

DOI: 10.5846/stxb201501220183

雷超桂, 许有鹏, 张倩玉, 王跃峰, 李广. 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):

Lei C G, Xu Y P, Zhang Q Y, Wang Y F, Li G. 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):

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

雷超桂, 许有鹏*, 张倩玉, 王跃峰, 李广

南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 土地利用变化对流域洪水过程产生显著影响, 并导致设计洪水发生变化。为进一步指导流域防洪及水库洪水设计, 本研究以浙东沿海奉化江皎口水库流域为例, 应用 HEC-HMS 水文模型模拟分析土地利用/覆被变化(LUCC)对不同重现期暴雨洪水事件的影响。结果表明, 流域内 1985—2003 年土地利用变化引起不同重现期洪水过程与洪水量级发生改变, 其中, 洪量和洪峰均增加, 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平均增加 3% 和 7.6%, 而小于 2 年一遇洪水的洪峰和洪量分别平均增加 5.41% 和 11.91%。同时, LUCC 使 100 年、50 年和 25 年一遇洪水重现期分别提前了 15 年、6 年和 2 年, 即其对量级最高的特大洪水的重现期影响最大。此外, 不同的土地利用转变方式对洪水的影响程度不一, 其中, 林地向裸地转变对洪水影响最大, 林地向灌草地转变次之, 林地向耕地变化对洪水影响最小, 且这种差异性在低重现期洪水表现更明显。

关键词: 土地利用/土地覆被变化; HEC-HMS 模型; 降雨径流; 洪水重现期

Impacts of land-use change on flood process and frequency of various return periods: a case study of Jiaokou Reservoir watershed in Fenghua River

LEI Chaogui, XU Youpeng*, ZHANG Qianyu, WANG Yuefeng, LI Guang

School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The effects of land-use/land-cover change (LUCC) on the watershed flood process have become one of the major hydrological concerns in the world. A change in the flood process leads to the alteration in flood design and control system, which has caused serious problems to human life and urban security. In this study, we take Jiaokou Reservoir watershed as a sample area to analyze the LUCC effects on storm floods of different return periods based on the hydrological model (HEC-HMS) and GIS-related support. Jiaokou Reservoir is located in the west of Ningbo city, Zhejiang Province, and is controlled by the plum rains and typhoon storms with various return periods during rainy seasons. Due to rapid economic development and intensive human activity, the land utilization pattern has changed in recent years. The spatial data of land use of the study area during 1985—2003 was obtained from Landsat TM (Thematic Mapper) image data, and the images from different periods were interpreted and overlapped to setup the transfer matrix of the land-use types. The land-use types were dominated by forest land, bush grassland, and cultivated land, which covered 92% of the watershed. The main LUCC in this area is the conversion of forest to bare land, grassland, and agricultural land. The analysis of the LUCC impacts on flood shows that (1) during 1985—2003, 3%—30% of the forest land was changed to bare land, bush grass, or agricultural land, and the LUCC has different effects on floods of different return periods. Both flood runoff and peak

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371046, 41371044); 水利部水利公益专项项目(201201072); 江苏省自然科学基金项目(BK20131276); 江苏水利科技基金重大项目(2015003)

收稿日期: 2015-01-22; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuy305@163.com

increased for all flood magnitudes, but the runoff changed at a higher range as compared to the flood peak. (2) Low magnitude flood was found to be more sensitive to the LUCC, the increase of the total runoff and flood peak of a 5-year flood increased by 3% and 7.6%, respectively, while those of less than 2-year return period floods increased by 5.41% and 11.91%, respectively. From the perspective of flood classification, the flood return periods of 100, 50, and 25 years were reduced by 15, 6, and 2 years, respectively, during the study period. (3) Different land-use change patterns lead to flood variations. Along with the forest being characterized by a change ratio of 10%—50% since 1985, forest-bare land-use change pattern impacts flooding most intensively, and the forest-grassland change pattern has stronger effects than the forest-agricultural change pattern. Compared with a simulated flood in 1985, when forest was converted into bare land with a ratio of 10%—50%, the flood peak increased by 0.88%—4.3% and the total runoff increased by 1.61%—7.91% in the 100-year-return-period flood. While, the widened range of the flood peak and total runoff under the same condition were 2.18%—10.67% and 4.15%—20.62%, respectively, in the 5-year-return-period flood. As the change ratio gets bigger, the difference in impacts of different patterns of forest transformation to other lands on floods became more distinct, especially to the low-magnitude flood. The results of this study can provide scientific supports for the flood control and water resource management.

