

# 典型山区城市化进程对河流水文效应分析

林文扬<sup>1</sup>, 周 焕<sup>2</sup>, 孙英军<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州

<sup>3</sup>浙江省水文管理中心, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年9月13日; 录用日期: 2022年12月6日; 发布日期: 2022年12月31日

## 摘 要

浙江地处我国东南沿海地区, 地形以山区居多, 城市化进程与其特点密不可分, 而城市化的发展对河流水文效应产生了一定的影响, 本文通过对河道径流变化来反映流域水文效应变化情况: 对流域的降雨、气温及植被对径流的影响分析并利用MIKE SHE模型对流域不同下垫面情况的径流进行模拟。研究结果显示流域的径流主要由降雨产生, 不论是周期性还是趋势线, 降雨和径流均具有高度的一致性; 通过MIKE SHE模拟的三场洪水洪峰流量平均增大9.4%, 洪量平均增大7.7%; 其他因素不变时, 当降雨增加10%, 径流量增加6.16%, 叶面积指数扩大10倍, 对径流量影响为4.44%。因此, 城市化进程与林地、草地保护之间的矛盾日益突出, 整体性洪水风险有所增大。

## 关键词

城市化, 水文效应, 径流变化, MIKE SHE, 楠溪江流域

# Analysis of the Hydrological Effect of the Urbanization Process in Typical Mountainous Areas on Rivers

Wenyang Lin<sup>1</sup>, Huan Zhou<sup>2</sup>, Yingjun Sun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power, Hangzhou Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Provincial Hydrological Management Center, Hangzhou Zhejiang

Received: Sep. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

**Zhejiang Province is in the southeast coastal area of China, with mountainous areas as the main terrain,**

作者简介: 林文扬, 籍贯浙江平阳, 1982年3月出生, 学历大学本科, 职称工程师, 研究方向水文水资源, Email: 11669155@qq.com

文章引用: 林文扬, 周焕, 孙英军. 典型山区城市化进程对河流水文效应分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(6): 632-639.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.116068

and the urbanization process is inseparable from its characteristics. The development of urbanization has certain influence on the hydrological effect of rivers. This paper reflects the change of hydrological effect of river basin through the change of river runoff: the impact analysis of rainfall, temperature, and vegetation on runoff of the basin and uses MIKE SHE models to simulate runoff under different underlying surface conditions of the basin. The results show that the runoff of the catchment is mainly generated by rainfall, and both rainfall and runoff are highly consistent, whether periodic or trend line. The peak discharge and flood volume of the three floods simulated by MIKE SHE increased by 9.4% and 7.7% respectively on average. When other factors remain unchanged, when rainfall increases by 10%, runoff increases by 6.16%, and leaf area index increases by 10 times, the impact on runoff is 4.44%. Therefore, the contradiction between urbanization process and forest land and grassland protection is increasingly prominent, which increases the overall flood risk.

## Keywords

Urbanization, Hydrological Effect, Runoff Change, MIKE SHE, Nanxi River Basin

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景

随着我国经济的快速发展,城市化进程不断加快,人类活动对河流的影响也随之增大[1][2]。由于城市发展的影响,城市下垫面性质发生变化,不透水面积增大,同时天然河道受到破坏,河网水系数量也不断减少[3],导致近年来城市洪涝灾害频频发生。

不少学者认为城市化发展所带来的土地利用变化是洪涝灾害频发的重要原因之一[4][5]。李慧等[6]与王慧亮等[7]研究发现城市河流径流量在近几十年中均存在突变点,且与城市化发展时间阶段相吻合。Brandes 等[8]发现,当流域的不透水面积达到 20%时,暴雨流量才会相应增加。

浙江地处我国东南沿海,素有“七山一水二分田”地势地貌特点,改革开放后经济发展迅猛,加速当地城市化进程。而因城市化开发带来水文效应变化对人们生产生活带来一定影响,故我们需要多要素综合考虑城市化发展对水文效应变化,因此选择浙江省较为典型山区楠溪江流域作为研究范围。

