应相对最小, 大、中、小洪水峰现时间变化有所差异但不大, 分别为 13.34%、12.07% 和 11.47%。

6 参考文献

- [1] Gao ZG, Li Y, Zhang LH *et al.* Research overview on spatiotemporal process simulation and expression of flood disaster scenarios. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, **54**(8): 43-53. [高志国, 李毅, 张利辉等. 洪水灾害时空过程模拟可视化表达研究进展与展望. 水利水电技术: 中英文, 2023, **54**(8): 43-53.]
- [2] Wang N, Yao ZH, Liu WQ *et al.* Spatial variabilities of runoff erosion and different underlying surfaces in the Xihe River Basin. *Water*, 2019, **11**(2): 352. DOI: 10.3390/w11020352.
- [3] Li JY, Chen YB, Zhu YZ *et al.* Study of flood simulation in small and medium-sized basins based on the Liuxihe model. *Sustainability*, 2023, **15**(14): 11225. DOI: 10.3390/su151411225.
- [4] Xu YP, Yu RH, Ma ZW. Analysis on the cause of formation of flood disaster and flood characteristics in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 638-643. [许有鹏, 于瑞宏, 马宗伟. 长江中下游洪水灾害成因及洪水特征模拟分析. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 638-643.]
- [5] Xiao Y, Wen TF, Gu P *et al.* Response of floods to the underlying surface changes in the Taojiang River Basin using the hydrologic engineering center's hydrologic modeling system. *Water*, 2024, **16**(8): 1120. DOI: 10.3390/w16081120.
- [6] Sun Q, Qi W, Yu XY. Impacts of land use change on ecosystem services in the intensive agricultural area of North China based on Multi-scenario analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, **60**(1): 1703-1716. DOI: 10.1016/j.aej.2020.11.020.
- [7] Sun ZD, Huang Q. Land use-cover change and its large scale hydrological effects in Yangtze River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(11): 2703-2710. [孙占东, 黄群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(11): 2703-2710.]
- [8] Yan SX, Long YN, He HG *et al.* Flood response to urban expansion in the Lushui River Basin. *Natural Hazards*, 2023, **115**(1): 779-805. DOI: 10.1007/s11069-022-05574-7.
- [9] Shen LY, Wen T, Shi P *et al.* Responses of extreme hydrologic events to future land use change in the upper reaches of Huaihe River. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(4): 95-107. [沈玲怡, 闻童, 石朋等. 淮河上游极端水文事件对未来土地利用变化的响应研究. 水利水电技术: 中英文, 2022, **53**(4): 95-107.]
- [10] Sun YW, Xu YP, Gao B *et al.* Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization—a case study of Qinhuai River in Nanjing. *J Lake Sci*, 2021, **33**(5): 1574-1583. DOI: 10.18307/2021.0515. [孙延伟, 许有鹏, 高斌等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响——以南京秦淮河为例. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1574-1583.]
- [11] Sun XG, Peng Y, Zhang XL *et al.* A method for flood forecasting based the operation chart of aggregated reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(3): 308-316, 324. [孙新国, 彭勇, 张小丽等. 基于聚合水库蓄水模拟的洪水预报研究. 水利学报, 2017, **48**(3): 308-316, 324.]
- [12] Yun XB, Tang QH, Wang J *et al.* Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin. *Journal of Hydrology*, 2020, **590**: 125472. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125472.
- [13] Wen DP, Li QJ, Zhao XM *et al.* Estimation of design flood under influence of upstream reservoir: Taking a case of dagangou hydropower station on Geemu River. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(5): 30-34. [温得平, 李其江, 赵兴明等. 受水库调蓄影响的设计洪水分析——以格尔木河大干沟水电站为例. 水文, 2019, **39**(5): 30-34.]
- [14] Xu WH, Zhang SH, Li N *et al.* Analysis on flood control contribution of the Three Georges Reservoir for the Lake Dongting area under basin-wide severe floods of Yangtze River. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 935-944. DOI: 10.18307/2022.0318. [徐卫红, 张双虎, 李娜等. 长江全流域大洪水下三峡水库对洞庭湖区防洪贡献分析. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 935-944.]
- [15] Mateo CM, Hanasaki N, Komori D *et al.* Assessing the impacts of reservoir operation to floodplain inundation by combining hydrological, reservoir management, and hydrodynamic models. *Water Resources Research*, 2014, **50**(9): 7245-7266. DOI: 10.1002/2013WR014845.
