

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0066

孙蓝心,夏军,余敦先,等.九江市中心城区下垫面变化及其径流响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):625-635. SUN L X, XIA J, SHE D X, et al. Changes of underlying surface and its runoff response in the central city of Jiujiang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 625-635. (in Chinese)

九江市中心城区下垫面变化及其径流响应

孙蓝心^{1,2}, 夏军^{1,3}, 余敦先^{1,2}, 胡辰^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100010)

摘要:在快速城市化的大背景下,城市地区下垫面变化是影响径流过程的重要因素。以江西省九江市中心城区为例,解译并分析 1987—2018 年土地利用/覆被变化(LUCC)特征,利用城市时变增益非线性模型研究不同下垫面条件下的径流特征。结果表明:1987—2018 年九江市中心城区(浔阳区、濂溪区、柴桑区)不透水面比例从 0.49% 上升至 10.58%;典型年降雨条件下径流系数从 0.31 增长到 0.38;场次洪峰流量增加了 10%。不透水面比例是研究区流量变化的主导因素,其他下垫面类型及降雨条件的变化加剧了产汇流过程的时变性和复杂性,而绿地和水体的调蓄作用将抵消一部分由不透水面扩张引起的径流增大效应。

关键词:径流变化;城市化;时变增益模型;下垫面;土地利用/覆被变化

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



城市地区的下垫面硬化现象引发了一系列水文效应,日益受到国际水文学界的关注^[1]。快速城市化使得城市水文效应的负面影响越发突出,如:内涝问题、水体黑臭问题、河湖生态退化问题等^[2-3]。近年来,“城市看海”现象在我国许多大城市普遍存在,如:2016 年夏季武汉内涝成灾、2019 年广州“5·22”特大暴雨等,这些现象与城市化的快速发展有着不同程度的联系^[4-6]。

不透水面扩张是城市化发展的主要特征之一,通过阻碍甚至切断各水源之间的连通渠道,进而改变了自然水文过程^[7]。Gong 等^[8]研究表明,1985—2018 年我国人工不透水面积增长了约 11 倍,其中特大城市(如上海、北京、天津等)的不透水面扩张现象尤为显著。随着地表透水面积的减少,入渗量削减,地表径流量与径流系数大大增加^[9-11]。这不仅改变了城市径流的时空变化格局,也加剧了极端天气造成的局部自然灾害^[12]。当前,许多学者^[13-14]借

助地理信息工具分析城市地区土地利用的变化特征,并结合原型观测实验和城市水文模型,研究以不透水面扩张为主要特征的城市地区土地利用/覆被变化(LUCC)及其径流响应^[15-17]。目前的研究工作主要集中在地表硬化程度较高的城市:郭禹含等^[18]采用 HIMS-SWMM 模型研究济南市主城区不透水地表格局及径流系数变化关系;Shao 等^[19]分析了不透水地表覆盖率的变化对武汉市水文过程的影响,认为城市化程度越大,总径流量的变化越大且洪峰越靠前。对于现状不透水面积比例相对较小,而城市化前后下垫面变化明显的城区,其径流过程往往受到多种下垫面变化的综合影响。

为探究城市下垫面变化的径流响应机制,本文以九江市中心城区为例,基于改进的时变增益产流模型对不同年份产流量及场次雨洪过程进行模拟,分析下垫面变化及多年径流量的演变趋势,量化研

收稿日期:2021-03-12 修回日期:2021-05-12 网络出版时间:2021-05-18

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210518.1509.002.html

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研资助项目(HB/ZB2021001)

作者简介:孙蓝心(1998—),女,江苏徐州人,主要从事城市水文学研究。E-mail:lx_sun@whu.edu.cn

通信作者:夏军(1954—),男,湖北孝感人,中国科学院院士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:xiajun666@whu.edu.cn

究区径流过程与不透水面扩张的响应关系,为理解长江中游典型城市的不透水面扩张及其水文效应提供支撑。

1 研究区概况

九江市位于江西省北部,地处长江中下游。九江市 2019 年国民经济和社会发展统计公报显示,全市面积 19 084 km²,其中主要行政范围包括浔阳区、濂溪区、柴桑区,3 区总人口约 102 万人。九江市属中亚热带向北亚热带过渡区,气候温和,降水丰沛。全市多年平均降雨量 1 520.6 mm,多年平均水资源总量 154.43 亿 m³,年平均气温 16~17℃。九江市城区水资源年际变化较大,空间分布不均。2009—2015 年九江市水资源公报显示,中心城区 2011 年和 2015 年的年降水量分别为 1 032.1 和 2 024.2 mm,水资源总量分别为 2.92 亿和 5.59 亿 m³,相差

2.67 亿 m³。年降水量主要分布在 4 至 7 月,多为高强度暴雨,空间上表现出自东向西逐步增大的分布规律。

九江市城区有十里河、濂溪河、沙河、赛城湖、八里湖等众多河流湖泊。近年来发生多起内涝灾害,部分路段“逢雨必涝”^[20]。另外,由于城区八里湖的水位低于长江九江段,发生暴雨时,十里河、沙河来水不断汇入八里湖,湖内水位快速上涨,排不出去的水就会涌向附近城区,造成较为严重的内涝灾害^[21],威胁着市民的生命财产安全。

以九江市中心城区(包括浔阳区、濂溪区和柴桑区)为研究区域占地面积约 1 333.93 km²,见图 1。据九江市土地利用总体规划(2006—2020 年),研究区内农用地以耕地、林地为主,城镇建设用地比重小,水域面积较大。