Key Words: land-use/land-cover change; HEC-HMS model; runoff; flood return periods

土地利用/覆被变化(LUCC)是人类活动改造下垫面的主要结果之一,它通过影响冠层截流、地表入渗、蒸散发和地表径流,引起流域水文过程发生改变。近些年来,特大洪水在城市或城郊地区频繁发生,给人们带来巨大的生命和经济损失,而土地利用方式改变成为“放大”洪灾的主要因素^[1-3]。LUCC引起水文要素和水文循环各参量产生不同的变化^[4-7,8-9],并通过影响暴雨径流过程改变洪水特性,对洪水事件产生作用^[10-13,14]。相比气候因素的单独影响,城市用地扩张会加大洪水概率和洪水强度的变化^[14-15],农用地的增加会减小下游洪水发生可能性^[6],而上游森林的退化将使洪水洪量、洪峰均增加^[9]。目前,国内外围绕LUCC的暴雨洪水效应已开展了较多研究^[5-10],但关于LUCC对设计洪水影响的定量研究还较少见^[16]。由于土地覆被对产汇流的作用机制与降雨强度和前期土壤蓄水量相关^[17-18],所以其对不同强度的暴雨洪水会产生不同的影响,其与设计洪水和水工建设以及防洪规划密切相关,亦应受到关注。受特殊地理环境和快速经济发展的影响,地处浙东沿海的奉化江流域常年遭受不同等级的暴雨洪水侵袭,所造成的损失也日趋严重。因此,迫切需要定量开展奉化江流域LUCC对不同量级洪水的动态影响研究。

考虑到流域覆被格局变化会使得流域洪水特性发生变化并最终对设计洪水产生影响,而设计洪水的大小和变化对水库的正常运行至关重要,因此,本文借助HEC-HMS降雨径流模型来模拟分析奉化江支流鄞江上游皎口水库流域1985—2003年土地利用变化(LUCC)对典型重现期洪水的影响,研究结果可为流域的防洪减灾提供有力参考,也将为水库调度以及安全运行提供支持。

1 研究区概况

皎口水库流域位于浙江省宁波市西部奉化江支流鄞江的上游,流域总面积为259km²,主干水系有大皎溪和小皎溪,其中主流大皎溪长44.3km。流域地处沿海地区,以低山丘陵为主,地势自西南向东北倾斜,属亚热带季风性湿润气候。受地理位置和气候条件的影响,该地区于每年6—9月频发梅雨与台风,伴随而来的连日大暴雨容易形成洪水。流域土壤主要为红壤及黄壤,大面积分布林地、山地灌草地及耕地,水域、建设用地和裸地仅占少部分,植被覆盖度较高,但自上世纪90年代以来,土地利用开发加快,流域覆被情况发生了一定程度的变化。

2 数据与方法

2.1 基础数据

本研究采用的基础数据包括四大类:土地利用数据是基于流域内1985年和2003年Landsat TM遥感影像

经计算机以及人工解译分类而获取,为了提高分类精度,解译时借助研究区历史土地利用图件、SPOT4 影像进行修正,结合野外实地抽样调查结果进行验证;数字高程模型(DEM)数据来源于国际科学数据服务平台,其分辨率为 30m;土壤类型数据是参照 1:50 万宁波市纸质土壤图获取;气象水文资料主要是雨量站和水文站自动监测获取的小时段雨量和径流数据。

2.2 研究方法

HEC-HMS 模型是一种广泛用于模拟降雨—径流过程的分布式水文模型,并综合考虑了下垫面时空变化。本文拟运用该模型模拟历史发生过的年最大场次暴雨洪水以率定参数,并基于历史土地利用变化,模拟不同量级暴雨径流过程,分析不同地类转变对典型重现期暴雨洪水事件的影响。

2.2.1 HEC-GeoHMS 模型提取参数、构建流域结构

本文运用嵌入 ArcGIS 的 HEC-GeoHMS 工具进行流域构建、水系提取、子流域划分,并提取流域物理、水文参数,计算确定 HEC-HMS 模型模拟参数的初始值,然后将建立好的流域属性数据导入到 HEC-HMS 模型。其中,本研究利用流域的 DEM 进行流域描绘与划分,并结合研究区具体情况选定水库坝址出口点(29.83°N, 121.28°E)作为流域出口,以此确定流域范围与位置,同时将流域自动划分为 2 条主干河道、1 个出口点、1 个水库和多个子流域的格局,最后依据流域水系和高程特征,合并为 4 个大的子流域(见图 1)。

2.2.2 HEC-HMS 模型模拟暴雨洪水过程

HEC-HMS 模型具有模块化的结构,可依次计算每个子流域(单元)的产流量,汇流(包括坡面汇流和河道汇流),最后演算至流域的出口断面。本文采用初损稳渗法(Initial and Constant Loss)计算径流量和损失量, Snyder 单位线计算坡面汇流, Muskingum 法进行河道洪水演进,并采用退水指数模型模拟基流。通过对 1974—2003 年 8 场暴雨洪水进行降雨径流模拟,参数率定以及结果验证,模拟分析流域土地覆被变化对不同

量级历史洪水的影响。为避免流域上游周公宅水库(2003 年)修建前后水文资料不一致性的影响,本次只收集、统计分析研究区 1974—2003 年同场暴雨年最大 24h 降雨量资料,运用 P-III 适线法计算流域面平均最大 24h 的暴雨频率曲线,在此基础上,选取频率为 1%(100 年一遇)、10%(10 年一遇)、2%(50 年一遇)、4%(25 年一遇)及 20%(5 年一遇)的 5 种暴雨类型,用暴雨衰减指数法计算生成暴雨时程分布,运用 HEC-HMS 模型模拟不同的土地利用情况下典型重现期的暴雨洪水过程。