本文所选取研究的楠溪江流域是一个保存较为完好、较为典型的天然流域,域内径流特征受人类活动影响较小,拥有较为完整的降雨、蒸发、气温、植被覆盖率等资料。通过分析流域径流变化来反映流域内水文效应变化,并利用 MIKE SHE 对楠溪江流域不同场景下垫面变化的径流及场次洪水模拟,寻求一个更好的楠溪江径流变化与下垫面之间的关系;为流域城镇开放土地利用规划提供参考,进而提升水灾害的防御能力,具有一定实际应用价值。

## 2. 研究区概况

楠溪江古名瓯水,位于 28°00'N~28°34'N, 120°19'E~120°59'E 之间。楠溪江主流源头位于括苍山脉,源头海拔 1192 m。河道纵横贯穿永嘉县及部分市区的一些乡村,最终在瓯北镇清水埠汇入瓯江,流域面积达到 2436 km<sup>2</sup>,主流河长 142 km,平均比降 6.0‰。

楠溪江流域内的降水资料及径流资料均来自于域内的站点观测资料并对其进行整编、校对等处理后的数据;由于本流域的水文站实际情况,加之搭建 MIKE SHE 模型对数据的种类的要求较为繁杂,包括同一时期必须具有降雨、蒸发、径流等资料,因此本文研究选取的拥有完整的实测降雨资料、蒸发资料及径流资料的年份较短且集中在 20 世纪 80 年代。该时期所有数据种类较为完整,利于对径流预报模型的应用研究。

### 3. 水文效应分析研究

#### 3.1. 降雨对径流的影响

##### 1) 降雨径流相关性分析

七条支流上降雨和径流之间具有较强的相关性，降雨径流相关系数见表 1。

**Table 1.** Correlation between rainfall and runoff of typical tributaries

**表 1.** 典型支流降雨径流相关关系

支流	降雨径流相关方程	R <sup>2</sup>
小楠溪	$y = 0.021x - 12.954$	0.929
大源溪	$y = 0.010x - 6.506$	0.923
鹤盛溪	$y = 0.009x - 5.765$	0.937
张溪	$y = 0.004x - 2.527$	0.913
花坦溪	$y = 0.003x - 1.666$	0.937
岩坦溪	$y = 0.008x - 4.941$	0.903
五尺溪	$y = 0.002x - 0.906$	0.977

通过分析可知，楠溪江流域上降雨和径流具有密切的关系，即径流的变化特征主要依赖于降雨的变化特征，因此降雨是导致径流发生变化的主要因素。

##### 2) 降雨的周期性分析

楠溪江流域上降雨资料来源于整编过的实测资料，取楠溪江沙头断面进行面雨量统计计算(见表 2)。

**Table 2.** Statistical values and associated probability values of rainfall groups in Nanxi River

**表 2.** 楠溪江降雨组间统计值及相伴概率值表

分组数 $b$	统计量 $F$ 值	相伴概率 $\rho$	分组数 $b$	统计量 $F$ 值	相伴概率 $\rho$
2	0.881	0.352	17	1.526	0.137
3	0.383	0.683	18	1.013	0.486
4	1.273	0.293	19	0.478	0.953
5	3.008	0.026	20	1.578	0.114
6	0.394	0.851	21	0.458	0.967
7	0.441	0.848	22	1.258	0.266
8	1.895	0.090	23	0.804	0.701
9	0.727	0.667	24	0.988	0.502
10	1.708	0.113	25	1.138	0.360
11	0.825	0.607	26	0.732	0.788
12	0.813	0.628	27	0.743	0.778
13	0.616	0.817	28	0.615	0.898
14	0.653	0.795	29	0.879	0.633
15	2.513	0.010	30	1.164	0.345
16	1.484	0.156			