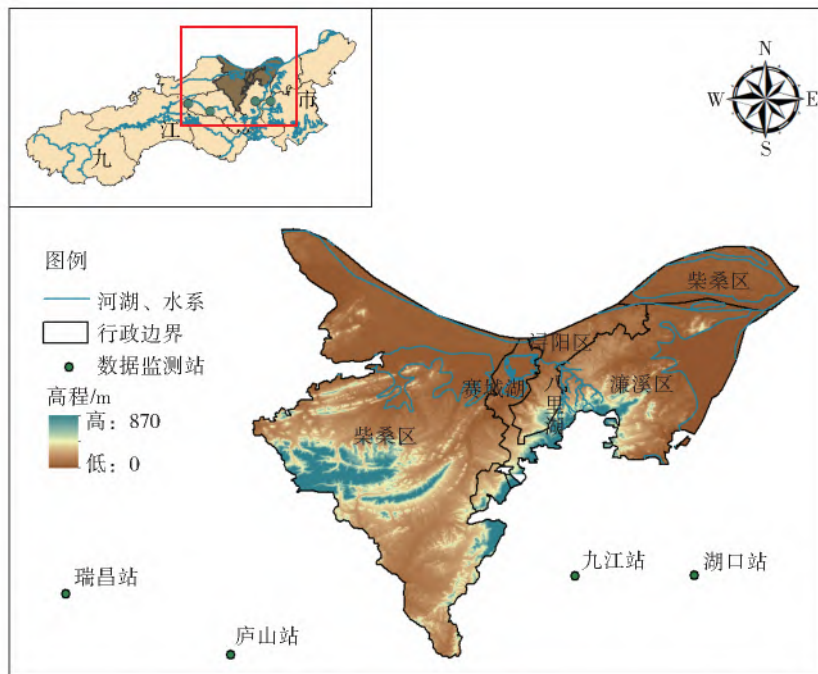


图 1 九江市研究区域

Fig. 1 Jiujiang research area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

采用的气象数据来自于中心城区附近的 4 个气象站点,包括九江站、瑞昌站、庐山站和湖口站,数据年限为 1987—2018 年,见表 1。时间间隔为 5 min

的典型年降雨序列由九江市气象局提供,典型年降雨量约 1 460.6 mm,雨量最大月份为 7 月(209.2 mm),最小月份为 12 月(49.0 mm),从中摘取典型暴雨过程,见图 2。研究区内的水资源总量和年降水总量取自九江市水资源公报(2009、2012 和 2015 年),用于模型参数率定。

表 1 1987—2018 年研究区附近气象站降雨量

Tab. 1 Rainfall of meteorological stations near the study area from 1987 to 2018

单位:mm

雨量分类	1987	1995	2000	2003	2006	2009	2012	2015	2018
年雨量	1 461.8	1 752.5	1 389.0	1 518.7	1 461.7	1 352.9	1 850.6	1 884.9	1 506.6
年最大日雨量	64.6	98.4	86.6	99.5	71.6	62.7	96.5	99.6	70.5

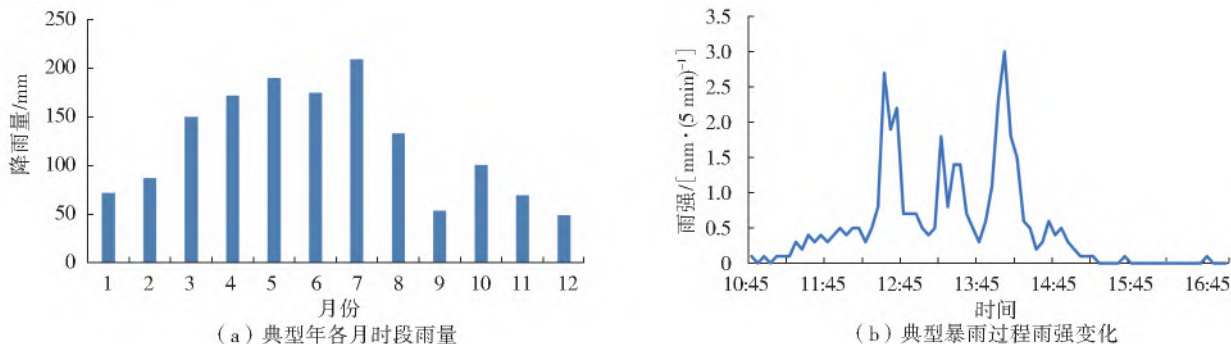


图2 研究区典型年降雨过程

Fig. 2 Typical rainfall process in the study area

利用 ENVI、ArcGIS 软件对遥感图像进行解译与分类。2000 年以前九江市的城镇化发展相对缓慢,为保证解译结果的可靠性,考虑各年份遥感数据的可获取性和图像质量,从 Landsat 4-5 TM 获取研究区 1987 年和 1995 年的遥感数据;2000 年以后城镇化高速发展,为更好地体现下垫面变化情况,选取间隔为 3 年的 7 个年份,其中 2000—2015 年数据源自 Landsat 7 ETM+,2018 年数据取自 Landsat 8 OLI/TIRS(<https://www.gscloud.cn/>)。依据土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007)及模型计算需求,初步将用地类型划分为耕地、林地草地、水体、城乡建设和其他用地等 5 类。同时,参考资源环境科学与数据中心提供的 LUCC 数据产品(<http://www.resdc.cn/>),验证分类结果的可靠性。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度

土地利用动态度是定量描述土地利用变化速率的指标,能够反映研究时段内各土地利用类型的数量变化情况及其区域分异特征,也可辅助预测未来土地利用变化趋势^[22]。土地利用动态度 K_n 通常可定义为一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,公式为

$$K_n = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_n 表示研究时段 T 内某下垫面类型的土地利用动态度,即土地利用年变化率; U_a 、 U_b 分别为时段始末该类型土地面积, km^2 ; T 的单位通常取年。

2.2.2 城市时变增益非线性模型

时变增益模型 (time variant gain model, TVGM) 是夏军教授于 1989 年提出的非线性产流计算模型,其主要特点是:在产流计算中将土壤湿度和雨强作为增益因子的影响因素,建立起简单的幂指数关系。该模型既保证系统响应关系为非

线性,同时又降低了产流结构的复杂程度,可以作为产流时变的概念性水文模型,在中小流域具有较好的应用前景^[23]。许多学者^[24-26]曾将 TVGM 模型运用在不同地区,其中考虑二水源的 TVGM 产流形式为

$$R(t) = G_s(t)P(t) + G_g(t)S_{API}(t) = g_1 S_{API}(t)^{g_2} I(t)^{g_3} P(t) + g_4 S_{API}(t) \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 为总产流量, mm; $P(t)$ 为降雨量, mm; $G_s(t)$ 、 $G_g(t)$ 分别为地表产流量时变增益因子、地下产流量时变增益因子; $I(t)$ 为归一化的雨强; g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 为产流系数; $S_{API}(t)$ 为前期影响雨量,即土壤湿度,通常可用单一水库的线性系统模拟,公式为

$$S_{API}(t) = \sum_{i=1}^N U_0(i) \times P(t-i+1) \quad (3)$$

$$U_0(i) = \frac{\exp(-\frac{i}{k_e})}{k_e} \quad (4)$$

式中: k_e 为滞时参数; N 为时段 t 和系统记忆长度 T_{ml} 中的较小者。系统记忆长度通常与流域形状、面积、坡度等因素有关,可通过经验分析或模型试验确定。滞时参数与流域蒸散发和土壤特性有关,一般取系统记忆长度 T_{ml} 的某个倍数。