3 结果分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用类型的提取

基于研究区 1985 年和 2003 年 Landsat TM 影像,进行最大似然法分类处理^[19-20]。根据流域实际情况,将流域用地分为林地(毛竹、高大乔木等)、灌草地(低矮灌木、山地草地等)、耕地、建设用地(其中包括居民地、交通用地、独立工矿用地和水利设施用地等)、裸地和水体六大类,如图 2 所示。结合地形图、流域航片、影像图件以及野外实地抽样调查验证结果进行人工解译修正,对 1985 和 2003 年的解译结果进行精度评价,总体

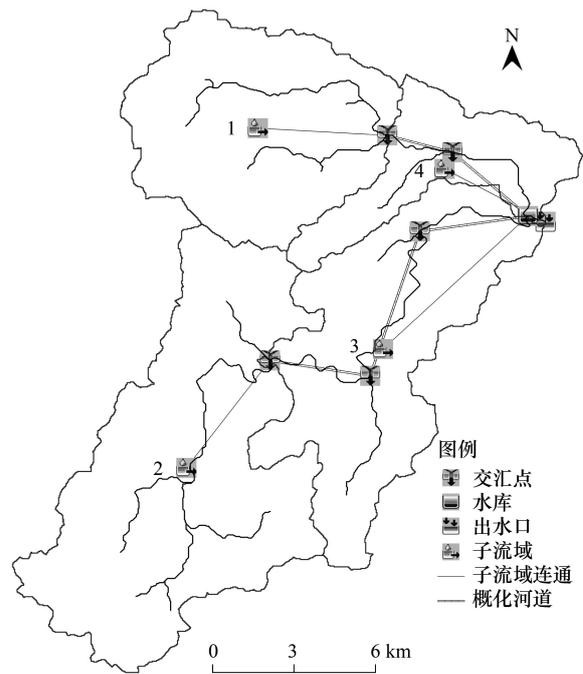


图 1 HEC-HMS 模型中皎口水库整体流域构架

Fig.1 The overall framework of the Jiaokou Reservoir watershed in HEC-HMS model

精度分别达到 84% 和 89%, 解译精度符合研究要求。

3.1.2 土地利用变化趋势分析

在 ArcGIS9.3 软件的支持下, 计算得出 1985 年和 2003 年皎口水库流域各土地利用类型的面积, 并分析其总体变化情况, 具体如表 1 所示。

表 1 皎口水库流域 1985—2003 年各土地利用类型面积及变化

Table 1 Area of land use and dynamic change in Jiaokou Reservoir watershed during 1985—2003

土地利用类型 Land use types	1985		2003		变化量/km ² Area change
	面积 Area/km ²	比重 Proportion/%	面积 Area/km ²	比重 Proportion/%	
林地 Forest land	198.6	76.68	132.2	51.04	-66.4
灌草地 Bush-grass land	9.2	3.55	69.4	26.79	60.2
耕地 Cultivated land	37.0	14.29	39.2	15.14	2.2
建设用地 Construction land	5.6	2.16	5.8	2.24	0.2
裸地 Bare land	1.2	0.46	7.9	3.05	6.7
水体 Water	7.4	2.86	4.5	1.74	-2.9