上表是对应分组 2、分组 3、……、分组 30 的 29 个分组变量的楠溪江降雨序列的统计量  $F$  及相伴概率  $\rho$  值, 可见仅在分组组数  $b = 15$  时,  $\rho = 0.01 < \alpha = 0.05$ , 通过信度  $\alpha = 0.05$  的  $F$  检验, 说明存在长度为 15 (年) 的第一周期, 也即是主周期。

参照同样的方法, 利用 SPSS 对楠溪江降雨的新序列 1 (剔除第一周期) 进行第二周期分析, 以此类推进行计算。结果表明, 楠溪江降雨序列存在一个主周期, 即  $b = 15$  (年), 不存在其他周期; 楠溪江降雨序列与楠溪江径流序列具有同样的周期波动。

### 3) 降雨的趋势性分析

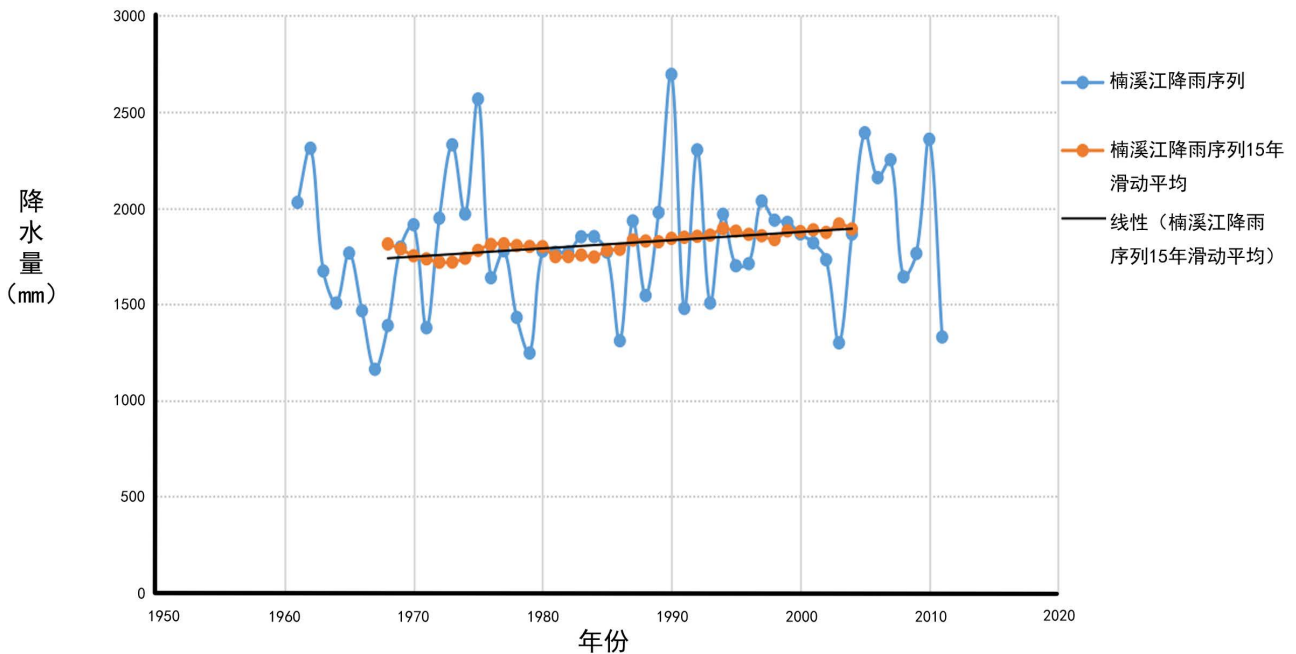


Figure 1. Rainfall tendency chart of Nanxi River

图 1. 楠溪江降雨趋势变化图

从楠溪江降雨变化趋势(图 1)可以看出, 楠溪江沙头断面多年降雨平均值为 1843.2 mm, 其最小降雨量出现在 1967 年, 其值为 1161.4 mm, 最大降雨量出现在 1990 年, 其值为 2695.1 mm。楠溪江降雨的总体变化趋势呈现缓慢增加的态势, 表明楠溪江流域内降雨随着时间的推进, 缓慢增加。