受人类活动影响,城市地区不同类型下垫面的产流过程存在较大差异,不透水区的径流系数远大于透水区^[27]。为提高 TVGM 模型对不同类型下垫面产流过程的系统识别性能,需要依据不同下垫面的产流特性进行分类处理。参考城市水文单元的思想^[28-29],将城市下垫面分为透水区和不透水区两大类,分别进行产流计算。其中:透水区主要包括耕地、绿地和水体,其产流特性为降雨折损大,下渗性较好,增益因子受土壤含水量变化的影响显著;不透水区主要包括城乡建设用地中的广场、道路、屋顶等硬化面,其产流特性为降雨折损小,基本不存在下渗。依据 TVGM 模型产流原理,各类下垫面的产流计算过程见图 3。

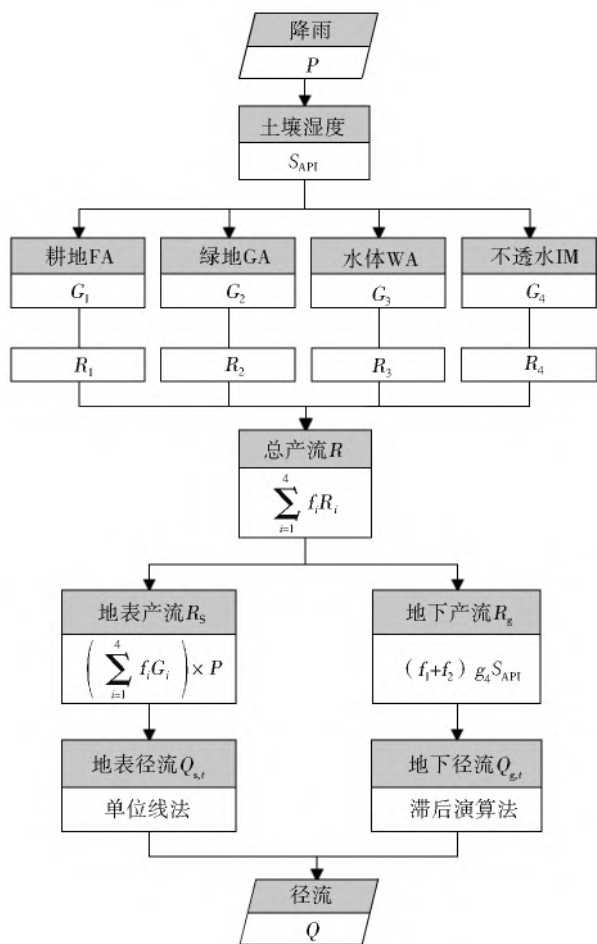


图 3 模型流程

Fig. 3 Model flow chart

(1) 透水区(pervious area)

耕地(farm area)是农业开发活动的产物,拦蓄和耗用了地面径流,增加地表水的下渗机会,从而使洪水过程平缓化^[30],可形成地表径流和地下径流。其增益因子和产流量可表达为

$$G_1(t) = g_{1,F} \left(\frac{S_{API}(t)}{S_{API_{m,F}}} \right)^{g_{2,F}} I(t)^{g_{3,F}} \quad (5)$$

$$R_1(t) = G_1(t)P(t) + g_4 S_{API}(t) \quad (6)$$

绿地(green area)可通过天然植被的拦截作用、蒸腾作用调蓄地表产流和洪水退水过程^[31],是水循环中降雨初损的主要来源。类似地,其增益因子和产流量可表达为

$$G_2(t) = g_{1,G} \left(\frac{S_{API}(t)}{S_{API_{m,G}}} \right)^{g_{2,G}} I(t)^{g_{3,G}} \quad (7)$$

$$R_2(t) = G_2(t)P(t) + g_4 S_{API}(t) \quad (8)$$

水体(water area)包括城区内河湖、水库、塘洼等,具有一定的调蓄能力。在前期影响雨量未达到蓄水容量前基本不产流,超过蓄水容量后可视为饱和产流模式,即

$$\begin{cases} W(t) = 0 & S_{API}(t) < S_{API_{m,W}} \\ W(t) = S_{API_{m,W}} & S_{API}(t) \geq S_{API_{m,W}} \end{cases} \quad (9)$$

$$G_3(t) = g_{1,W} \left(\frac{W(t)}{S_{API_{m,W}}} \right)^{g_{2,W}} I(t)^{g_{3,W}} \quad (10)$$

$$R_3(t) = G_3(t)P(t) \quad (11)$$

(2) 不透水区(impervious area)

不透水区基本不具备渗透性和蓄水能力,使用降雨折减系数法,公式为

$$G_4(t) = g_{IM} \quad (12)$$

$$R_4(t) = G_4(t)P(t) \quad (13)$$

式中: $g_{1,F}$ 、 $g_{2,F}$ 、 $g_{3,F}$ 为耕地产流系数; $g_{1,G}$ 、 $g_{2,G}$ 、 $g_{3,G}$ 为绿地产流系数; $g_{1,W}$ 、 $g_{2,W}$ 、 $g_{3,W}$ 为水体产流系数; g_{IM} 为不透水面降雨折减系数; g_4 为地下产水系数。 $S_{API_{m,F}}$ 、 $S_{API_{m,G}}$ 、 $S_{API_{m,W}}$ 分别为耕地、绿地、水体的等效蓄水容量,取最大前期影响雨量的某个小于 1 的倍数。

综上所述,总产流量可表达为

$$R = \sum_{i=1}^4 f_i R_i \quad (14)$$

式中: f 为下垫面的面积比重。地表产流量 R_s 和地下产流量 R_g 可表达为

$$R_s = \left(\sum_{i=1}^4 f_i G_i \right) \times P \quad (15)$$

$$R_g = (f_1 + f_2) \times g_4 \times S_{API} \quad (16)$$

汇流部分,地表径流使用瞬时单位线法,公式为

$$Q_{s,t} = \int_0^t R_s(t-\tau)U(\tau) d\tau \quad (17)$$

$$u(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k} \right)^{n-1} \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (18)$$