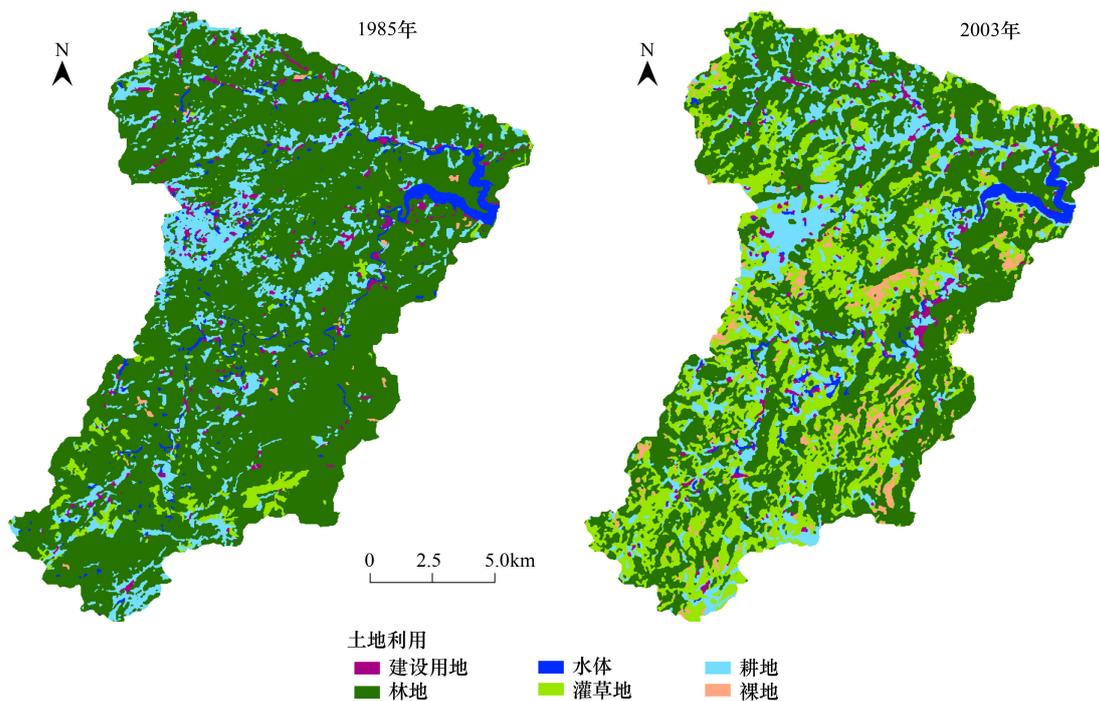


图 2 1985 年与 2003 年土地利用分布图

Fig.2 Distribution of land use types in 1985 and 2003

从表 1 可以看出, 研究区主要覆被是林地、灌草地和耕地, 且三者的总面积均达到 92% 以上, 而水域和建设用地相对偏少。在用地类型的转变上, 林地变为灌草地最显著, 这主要是由于经济的发展, 流域内以茶园、果园为主的经济林及灌丛林的大面积种植, 使矮小经济树种取代常绿与落叶阔叶混交林, 同时, 当地为发展旅游, 部分景点的竹林用地被改造成为旅游经营空闲地。此外, 流域内耕地与建设用地小幅度增加, 水体呈微弱减少趋势。总体来说, 从 1985 年至 2003 年, 该流域土地覆被均有所变化, 变化较大的是林地、灌草地和裸地, 其中, 林地转变为耕地、灌草地、裸地的统计情况见表 2, 转变率在 3%—30% 之间。

3.2 土地利用变化对洪水的综合影响分析

流域降雨径流过程是受气候变化与下垫面共同作用的结果, 而流域 LUC 过程必然要对洪峰、洪量以及

洪水量级产生影响^[21-23]。为此,在分析土地利用转变的基础上,利用 HEC-HMS 模型来模拟分析皎口水库流域 1985—2003 年 LUCC 对年最大暴雨洪水的影响,并讨论不同地类转变对不同重现期暴雨洪水的影响程度及差异。

表 2 林地在 1985 至 2003 年主要转变情况

Table 2 Main transformation types of forest land from 1985 to 2003

年份 Year	土地利用类型 Land use types	林地 Forest land		耕地 Cultivated land		灌草地 Bush-grass land		裸地 Bare land	
		面积/km ²	转化率/%	面积/km ²	转化率/%	面积/km ²	转化率/%	面积/km ²	转化率/%
1985—2003	林地 Forest land	117.97	—	23.43	11.81	47.37	23.88	6.34	3.2

3.2.1 模型率定与检验

基于流域 1985 年和 2003 年土地利用数据、土壤分布特征、高程属性数据及场次降雨特征,参考相关研究^[24-26],采用单因素梯度法(Univariate Gradient)率定模型的产汇流参数,主要参数率定范围及结果见表 3,其中,初损(Initial Loss)、稳定下渗率(Constant Loss Rate)、流域滞时(Tp)是关键参数。同时,利用皎口水库流域历史上获取的小时段流量数据对模型结果进行评价,共选取 8 场暴雨洪水进行模拟分析。考虑所选洪水过程的代表性,选用 79823 等 5 场暴雨洪水进行模型率定,74819 等 3 场用于模型验证分析,模型率定和验证的结果见表 4。

表 3 HEC-HMS 模型主要参数率定结果

Table 3 Calibration results of main parameters in HEC-HMS model

序号 Number	参数名 Parameter name	参数含义 Parameter implication	率定范围 Calibration range	参数最终范围或值 Calibration values
1	Initial Loss	初始损失值	10—20mm	10—15mm
2	Constant Loss Rate	稳定下渗率	0.5—1mm/h	0.8—1mm/h
3	Recession constant	洪水衰退常数	0.85—0.99	0.9—0.95
4	Ratio to Peak	峰值比(衰退阈值)	0—1	0.02—0.05
5	Muskingum X	无量纲权重	0—0.5	0.2

表 4 HEC-HMS 模型模拟研究区 8 场洪水评价结果

Table 4 Results of evaluation for simulated 8 flood events of study area by HEC-HMS model

率定期/验证期 Calibration /Validation	洪水场次 Flood events	实测洪峰/(m ³ /s) Measured peak	洪峰相对误差/% Relative error of peak	洪量相对误差/% Relative error of runoff	峰现时差/min Error of peak time	确定性系数 Nash coefficient
率定期 Calibration period	79823	979	-7.51	-17.78	-20	0.81
	82811	441	-0.86	-6.18	+30	0.79
	85922	605	2.170	-3.05	+90	0.91
	87912	887	-30.70	-13.91	-10	0.81
	201623	283	5.05	-1.57	+20	0.81
	绝对值平均	9.26	8.38	34	0.83	
验证期 Validation period	74819	795	-8.75	-2.98	+25	0.94
	84819	620	-0.15	2.53	-70	0.87
	98919	572	3.97	13.60	+30	0.9
	绝对值平均	4.29	6.37	42	0.9	