从上述分析看, 流域的径流主要由降雨产生, 因此不论是从周期性还是趋势线, 降雨和径流均具有高度的一致性, 但是楠溪江降雨的增加趋势要明显强于其径流的增加趋势, 说明流域内还有其它因子抵消了部分由于降雨增加而增加的径流, 而且该因子一定与降雨一样, 具有流域面分布特征。

### 3.2. 气温对径流的影响

本次选择永嘉站为代表, 并对气温数据进行摘录整理, 分析其变化特征。

#### 1) 趋势分析

研究 1961~2017 年年平均气温变化趋势, 如图 2 所示。

通过年平均气温变化过程图可以看出, 年平均气温有比较明显的上升趋势, 年平均气温倾向率为  $0.176^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 表明永嘉县随着时间的推进, 气温呈现上升趋势。

#### 2) 突变性分析

对永嘉县年平均气温进行 M-K 突变检测(见图 3)。

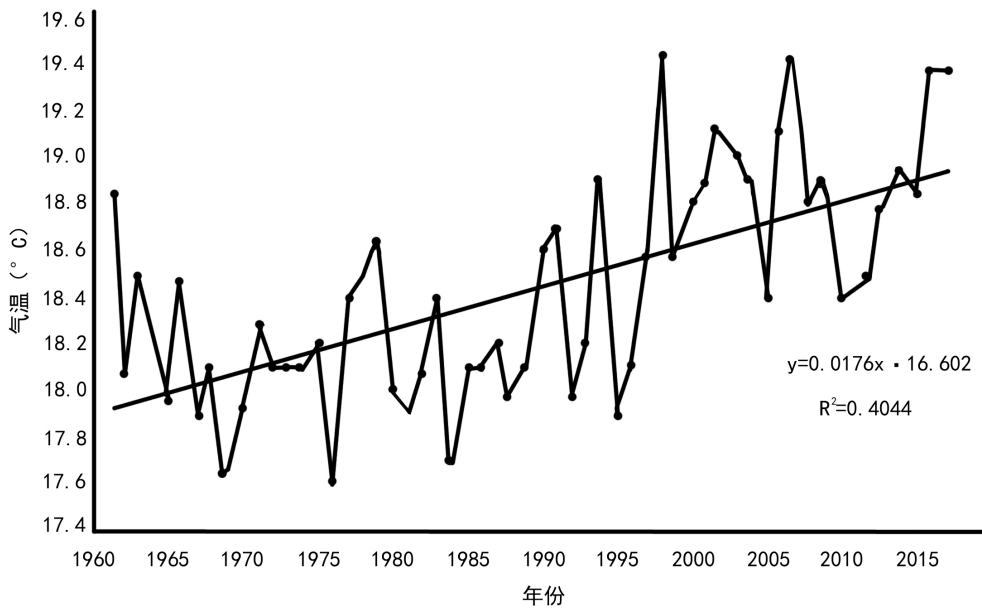


Figure 2. Change process of annual average temperature in Yongjia County  
图 2. 永嘉县年平均气温变化过程图