地下径流使用线性水库地下汇流计算公式

$$Q_{g,t} = (1 - P_{kkg}) \times R_{g,t} + P_{kkg} \times Q_{g,t-1} \quad (19)$$

式(17)至(19)中: U 为单位线 $u(t)$ 转换后得到的响应函数; n 为线性水库个数; k 为线性水库的蓄泄系数; P_{kkg} 为地下水滞留系数。

3 结果分析

3.1 九江市中心城区下垫面变化特征

图 4 给出了九江市中心城区 1987—2018 年土地利用现状,研究时段内土地利用动态度汇总见表 2。经统计 2006、2009 年城乡建设用地占比分别为 5.10%和 5.71%,据 LUCC 产品分析,2005 年、2010 年的建设用地占比分别是 5.79%和 6.31%,与本文得到的结果相近。整体看来,1987—2018 年九江市中心城区建设用地持续扩张,从 8.23 km²(0.62%)上升到 189.93 km²(14.24%)。其中:1987—1995 年为高速扩张阶段,年均增率约 30.0%;2000—2003 年、2009—2012 年、2012—2015 年 3 个时段增长较快,土地利用动态度分别为 12.6%、19.4%和 12.9%;2015 年以来,建设用地占地面积的增速有所减缓,但仍保持在 4%以上。

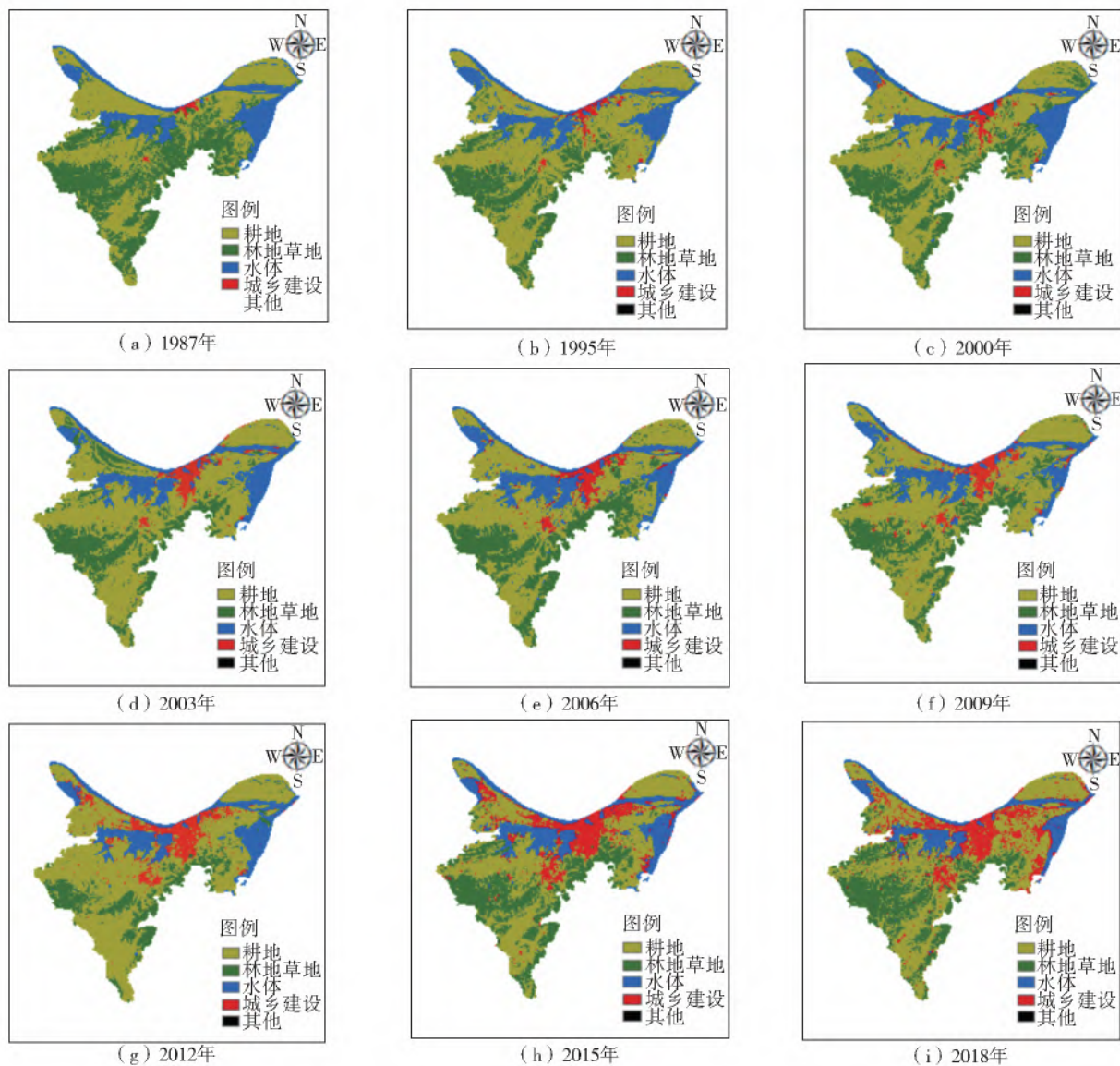


图4 1987—2018年九江市中心城区土地利用现状

Fig. 4 Land use in central area of Jiujiang city from 1987 to 2018

表2 不同时段九江市中心城区土地利用动态统计

Tab. 2 Statistics of land use dynamics in the centre of Jiujiang City in the different time interval

用地类型	1987—1995年	1996—2000年	2001—2003年	2004—2006年	2007—2009年	2010—2012年	2013—2015年	2016—2018年	
耕地	$\Delta A/km^2$	158.48	-31.28	33.10	-63.12	59.58	48.54	-180.45	17.52
	$K_n/\%$	3.3	-0.8	1.5	-2.8	2.8	2.1	-7.5	0.9
林地 草地	$\Delta A/km^2$	-203.63	36.35	-47.07	29.49	-43.94	-86.41	131.16	8.43
	$K_n/\%$	-5.0	2.4	-4.6	3.4	-4.6	-10.4	22.8	0.9
水体	$\Delta A/km^2$	25.37	-19.10	-1.85	22.80	-23.81	-6.27	3.13	-48.74
	$K_n/\%$	1.5	-1.6	-0.3	3.4	-3.3	-0.9	0.5	-7.5
城乡 建设	$\Delta A/km^2$	19.77	13.36	15.67	11.04	8.09	44.37	46.60	22.79
	$K_n/\%$	30.0	9.5	12.6	6.5	4.0	19.4	12.9	4.5
其他	$\Delta A/km^2$	0	0.68	0.15	-0.20	0.08	-0.23	-0.45	0
	$K_n/\%$	0.1	16.5	3.3	-4.1	1.8	-5.1	-11.6	-0.1