峰现时差中以“-”表示模拟时间提早;“+”表示模拟时间推迟

从表 4 可以看出,率定期 5 场洪水平均确定性系数为 0.83,模拟的峰现时差均在±1.5h 内,洪峰、洪量平均相对误差分别为 9.26%和 8.38%,最小误差为-0.86%,误差范围大部分在±10%以内。但是,87912 场次洪水的洪峰流量相对误差达 30.7%,这主要是由于该暴雨洪水时段为 9 月 9 日至 16 日,产汇流过程历时长达

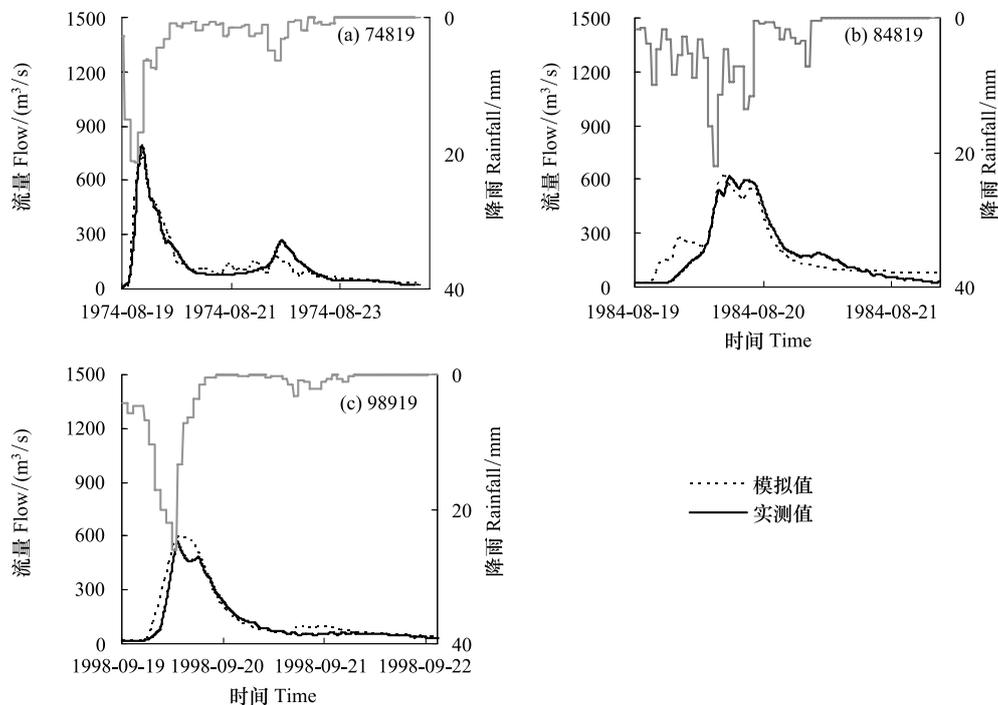


图3 验证期次降雨径流模拟值与实测值的比较

Fig.3 Comparison of observed and simulated hydrographs during validation period

7天,而HEC-HMS模型对长历时暴雨过程的模拟精度较差所致。验证期3场洪水洪峰流量和总洪量的相对误差均在 $\pm 15\%$ 内,平均确定性系数达到0.9,且有两场洪水的确定性系数在0.9以上,模拟的总体效果较好。同时,降雨径流过程模拟值与实测值拟合良好(图3)。总体看来,该模型能够较真实反映皎口水库流域的产汇流过程,可以用来分析土地利用变化对洪水的影响。

3.2.2 1985—2003年土地利用变化对历史洪水的影响

(1) 对洪水过程的影响

对皎口水库流域的场次暴雨进行最大24h暴雨量频率计算,按最大24h降雨强度将洪水分为5年一遇以上($>250\text{mm}$)、2—5年一遇($160\text{—}250\text{mm}$)和2年一遇以下($<160\text{mm}$)3个量级,对选择的历史场次洪水分别在1985年和2003年土地利用情况下进行模拟,得到的结果见表5。

由表5可以看出,2003年与1985年土地利用情况下模拟的洪水相比,洪峰和洪量均有不同程度的增加,且LUCC使同一量级洪水的洪峰变化小于洪量。对比分析发现,5年一遇以上、2—5年一遇、2年一遇以下这三种重现期条件下的洪水峰值与洪量二者平均变化的差异值分别为4.6%、5.21%、6.5%。由此可知,重现期越低的洪水,其洪量与洪峰的差异越大。从洪水量级来看,5年一遇以上的洪水在1985年至2003年土地利用变化下平均增加最小,重现期为2—5年一遇的洪水增加较大,而小于2年一遇的洪水其增加程度最大。如大于5年一遇的洪水,其洪峰和洪量的平均增加幅度分别为3%和7.6%;而小于2年一遇的洪水,其洪峰和洪量的平均增加幅度分别为5.41%和11.91%,即在同等土地利用变化条件下,2年一遇以下重现期的洪水较5年一遇以上洪水改变更明显。

(2) 对洪水量级的影响

运用历史暴雨资料计算得到流域洪水频率,参考研究区设计洪水及2003年洪水频率复核情况,选择5年一遇(250mm)、10年一遇(300mm)、25年一遇(380mm)、50年一遇(440mm)和100年一遇(500mm)这5个典型重现期,结合1985年、1993年和2003年的土地利用和洪水重现期变化进行设计实验的模拟计算,结果如表6所示。