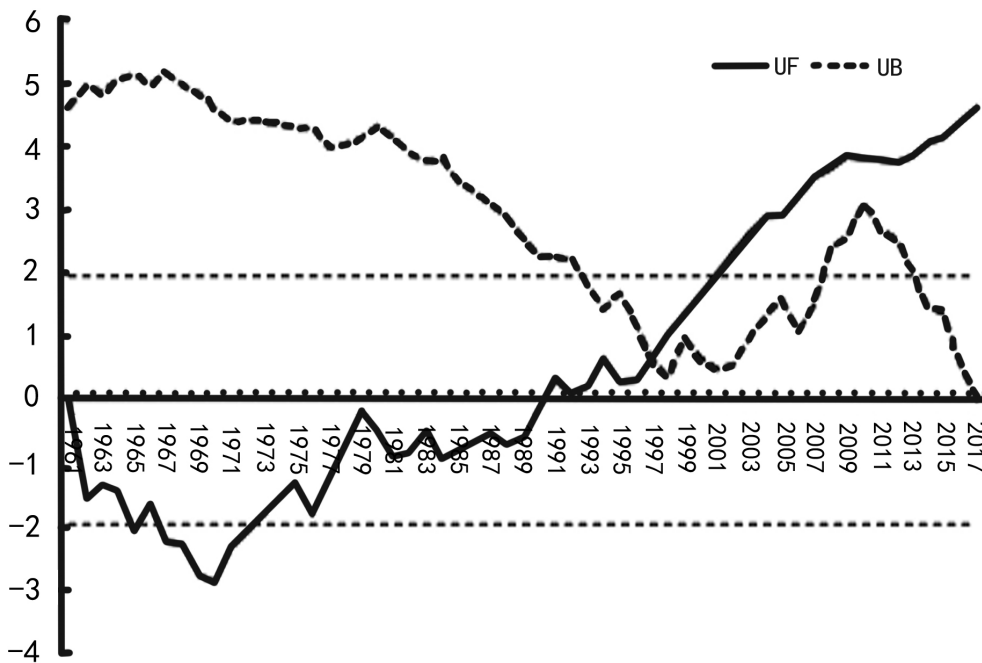


Figure 3. Annual average temperature M-K mutation discrimination curve  
图 3. 年平均气温 MK 突变判别曲线图

根据分析可知,通过 M-K 突变点检测法得出年平均气温突变年份发生在 1997 年左右。气温对径流的影响,主要是加大了水面和陆面蒸发量,即在同样的降雨和产流条件下,流域所产生的径流应随着气温的升高呈现减少的趋势。

### 3.3. 植被对径流的影响

永嘉县森林生态休闲资源丰富,全县森林植被在浙江植被分区中属中亚热带常绿阔叶林南部亚地带。林区

由于树冠截留后叶面蒸发以及森林的蒸腾等所消耗的水量，大于无林区，而森林又不能增加降水量，因此从成因来看，林冠截留减小了入河的水量、土壤入渗减小了地表径流但增加了壤中流和地下径流、植物根系有利于水土保持、植物蒸腾和蒸发加大了水分的消耗，因此森林覆盖率的减小，增大了洪峰流量及加快和缩短了洪水的汇流时间，植被的蒸散发量减少使得径流总量增多了。

### 3.4. 土地利用对径流的影响

土地是各种自然因素相结合的综合体，自然因素的变化在一定程度上会影响土地利用变化，尤其是地貌、气候、自然灾害等。由于近几年永嘉县没有低山缓坡项目，故自然地貌对永嘉县的土地利用变化的影响不是很大；气候的变化需要持续较长的一段时间才能改变，短时间内几乎不会对土地利用造成影响，可以忽略不计。

人口是影响永嘉县土地利用变化的一个重要驱动力，永嘉县 2010~2020 年间总人口数由 78.91 万人上升到 86.95 万人，十年共增加 80,394 人，增长 10.19%，年平均增长率为 0.98%。而人口的增加必然会增加居住用地和交通运输用地等建设用地的面积，大量的建设用地改变了土地原有的功能，也使土地利用结构发生变化。1985 年至 2020 年间建设用地面积由 10.9 km<sup>2</sup> 增长为 231.5 km<sup>2</sup>，增长率为 2024%，与实际的社会经济指标相一致。建设用地的增加，直接导致了城市不透水面积的增大，流域滞洪能力减弱，洪峰流量增大，洪峰时间提前。