耕地是九江市最主要的用地类型,主要分布在柴桑区、德安县、永修县等地势低洼区及河湖沿岸地

区,中心城区的耕地占比为40%~60%。2012年以前,中心城区耕地面积从601.42 km²波动式增长到

806.72 km²,其中:1987—1995 年增长了 158.48 km²;2012—2015 年,随着经济转型和城乡建设的加快^[32],耕地面积减少到 626.27 km²。林地和草地的面积占比仅次于耕地,一般认为,林地的蒸腾量较其它植被更大,且冠层与枯落物的截流作用增大了降雨初损值是减少流域产流量的主要原因^[30]。1987—1995 年,不断增加的农业活动强度加剧了毁林造田与草地开垦等行为,中心城区林地草地面积减少了 40%;至 2012 年,林草面积降至 191.50 km²,仅占总面积的 14.5%;2012—2018 年情况有所改善,林草面积占比回升到 24.9%。水体在城市下垫

面的雨洪调蓄过程中发挥着重要作用。九江市内湖内河较多,中心城区水体占比 12%~20%,除了 2018 年外,其他年份年际变幅不大。2006 年以来水体呈萎缩趋势,以八里湖为例,城市建设使得大面积湖体被填占^[33],2015—2018 年水体面积从 217.02 km²减少为 168.28 km²。

为适应模型计算的需求,进一步提取了城乡建设中的不透水面,同时将透水面部分和林地草地归为绿地,将其他用地并入耕地,分别得到透水区(耕地、绿地、水体)和不透水区(建设用地中的不透水面)。研究区土地利用变化见表 3。

表 3 1987—2018 年中心城区(浔阳区、濂溪区、柴桑区)土地利用变化

Tab. 3 Land use changes in central urban area (Xunyang, Lianxi, Chaisang) from 1987 to 2018

		单位: km ²								
土地类型		1987 年	1995 年	2000 年	2003 年	2006 年	2009 年	2012 年	2015 年	2018 年
透水区	耕地	601.42	759.90	728.62	761.72	698.60	758.17	806.72	626.27	643.79
	绿地	509.19	307.41	350.49	316.39	352.22	307.76	236.88	370.86	380.67
	水体	216.76	242.13	223.02	221.17	243.97	220.16	213.89	217.02	168.28
不透水区		6.56	24.49	31.79	34.64	39.14	47.84	76.44	119.77	141.19

3.2 九江市中心城区径流变化特征

由于研究区流量监测体系尚未健全,缺少出水口流量数据,无法按照传统水文模型的思路进行参数率定和检验。参考济南主城区的相关研究,利用公布的水资源总量对模型进行验证^[18]。根据 2009—2015 年九江市水资源公报中市辖区的水资源总量^[20],用面积折算为径流深,并结合年降雨量得到平均径流系数作为模型参数率定和检验的标准值。根据九江市水资源公报,市辖区占地面积 521 km²,2009、2012 和 2015 年的降雨量分别为 1 224.7、1 698.1 和 2 024.2 mm,经过计算分析,研究区的平均径流系数标准值分别为 0.520、0.547 和 0.530。将 2012 和 2015 两年划分为率定期,2009 年为检验期,采用单纯多边形遗传算法(SCE-UA)对模型部分产流参数进行率定,包括各类下垫面的饱和产流系数、土湿影响指数、雨强影响指数等,并采用平均径流系数相对误差的均值作为目标函数,率定结果见表 4。计算得到率定期的径流系数分别为 0.520 和 0.529,检验期的径流系数为 0.562。径流系数计算值和标准值基本吻合,认为城市时变增益非线性模型的率定结果通过验证。

根据率定好的城市时变增益非线性模型,以 1987—2018 年实测降雨数据作为模型输入,计算得到不同年份的径流系数,见图 5。可以看出,在不透水面比例逐年上升的情况下,径流系数呈现增加趋

势,但这种增加趋势存在一些波动,例如 1995—2000 年,由于绿地占比增大,径流系数不增反减。李丽娟等^[34]在研究陕西大理河流域的 LUCC 水文效应时指出,林地和建设用地面积持续增加,而流域年径流和汛期流量减少,这与本文得到的结论基本一致;朱文彬等^[35]对厦门市城市绿地的径流削减作用进行了研究,认为城市绿地能有效缓解建设用地扩张带来的内涝问题。究其原因,尽管不透水面比例是影响径流系数的主要因素之一,城市地区产流过程还受到其他下垫面类型的变化及雨强、雨量等气象条件的综合影响,这也反映了城市地区产流机制具有较强的非线性和复杂性。

表 4 产流参数率定结果

Tab. 4 Calibration results of abortion parameters

参数	率定结果	取值范围
耕地饱和产流系数 $g_{1,F}$	0.65	0~1.0
耕地土湿影响指数 $g_{2,F}$	0.32	0~1.0
耕地雨强影响指数 $g_{3,F}$	0.32	0~1.0
绿地饱和产流系数 $g_{1,G}$	0.60	0~1.0
绿地土湿影响指数 $g_{2,G}$	0.59	0~1.0
绿地雨强影响指数 $g_{3,G}$	0.42	0~1.0
水体饱和产流系数 $g_{1,W}$	0.66	0~1.0
水体土湿影响指数 $g_{2,W}$	0.39	0~1.0
水体雨强影响指数 $g_{3,W}$	0.25	0~1.0
不透水面降雨折减系数 g_{IM}	0.93	0.8~1.0
地下水产流系数 g_4	0.02	0~1.0

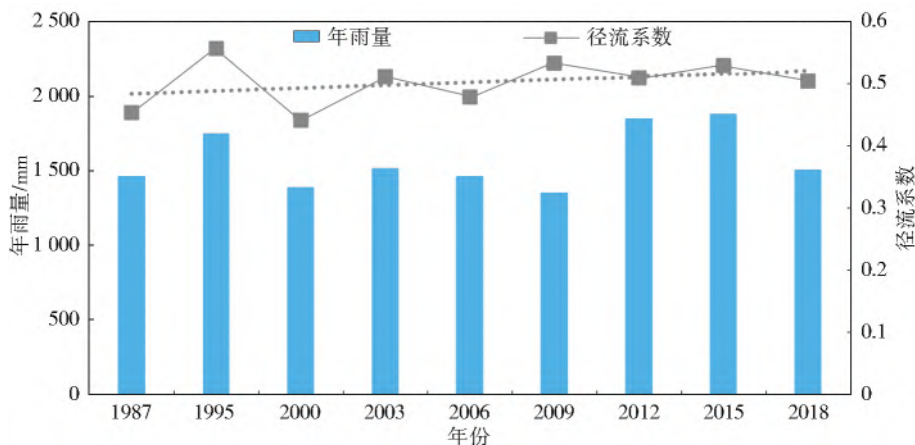


图5 1987—2018年研究区年降雨量和径流系数

Fig. 5 Relationship between runoff coefficient and average annual rainfall in the study area from 1987 to 2018