表 5 皎口水库流域在 1985—2003 年土地利用情况下的洪水模拟结果

Table 5 Results of flood simulation under 1985–2003 land use patterns in Jiaokou Reservoir watershed

重现期/a Return periods	洪水号 Flood number	降雨强度/mm Rainfall intensity	1985 年参数模拟 Simulated in 1985		2003 年参数模拟 Simulated in 2003		土地利用变化影响 Impacts of LUCC	
			洪峰流量 Flood peak/ (m ³ /s)	径流量 Runoff/mm	洪峰流量 Flood peak/ (m ³ /s)	径流量 Runoff/mm	洪峰变化 Change of peak/%	径流变化 Change of runoff/%
5 年一遇以上 Over 5-year return period	81830	307.7	1033.2	434.4	1061.2	471.7	2.71	8.59
	87909	361.7	599.7	257.7	626.6	282.7	4.49	9.7
	97818	271.2	1331.4	222.5	1355.3	232.5	1.8	4.5
	平均						3.0	7.6
2—5 年一遇 2—5 year return period	74819	228.8	726.9	260.3	749.4	286.3	3.1	10.1
	79823	245.3	907.1	300.4	931.7	324	2.71	7.86
	200913	182.7	537.7	180.3	570.6	197.6	6.12	9.6
	平均						3.98	9.19
2 年一遇以下 Under 2-year return period	85921	148.4	618.1	109.8	647.3	116.7	4.72	6.28
	93630	76.5	414.8	60	443.8	72.7	7	21.17
	98919	155.4	575.6	94.2	601.5	102	4.5	8.28
	平均						5.41	11.91

表 6 研究区不同重现期及土地利用下洪峰模拟/(m³/s)

Table 6 Simulated flood peaks under different typical return periods and land use types

土地利用情况 Land use	重现期 Return periods/a				
	5 年一遇 5-year return period	10 年一遇 10-year return period	25 年一遇 25-year return period	50 年一遇 50-year return period	100 年一遇 100-year return period
	1985 年	938.3	1293.6	1712.7	1986
1993 年	960.2	1315.5	1734.6	2007.6	2309.7
2003 年	982.2	1338.1	1757.2	2030.1	2332.2

从表 6 可以看出,不同年份的土地利用情况使不同重现期洪水的峰值发生一定幅度的改变。借助克里格线性插值技术统计分析等值洪峰的变化趋势,可以推算出,自 1985 年起至 2003 年随着下垫面条件变化,流域内不同等级暴雨洪水的重现期均在一定程度上有所提前,其中,100 年、50 年和 25 年一遇洪水分别提前了 15 年、6 年和 2 年,即流域土地利用/覆被变化(LUCC)会使洪水重现期发生一定变化,其中对量级最高的特大洪水的重现期影响最大。

3.2.3 土地利用转变对不同重现期洪水的影响差异

由上述分析可知,洪水洪峰和洪量在 2003 年土地利用条件下均有增加的趋势,但是该趋势是所有 LUCC 共同作用的结果。为了区分各土地利用类型的贡献程度,假定一种土地利用类型向另一种转变,其它土地利用不变,利用模型模拟的方法来进行研究。有研究表明,由于不同土地利用类型的下渗率和不透率存在差异,对同一场降雨的洪水响应截然不同^[8,24]。由于流域内建筑用地和水体面积比例较少,其变化对降雨径流关系影响不大,因此本文只根据林地、灌草地或裸地转变的实际情况,模拟林地从 1985 年开始以 10%、20%、30%、40%、50% 比例分别转变为以上三种地类时不同重现期暴雨洪水过程的变化,其中,100 年一遇、50 年一遇和 5 年一遇洪水变化情况如图 4 所示。

结果表明,当林地、灌草地和裸地转变时,洪水洪峰与洪量均发生了不同程度的增加,且洪量较洪峰增加幅度大、增加更快。对于所有量级洪水而言,林地转变影响程度呈现普遍规律:林—裸地>林—灌草地>林—耕地,即林—裸地转变对洪峰和洪量影响最大,林—灌草地转变的影响次之,由于皎口水库流域内耕地的蓄水作用和较大的下渗率,因此在三者之中,林地变为耕地使洪水增加最少。此外,随着转变率增大,以上三种地类转变方式使洪水变化的差异性增大:当林地以 10% 转变时,裸、灌草地,灌草、耕地以及裸、耕地引起

100 年一遇洪水洪峰增加的差异分别为 0.21%、0.11% 和 0.32%；当林地以 50% 转变时，影响差异变为 1.01%、0.52% 和 1.53%；当林地以 10%—50% 转变时，以上三者使径流总量增加差异由 0.38%、0.2% 和 0.58% 变为 1.88%、0.95% 和 2.83%。随着林地从 10% 变为 50% 转出，三者对 5 年一遇洪水峰值影响差异由 0.52%、0.24% 和 0.76% 变为 2.52%、1.19% 和 3.71%，洪量由 0.98%、0.55% 和 1.53% 变为 4.93%、2.59% 和 7.52%。对比分析可知，三者地类转变使 5 年一遇洪水变化的差异较 100 年一遇洪水更明显。