- [16] Li DY, Liang ZM, Zhou Y. Flood simulation and scaling effect analysis based on MIKE SHE. *Water Power*, 2019, **45**(5): 28-33, 66. [李大洋, 梁忠民, 周艳. 基于 MIKE SHE 的洪水模拟与尺度效应分析. 水力发电, 2019, **45**(5): 28-33, 66.]
- [17] Gaur S, Bandyopadhyay A, Singh R. From changing environment to changing extremes: Exploring the future streamflow and associated un-

- certainties through integrated modelling system. *Water Resources Management*, 2021, **35**(6): 1889-1911. DOI: 10.1007/s11269-021-02817-3.
- [18] 李喻鑫. 江西省平江流域降雨侵蚀力简易算法及时空分布研究[学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2020.
- [19] Xie GT. Application of acrylic emulsion mortar in reinforcement project of Changgang Reservoir. *Water Conservancy Construction and Management*, 2009, **29**(11): 70-71. [谢高腾. 丙乳砂浆在长冈水库除险加固工程中的应用. 水利建设与管理, 2009, **29**(11): 70-71.]
- [20] Liu SH, Liu HY, Luo P *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall of different magnitudes in Pingjiang Basin of upper Ganjiang River in recent 30 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(3): 106-114. [刘声洪, 刘惠英, 罗萍等. 赣江上游平江流域近 30 年不同量级降雨时空分布特征. 水土保持研究, 2022, **29**(3): 106-114.]
- [21] Xu ZP, Liu WF, Shen FF *et al.* Quantitative assessment on the effects of reforestation and climate variability on the seasonal streamflow in Pingjiang watershed using the extended Budyko model. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(23): 8783-8793. [徐志鹏, 刘文飞, 沈芳芳等. 基于扩展的 Budyko 模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响. 生态学报, 2020, **40**(23): 8783-8793.]
- [22] Wang J, Li H, Hu Q. Reservoir siltation impact assessment based on combination weighting and improved set pair analysis. *Yangtze River*, 2022, **53**(S1): 125-129. [王姣, 李辉, 胡强. 基于组合赋权和改进集对分析的水库淤积影响评价. 人民长江, 2022, **53**(S1): 125-129.]
- [23] Hu X, Nie XF, Zheng HJ. Benefit evaluation of the runoff and sediment distribution in soil and water comprehensive management of Pingjiang watershed. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2016, **42**(6): 429-433. [胡欣, 聂小飞, 郑海金. 平江流域水土保持综合治理水土调配效益评价. 江西水利科技, 2016, **42**(6): 429-433.]
- [24] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(8): 3907-3925. DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021.
- [25] FAO. Harmonized World Soil Database. FAO Land and Water Digital Media Series (FAO), 2009.
- [26] Liu HF, Zhang CF, Feng S *et al.* Research progress of hydrological models. *Journal of Green Science and Technology*, 2023, **25**(18): 49-53, 61. [刘化芳, 张成福, 冯霜等. 水文模型研究进展. 绿色科技, 2023, **25**(18): 49-53, 61.]
- [27] Wu GX, Ruan HH, Li XF *et al.* Spatial-temporal variations of leaf area index(LAI) in Jiangxi Province during 2000-2011 based on MODIS data. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2013, **37**(1): 11-17. [吴国训, 阮宏华, 李显凤等. 基于 MODIS 反演的 2000—2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, **37**(1): 11-17.]
- [28] Xu L, Peng HX, Pan P *et al.* Vegetation coverage and its spatial pattern changes in Xingguo County, Jiangxi Province. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2021, **38**(6): 1117-1126. [徐丽, 彭浩贤, 潘萍等. 江西省兴国县植被覆盖度及其空间格局变化. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(6): 1117-1126.]
- [29] Nie XF, Zheng HJ, Tu AG *et al.* Long-term soil and water conservation in red soil region of southern China significantly reduced riverine sediment load: A case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 935-946. DOI: 10.18307/2021.0326. [聂小飞, 郑海金, 涂安国等. 南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙——以鄱阳湖流域赣江上游平江为例. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 935-946.]
- [30] Zheng HJ, Fang SW, Yang J *et al.* Analysis on evolution characteristics and impacting factors of annual runoff and sediment in the Ganjiang River during 1970-2009. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(1): 28-32. [郑海金, 方少文, 杨洁等. 近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析. 水土保持学报, 2012, **26**(1): 28-32.]