3.3 九江市中心城区径流模拟分析

选取研究区时间间隔为 5 min 的典型年降雨过程作为模型输入,模拟计算不同年份中心城区的年产流量,并摘取典型暴雨过程(图 2(b))计算径流过程,综合分析径流与不透水面积之间的响应关系。

3.3.1 典型年径流量模拟

在同一气象条件下,1987—2018 年九江市中心城区的径流量变化特征与不透水面积的变化

特征高度吻合,见图 6。中心城区不透水面比例从 1987 年的 0.49% 增长到 2018 年的 10.58%,径流系数从 0.31 增至 0.38,径流深从 444.87 mm 增至 557.76 mm。综合多年数据来看,2006 年以后不透水面比例和径流系数增加的速度更快。1987—2003 年不透水面比例从 0.49% 增加到 2.60%,径流系数从 0.31 增加到 0.33;2003 至 2006 年径流系数略微下降;2006—2018 年不透水面比例从 2.93% 增加到 10.58%,径流系数从 0.32 增加到 0.38。

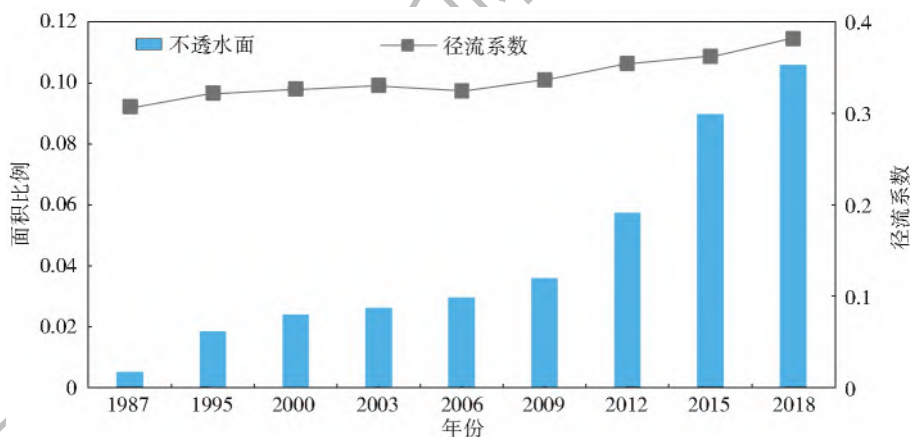


图6 1987—2018年研究区典型年降雨径流系数与不透水面比例变化

Fig. 6 Relationship between runoff coefficient and impervious area ratio in the study area from 1987 to 2018

3.3.2 典型年场次径流过程模拟

由于降雨时程分布不均匀和地表汇流渠道较为复杂,城市区的降雨径流过程往往表现出“陡峭”“尖瘦”的特征^[36-37]。从 1987 年至 2018 年,城市化前后中心城区不透水面比值增加了约 10%,洪峰流量从 1 504.64 m³/s 增加到 1 649.77 m³/s。随着不透水面积的增大,洪水过程线愈发陡峭,退水过程显著减缓,见图 7。由于该场暴雨前期土壤较干燥,透水面土壤不易达到饱和,产汇流过程受下垫面组合变化的影响相对较大,洪水过程线年际变化相对明显。

值得关注的是,2006 年和 2015 年部分时段的

流量值出现回落,其中洪峰流量较前一年份分别减少了 29.81 和 17.44 m³/s。结合两年土地利用现状发现,尽管不透水面积逐年扩张,两年的绿地和水体总面积有所增大,其中 2003—2006 年增加了 10.91%,2012—2015 年增加了 30.42%,可以在降雨前期储蓄更多的雨水,提高下垫面“弹性”。然而,在研究时段内,水体面积显现出萎缩态势。面对汛期暴雨,若保持相同的排水条件,较短时间内须排放更多的水。为避免对下游区域造成额外的防洪压力,加强排水系统优化及河湖修复工程建设具有非凡的意义。

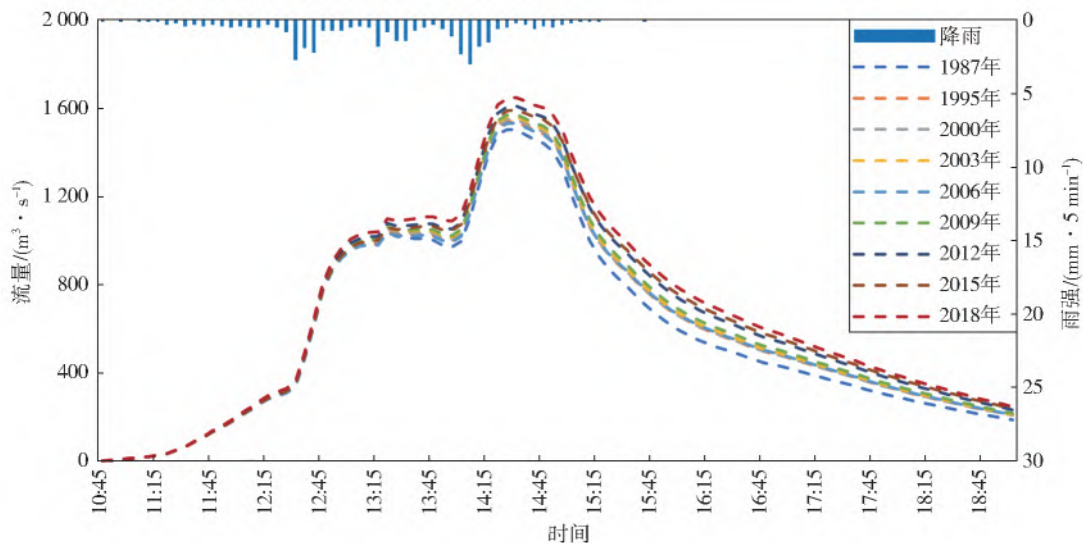


图 7 研究区典型场次降雨径流过程

Fig. 7 Typical rainfall-runoff process in the study area

4 结论

以九江市中心城区为研究区域,建立了考虑不同下垫面产流特性的城市时变增益非线性模型,在解译 LUCC 数据的基础上开展多年径流量的演变趋势分析、年产流量及场次径流过程的模拟计算等工作,主要结论如下:

(1)研究区用地类型整体呈现出由透水面向不透水面转变的趋势。受经济转型和开发政策的影响,耕地、林地草地波动式变化,水体自 2006 年以来呈萎缩趋势,中心城区建设用地面积逐年增长。

(2)研究区径流系数受下垫面变化及降雨过程的综合影响,不透水面比例是主导因素。在同一气象条件下,1987—2018 年,研究区不透水面比例从 0.49% 增加到 10.58%,径流系数从 0.31 增至 0.38。

(3)在典型暴雨条件下,随着不透水面积的增大,1987—2018 年洪峰流量增加了 10%,洪水过程线愈发陡峭,退水过程显著减缓。绿地和水体可在一定程度上缓解城市化进程带来的径流放大效应。

流量监测数据的缺失是本文模型不确定性的来源之一,也给建设用地密集分布的江、河、湖沿岸地区的防汛工作带来了隐患。此外,本文仅考虑了下垫面比例变化对研究区产汇流过程的影响,可以在今后的研究中增加下垫面空间分布特征的讨论,为研究区防洪建设提供更多的参考。

参考文献(References):

[1] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1438-1448. DOI: 10.1016/j.jen-

vman. 2011. 01. 018.

- [2] 蓝裕平,张燕. 人口增长、城市化进程与中国经济发展[J]. 国际融资, 2020(4): 31-37. (LAN Y P, ZHANG Y. Population growth, urbanization process and China's economic development [J]. International Financing, 2020(4): 31-37. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GJRZ. 0. 2020-04-008.
- [3] 夏军,张永勇,张印,等. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 1-5, 27. (XIA J, ZHANG Y Y, ZHANG Y, et al. Research and prospects of water problems in construction of sponge cities in China[J]. Yangtze River, 2017, 48(20): 1-5, 27. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.20.001.
- [4] 汪晖. 武汉城市内涝问题研究及探讨[J]. 给水排水, 2017, 53(S1): 117-119. (WANG H. Research and discussion on waterlogging in Wuhan City[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(S1): 117-119. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2017.0449.
- [5] 徐宗学,赵刚,程涛. “城市看海”: 城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(5): 54-55, 57. (XU Z X, ZHAO G, CHENG T. "Sea views in city": Challenges and opportunities faced by urban hydrology [J]. China Flood & Drought Management, 2016, 26(5): 54-55, 57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-9264.2016.05.022.
- [6] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.001.

- [7] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2017, 60(4): 652-658. DOI: 10.1007/s11430-016-0111-8.
- [8] GONG P, LI X C, WANG J, et al. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236, 111510. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111510.
- [9] SCHIRME M, LESCHIK S, MUSOLFF A. Current research in urban hydrogeology: A review [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51(51): 280-291. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.06.015.
- [10] 唐婷, 冉圣宏, 谈明洪. 京津唐地区城市扩张对地表蒸散发的影响 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 233-240. (TANG T, RAN S H, TAN M H. The impact of urban expansion on surface evapotranspiration in the Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 233-240. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00233.
- [11] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO G, SHI R, PANG B, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment; Case study for Liangshui River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20160507.
- [12] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.020.
- [13] 刘慧娟, 卫伟, 王金满, 等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验 [J]. *资源科学*, 2015, 37(11): 2219-2227. (LIU H J, WEI W, WANG J M, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process [J]. *Resources Science*, 2015, 37(11): 2219-2227. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZRZY. 0. 2015-11-014.
- [14] 夏军, 乔云峰, 宋献方, 等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析 [J]. *资源科学*, 2007(1): 70-76. (XIA J, QIAO Y F, SONG X F, et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou catchment [J]. *Resources Science*, 2007(1): 70-76. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2007.01.011.
- [15] 王浩, 卢善龙, 吴炳方, 等. 不透水面遥感提取及应用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(3): 327-336. (WANG H, LU S L, WU B F, et al. Advances in remote sensing of impervious surfaces extraction and its applications [J]. *Advance in Earth Science*, 2013, 28(3): 327-336. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2013.03.0327.
- [16] 王国玲, 李艳红, 苏志珠, 等. 2008—2013年晋北地区土地利用/覆被变化研究 [J]. *农学学报*, 2019, 9(5): 38-43. (WANG G L, LI Y H, SU Z Z, et al. Land use and land cover change in northern Shanxi: 2008-2013 [J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(5): 38-43. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; XKKJ. 0. 2019-05-009.
- [17] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究: 以海河流域为例 [J]. *水力发电学报*, 2009, 28(4): 124-129. (OU C P, XIA J, WANG Z G, et al. LUCC influence on SWAT hydrological simulation: A case study of Haihe river basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(4): 124-129. (in Chinese)) DOI: http://192.168.22.105/handle/311030/5694.
- [18] 郭禹含, 王中根, 姜爱华, 等. 济南主城区不透水地表分布分析及其水文效应 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 87-96. (GUO Y H, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of the impervious land surface pattern distribution and its hydrological effects in the main urban area of Jinan [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology (Chinese and English)*, 2020, 18(4): 87-96. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0075.
- [19] SHAO Z F, FU H Y, LI D R, et al. Remote sensing monitoring of multi-scale watersheds impermeability for urban hydrological evaluation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 23211338. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111338.
- [20] 吕兰军. 九江城市水文实践与思考 [J]. *江西水利科技*, 2020, 46(1): 74-78. (LYU L J. Practice and reflection of urban hydrology in Jiujiang [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2020, 46(1): 74-78. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2020.01-13.
- [21] 吕兰军. 新时代提升水文服务能力的几点思考: 以江西省九江市为例 [J]. *中国水利*, 2019(5): 38-40. (LYU L J. Reflections on enhancement of hydrological services in the new age: A case study of Jiujiang City in Jiangxi Province [J]. *China Water Resources*, 2019(5): 38-40. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2019.05.015.
- [22] 刘军. 湖南土地利用动态变化及驱动力分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S3): 182-185. (LIU J. Hunan land use change and driving force effect analysis [J]. *China Population, Resources and Environ-*