## 4. MIKE SHE 模型流域水文效应分析

### 4.1. 参数率定结果

率定参数的年份选用 1980~1982 年的实测水文资料，图 4 是楠溪江率定径流与实际径流的对比图。

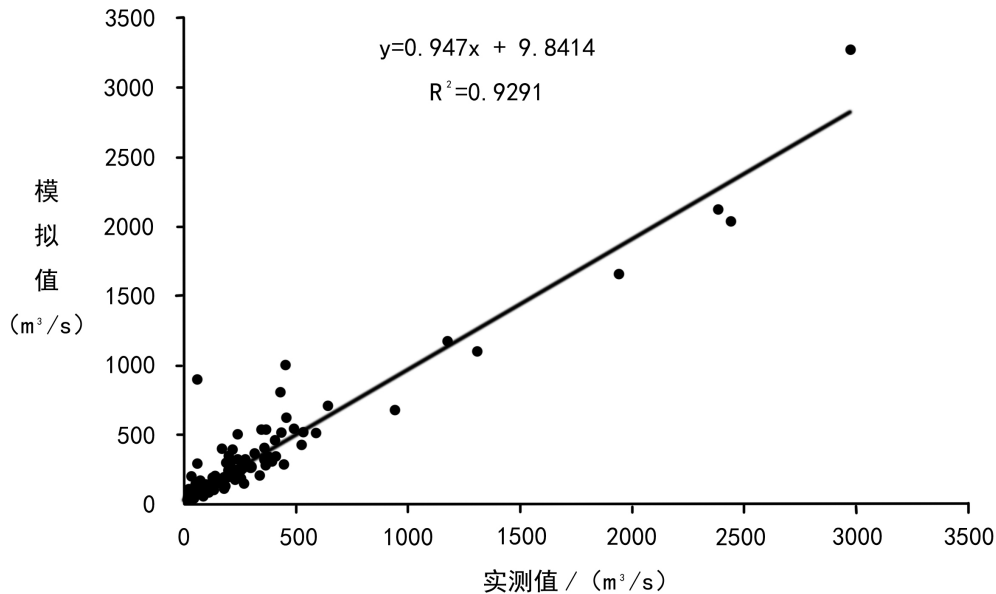


Figure 4. Correlation analysis diagram of measured and simulated runoff  
图 4. 实测与模拟径流相关分析图

从率定效果来看，参数的设置较为合理，能较好地模拟出楠溪江径流。因此采用此参数设置，模拟 1983~1985 年的径流，并据此模拟不同径流影响因素对楠溪江径流的影响程度。

### 4.2. 模型计算结果

将三个场次洪水分别输入 1985 年下垫面条件和 2020 年下垫条件下 MIKE SHE 模型，20040813 场次洪水下



流域出口洪峰流量由 4980 m<sup>3</sup>/s 增至 5390 m<sup>3</sup>/s, 增幅达 7.63%, 流域出口洪量由 3.69 亿 m<sup>3</sup> 增至 3.92 亿 m<sup>3</sup>, 增幅达 6.3%; 20050720 场次洪水下流域出口洪峰流量由 5380 m<sup>3</sup>/s 增至 5850 m<sup>3</sup>/s, 增幅达 8.7%, 流域出口洪量由 4.66 亿 m<sup>3</sup> 增至 4.96 亿 m<sup>3</sup>, 增幅达 6.5%; 20190813 场次洪水下流域出口洪峰流量由 5420 m<sup>3</sup>/s 增至 6060 m<sup>3</sup>/s, 增幅达 11.8%, 流域出口洪量由 3.34 亿 m<sup>3</sup> 增至 3.685 亿 m<sup>3</sup>, 增幅达 10.4%。三场洪水洪峰流量平均增大 9.4%, 洪量平均增大 7.7%, 平均峰现时间提前约 1.7 h, 城市化扩张致使研究区整体性洪涝风险增强, 模型计算成果对比情况见表 3。

**Table 3.** Comparison table of model calculation results

**表 3.** 模型计算成果对比表

项目	20040813		20050720		20190813	
	1985 年	2020 年	1985 年	2020 年	1985 年	2020 年
洪峰(m <sup>3</sup> /s)	4980	5390	5380	5850	5420	6060
洪量(亿 m <sup>3</sup> /s)	3.69	3.92	4.66	4.96	3.34	3.685
峰现时间差值(h)	提前 1.5 h		提前 1.5 h		提前 2 h	