- [31] Wan RR, Yang GS. Progress in the hydrological impact and flood response of watershed land use and land cover change. *J Lake Sci*, 2004, **16**(3): 258-264. DOI: 10.18307/2004.0311. [万荣荣, 杨桂山. 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 258-264.]
- [32] Xiao N, Yan F, Hu ZP *et al.* An empirical study on the impact of climate change on the hydrological situation of Ganjiang River in Poyang Lake Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(11): 39-49. [肖农, 闫峰, 胡振鹏等. 气候变化对鄱阳湖赣江流域水文情势影响的实证研究. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(11): 39-49.]
- [33] Ren CD, Song XM, Song MM. Response of runoff processes to land use changes in the Qinhuai River Basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, **39**(21): 139-151. [任朝达, 宋晓猛, 宋明明. 秦淮河流域径流过程对土地利用变化的响应. 农业工程学报, 2023, **39**(21): 139-151.]
- [34] Lei CG, Xu YP, Zhang QY *et al.* Impacts of land-use change on flood process and frequency of various return periods: A case study of Jiaokou Reservoir watershed in Fenghua River. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(16): 5017-5026. DOI: 10.5846/stxb201501220183. [雷超桂, 许有鹏, 张倩玉等. 流域土地利用变化对不同重现期洪水的影响——以奉化江皎口水库流域为例. 生态学报, 2016, **36**(16): 5017-5026.]
- [35] Zhai LN, Lin PR, Wu FY *et al.* Impacts of land use change on flood processes in the Junshui River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(8): 1812-1822. [翟丽妮, 林沛榕, 吴凤燕等. 隽水河流域土地利用变化对洪水过程的影响. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(8): 1812-1822.]
- [36] Liu XP, Liang X, Li X *et al.* A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and

- natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, **168**: 94-116. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.019.
- [37] Xing LX, Chen YB, Feng YX *et al.* Research on flood forecasting model for Xinfengjiang Reservoir based on Liuxihe model. *Journal of China Hydrology*, 2022, **42**(1): 47-53. [邢丽雪, 陈洋波, 冯永修等. 基于流溪河模型的新丰江水库入库洪水预报模型研究. 水文, 2022, **42**(1): 47-53.]
- [38] Liu XS, Lu SW. Composition of flood areas with flood control objects downstream of parallel reservoirs. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(S2): 215-219. [柳小珊, 卢少为. 富水流域设计洪水研究. 水利水电技术(中英文), 2020, **51**(S2): 215-219.]
- [39] Jin XP. Study on co-regulation of reservoirs in upper reaches of Changjiang River in 2016 for flood control. *Yangtze River*, 2017, **48**(4): 22-27. [金兴平. 长江上游水库群 2016 年洪水联合防洪调度研究. 人民长江, 2017, **48**(4): 22-27.]
- [40] Chai FX, Peng F, Zhang HP *et al.* Stable improved dynamic programming method: An efficient and accurate method for optimization of reservoir flood control operation. *Water Resources Management*, 2023, **37**(14): 5635-5654. DOI: 10.1007/s11269-023-03622-w.
- [41] Xia J, Zuo QT. Advances in international hydrological science research. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(3): 256-261. [夏军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展. 地球科学进展, 2006, **21**(3): 256-261.]
- [42] Zhang LR, Guan YQ, Wang J *et al.* Application and Study on analyzing uncertainty of xinjiang model parameter Within the GLUE Method. *Water Power*, 2010, **36**(5): 14-16. [张利茹, 管仪庆, 王君等. GLUE 法分析水文模型参数不确定性的研究. 水力发电, 2010, **36**(5): 14-16.]
- [43] Zheng Z, Zhang J, Gong HL. Uncertainty analysis of MIKE SHE hydrologic model parameter. *Yellow River*, 2015, **37**(1): 23-26. [郑震, 张静, 宫辉力. MIKE SHE 水文模型参数的不确定性研究. 人民黄河, 2015, **37**(1): 23-26.]
- [44] McMichael CE, Hope AS, Loaiciga HA. Distributed hydrological modelling in California semi-arid shrublands: MIKE SHE model calibration and uncertainty estimation. *Journal of Hydrology*, 2006, **317**(3/4): 307-324. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.023.
- [45] Beven K, Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 2001, **249**(1/2/3/4): 11-29. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00421-8.