对于不同重现期洪水，量级最小的洪水对土地转变响应最敏感。当林地从 1985 年开始以 10%—50% 转变为裸地时，100 年一遇、50 年一遇、25 年一遇和 5 年一遇洪水峰值相对于 1985 年分别增加 0.88%—4.3%、1.02%—4.96%、1.2%—5.84% 和 2.18%—10.67%，平均增加 2.6%、3%、3.53% 和 6.45%；洪量变化 1.61%—7.91%、1.8%—9.16%、2.22%—10.95% 和 4.15%—20.62%，平均变化 4.77%、5.5%、6.6% 和 12.4%。即在同样土地利用变化下，低重现期较高重现期洪水事件改变程度更大，且随着林地转出比率增大，低重现期洪水变化更迅速。

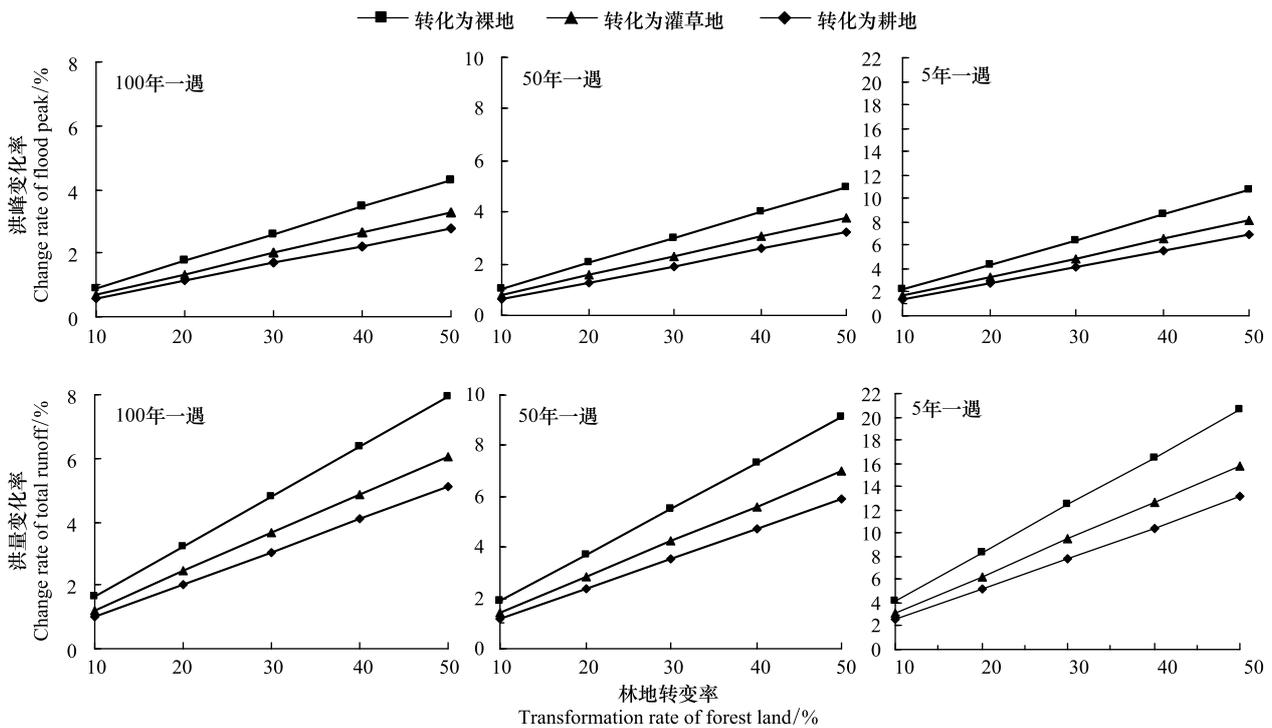


图 4 土地利用类型转变对典型重现期洪水的影响

Fig.4 Impacts of land use change (LUCC) on storm floods with typical return periods

4 结论与讨论

本研究应用 Landsat TM 遥感影像进行人机交互解译提取土地利用信息，进而结合皎口水库流域下垫面的实际情况，统计分析 1985—2003 年期间流域内土地利用变化。运用 HEC-HMS 模型对流域内 1974—2003 年的 8 场年最大暴雨的洪水过程进行模拟分析，对不同重现期洪水—土地利用变化的关系进行实验设计，探究该流域土地利用变化对不同量级洪水事件的影响。根据以上分析，可以得出以下结论与讨论：

(1) 1985—2003 年，流域内主要覆被为林地、灌草地，土地利用转变主趋势为林地向耕地、裸地、灌草地转变。

(2) 在 1985—2003 年土地利用条件下模拟，流域内历史洪水的洪峰和洪量均有不同程度的增加，洪量较洪峰变化明显，土地利用变化对低重现期暴雨洪水事件的影响程度最大。随着土地利用变化，流域内典型场次暴雨洪水的重现期均有不同程度地提前，量级最大暴雨洪水的重现期变化最明显。