## 5. 结论

通过上述研究结果表明: 楠溪江流域作为浙江省典型的山区性流域, 城市化开发程度虽然总体占流域面积比重较小, 不透水面积的变化, 对流域径流影响较小, 但从洪水样本模拟情况看会导致洪量增加、洪峰时间提前等现象。

1) 研究发现楠溪江流域降雨径流存在很强的相关关系, 即降雨的增加势必带来径流的增加, 但是由于植被覆盖率、气温升高与径流存在负相关关系, 所以总体保持原趋势。通过模型模拟结果对比来看, 保持其他因素不变, 增加 10% 的降雨量, 径流量增加 6.16%。根据降雨量的长期增长趋势, 径流量平均每年理论上可增加 0.15%。

2) 通过对楠溪江流域 MIKE SHE 模型计算, 在保持其他因素不变, 将象征森林覆盖率的叶面积指数增加 10 倍, 对径流量影响为 4.44%。

3) 随着城市的下垫面性质发生变化, 不透水面积增大。相同的三场洪水分别输入不同年份的下垫面条件, 洪水洪峰流量平均增大 9.4%, 洪量平均增大 7.7%。城市化进程与林地、草地保护之间的矛盾日益突出, 对整体性洪水风险有所增大。

## 基金项目

本论文研究为浙江省水利厅科技计划项目, 项目编号: RC2042。

## 参考文献

- [1] 陈佩琪, 王兆礼, 曾照洋, 等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(9): 67-77.  
CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Simulation and prediction of impacts of urbanization on watershed hydrological processes. Journal of Hydroelectric Power, 2020, 39(9): 67-77. (in Chinese)
- [2] 肖志强, 兰佳, 李慧赞, 等. 气候与下垫面变化对新安江上游(屯溪站)径流变化贡献率的定量分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 474-482.  
XIAO Zhiqiang, LAN Jia, LI Huibin, et al. Contribution of climate and underlying surface changes to runoff change in the Upper Xin'an River (Tunxi District station) quantitative analysis. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2018, 40(3): 474-482. (in Chinese)
- [3] 许有鹏, 丁瑾佳, 陈莹. 长江三角洲地区城市化的水文效应研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 67-73.  
XU Youpeng, DING Jinjia and CHEN Ying. Study on hydrological effects of Yangtze River Delta urbanization. Journal of Water Conservancy and Water Transport Engineering, 2009(4): 67-73. (in Chinese)

- [4] 彭建, 魏海, 武文欢, 等. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3741-3755.  
PENG Jian, WEI Hai, WU Wenhuan, et al. Risk assessment of urban rainstorm and flood disaster based on land use change scenario: A case study of Maozhou River basin in Shenzhen City. *Journal of Ecology*, 2018, 38(11): 3741-3755. (in Chinese)
- [5] 徐金涛. 长江三角洲地区小流域环境变化对水文过程影响研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.  
XU Jintao. Impact of environmental change on hydrological processes in small Yangtze River Delta basins. Ph.D. Thesis, Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese)
- [6] 李慧, 周维博, 马聪, 等. 城市化对西安市降水及河流水文过程的影响[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 322-331.  
LI Hui, ZHOU Weibo, MA Cong, et al. Impacts of urbanization on precipitation and river hydrological processes in Xi'an. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 322-331. (in Chinese)
- [7] 王慧亮, 吴泽宁, 孙若尘. 郑州市城市化对贾鲁河流域水文过程的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 316-321.  
WANG Huiliang, WU Zening and SUN Ruochen. Influence of Zhengzhou urbanization on hydrological process in Jialu River basin. *Science, Technology and Engineering*, 2017, 17(31): 316-321. (in Chinese)
- [8] BRANDES, D., CAVALLO, G. J. and NILSON, M. L. Base flow trends in urbanizing watersheds of the Delaware River basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(6): 1377-1391.  
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03806.x>