(3)不同的土地利用转变方式对洪水的贡献程度不一,其中林地向裸地转变使洪水增加最大、最快,林地向灌草地转变次之,林地向耕地转变影响最小。随着林地以 10%—50%比例转变为裸、灌草、耕地,以上三者转变方式对洪水影响的差异性增大,且这种差异性在低重现期洪水表现最明显。

(4)本研究运用的洪水资料是历史年最大场次暴雨洪水,设计洪水分析有利于为流域特大洪水防洪标准调整提供详细参考。流域内历史洪水重现期集中在 10 年一遇以下,而小量级洪水对土地利用变化较为敏感,因此,应加强土地利用变化的暴雨洪水响应研究,这将有利于提高流域洪水预报精度与防洪减灾能力^[27-28]。在流域防洪规划修订中,应长远并且全面地考虑引起洪水径流变化的各个影响因素,重视土地利用变化导致的径流量和洪峰变化,并及时将预测结果反馈到实际的改造建设中去。

参考文献 (References):

- [1] Priess J A, Schweitzer C, Wimmer F, Batkhisig O, Mimler M. The consequences of land-use change and water demands in Central Mongolia. *Land Use Policy*, 2011, 28(1): 4-10.
- [2] Moss T. The governance of land use in river basins: prospects for overcoming problems of institutional interplay with the EU Water Framework Directive. *Land Use Policy*, 2004, 21(1): 85-94.
- [3] Masek J G, Lindsay F E, Goward S N. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3473-3486.
- [4] 王根绪,张钰,刘桂民,陈玲. 马营河流域 1967—2000 年土地利用变化对河流径流的影响. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2005, 35(7): 671-681.
- [5] Li J Z, Feng P, Wei Z Z. Incorporating the data of different watersheds to estimate the effects of land use change on flood peak and volume using multi-linear regression. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*, 2013, 18(8): 1183-1196.
- [6] Schilling K E, Gassman P W, Kling C L, Campbell T, Jha M K, Wolter C F, Arnold J G. The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed. *Hydrological Processes*, 2014, 28(8): 3314-3325.
- [7] 陈莹,许有鹏,尹义星. 土地利用/覆被变化下的暴雨径流过程模拟分析——以太湖上游西苕溪流域为例. *地理科学*, 2009, 29(1): 117-123.
- [8] Wijesekera G N, Gupta A, Valeo C, Hasbani J G, Qiao Y, Delaney P, Marceau D J. Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 2012, 412-413: 220-232.
- [9] Naef F, Scherrer S, Weiler M. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1/2): 74-79.
- [10] 林峰. 晋江西流域土地利用/覆被变化的洪水响应研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2010.
- [11] Olang L O, Furst J. Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya. *Hydrological Processes*, 2011, 25(1): 80-89.
- [12] 万荣荣,杨桂山,李恒鹏. 流域土地利用/覆被变化的洪水响应——以太湖上游西苕溪流域为例. *自然灾害学报*, 2008, 17(3): 10-15.
- [13] Mao D Z, Cherkauer K A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2): 71-82.
- [14] Reynard N S, Prudhomme C, Crooks S M. The flood characteristics of large UK rivers: potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 2001, 48(2/3): 343-359.
- [15] Wang Y L, Yang X L. Land use/cover change effects on floods with different return periods: a case study of Beijing, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(5): 769-776.
- [16] 黄晓敏. 基于分布式水文模型的历史暴雨洪水重现技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [17] 李建柱,冯平. 降雨因素对大清河洪水径流变化影响分析. *水利学报*, 2010, 41(5): 595-600, 595-600+607.
- [18] 李建柱,冯平. 紫荆关流域下垫面变化对洪水的影响. *地理研究*, 2011, 30(5): 921-930.
- [19] 冯仕超,高小红,顾娟,亢健,郭丽峰,吴国良,邹婵. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟. *生态学报*, 2013, 33(3): 985-997.
- [20] 南颖,吉喆,董叶辉,倪晓娇. 30 年来图们江跨国界地区土地利用/覆盖动态变化研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 2012, 35(1): 82-89.
- [21] 张晓明,余新晓,武思宏,张满良,李建劳. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应. *生态学报*, 2007, 27(2): 414-423.

- [22] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, Strauss P, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [23] Huang S Y, Cheng S J, Wen J C, Lee J H. Identifying peak-imperviousness-recurrence relationships on a growing-impervious watershed, Taiwan. *Journal of Hydrology*, 2008, 362(3/4): 320-336.
- [24] Du J K, Xie S P, Xu Y P, Xu C Y, Singh V P. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3/4): 334-346.
- [25] 周敏敏, 瞿思敏, 石朋, 王鸿杰. 淮河上游大坡岭流域土地利用方式变化引起的流域滞时变化. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 100-106.
- [26] 丁杰, 李致家, 郭元, 黄鹏年. 利用 HEC 模型分析下垫面变化对洪水的影响——以伊河东湾流域为例. 湖泊科学, 2011, 23(3): 463-468.
- [27] 郑鹏, 林韵, 潘文斌, 邓红兵. 基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究. 生态学报, 2013, 33(4): 1268-1275.
- [28] Ali M, Khan S J, Aslam I, Khan Z. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(4): 271-279.