- ment, 2014, 24 (S3): 182-185. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;ZGRZ. 0. 2014-S3-045.
- [23] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (XIA J. Hydrological nonlinear system theory and method[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))
- [24] 王福东, 蔡涛, 孙玉华, 等. 改进的非线性时变增益模型在北方旱区中小河流洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2): 59-63. (WANG F D, CAI T, SUN Y H, et al. Application of improved nonlinear time-varying gain model in flood forecasting of small rivers in the northern arid region of China[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 59-63. (in Chinese))
- [25] 万蕙, 夏军, 张利平, 等. 淮河流域水文非线性多水源时变增益模型研究与应用[J]. 水文, 2015, 35(3): 14-19. (WAN H, XIA J, ZHANG L P, et al. Multi-source time variant gain model and its application in Huaihe River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(3): 14-19. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2015. 03. 003.
- [26] 马晓明. 基于多水源 TVGM 模型的下垫面变化对流域洪水的影响[J]. 水利技术监督, 2019(2): 75-78, 184. (MA X M. Impact of underlay surface variation on watershed flood in TVGM model of multiple water sources [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2019(2): 75-78, 184. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-1305. 2019. 02. 025.
- [27] 要志鑫, 孟庆岩, 孙震辉, 等. 不透水面与地表径流时空相关性研究: 以杭州市主城区为例[J]. 遥感学报, 2020, 24(2): 182-198. (YAO Z X, MENG Q Y, SUN Z H, et al. Temporal and spatial correlation between impervious surface and surface runoff: A case study of the main urban area of Hangzhou City[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(2): 182-198. (in Chinese)) DOI: 10. 11834/jrs. 20208248.
- [28] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33-42. (MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2017. 05. 006.
- [29] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61. (XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city: Review on urban hydrology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20181056.
- [30] 董国强, 杨志勇, 于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 111-117, 126. (DONG G Q, YANG Z Y, YU Y D. Research progress on effects of variations of underlying surface on runoff yield and concentration in the river basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 111-117, 126. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/ SP. J. 1201. 2013. 03111.
- [31] 王平章, 张宝林. 清江上游流域森林植被变化对水文特性的影响研究[J]. 中国水利, 2016(17): 42-44. (WANG P Z, ZHANG B L. Change of forest cover and its impact on hydrological characteristics in upstream of Qingjiang River [J]. China Water Resources, 2016(17): 42-44. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2016. 17. 017.
- [32] 卓成刚, 刘秀慧. 江西省土地利用变化特征及驱动力分析[J]. 中国国土资源经济, 2016, 29(11): 68-72, 33. (ZHUO C G, LIU X H. Analysis on land use change and its driving forces in Jiangxi Province[J]. Natural Resource Economics of China, 2016, 29(11): 68-72, 33. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-6995. 2016. 11. 017.
- [33] 张家森. 以中心城区湖泊水治理为中心稳步推进九江市水生态文明建设[J]. 水利发展研究, 2020, 20(2): 72-74. (ZHANG J S. Steadily promote the construction of aquatic ecological civilization in Jiujiang City with the center of lake water treatment in the central city [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(2): 72-74. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2020. 02. 016.
- [34] 李丽娟, 姜德娟, 杨俊伟, 等. 陕西大理河流域土地利用/覆被变化的水文效应[J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1233-1243. (LI L J, JIANG D J, YANG J W, et al. Study on hydrological response to land use and land cover change in Dali River basin, Shaanxi Province [J]. Geographical Research, 2010, 29(7): 1233-1243. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/yj2010070009.
- [35] 朱文彬, 孙倩莹, 李付杰, 等. 厦门市城市绿地雨洪减排效应评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(01): 74-84. (ZHU W B, SUN Q Y, LI F J, et al. Assessment of the effect of urban green space landscape on reduction of storm water runoff in Xiamen City[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 74-84. (in Chinese)) DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2018. 09. 01.
- [36] 房亚军, 李其军, 潘兴瑶, 等. 城市流域极端降雨条件下的产汇流规律: 以北京市凉水河流域为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 111-116. (FANG Y J, LI Q J, PAN X Y, et al. Contrastive analysis of typical rainfall-runoff process in urban watershed: Taking Liangshui River basin in Beijing as an example[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(1): 111-116. (in

Chinese)) DOI:10.15983/j.cnki.jsnu.2018.01.413.
 [37] 赵彦军,徐宗学,赵刚,等.城市化对济南小清河流域
 产汇流的影响研究[J].水力发电学报,2019,38(10):
 35-46.(ZHAO Y J,XU Z X,ZHAO G,et al. Impact

of urbanization on regional rainfall-runoff processes in
 Xiaoqing River basin,Jinan[J]. Journal of Hydroelec-
 tric Engineering, 2019, 38(10): 35-46. (in Chinese)
 DOI:10.11660/slfdbx.20191004.

Changes of underlying surface and its runoff response in the central city of Jiujiang

SUN Lanxin^{1,2}, XIA Jun^{1,3}, SHE Dunxian^{1,2}, HU Chen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China)

Abstract: The hardening of the urban underlying surface and its hydrological effects have aroused widespread concern in the international community. The communication channels between the water sources are hindered or even cut off by the impervious surface, changing the natural hydrological process. Exploring the impact mechanism of urban underlying surface changes on runoff processes is of critical significance to regional flood control and water safety construction. The central urban area of Jiujiang were focused on. The time variant gain model was improved to analyze the changes of underlying surface and the evolution trend of multi-year runoff. We aimed to quantify the response relationship between runoff process and impervious surface expansion was aimed to qualified, and support for understanding the hydrological effects of impervious surface expansion was provided in typical cities in the middle reaches of the Yangtze River.

ENVI and ArcGIS software was employed to realize the interpretation and classification of remote sensing images, and the variation of land use dynamics was analyzed in the study area from 1987 to 2018. In view of the difference in runoff features of underlying surfaces based on the time variant gain model, an improvement on the structure of the original model was made by dividing underlying surfaces into permeable area and impervious area. The former included arable land, green land, and water bodies, while the latter referred to the impervious surfaces in construction land. The urban time variant gain model was established to calculate the runoff coefficient over the years and the runoff process of a typical year.

From 1987 to 2018, the main features of underlying changes in the studying area are listed as follows: (1) The construction land expanded from 8.23 km² to 189.93 km², with the fastest expansion rate in the period from 2009 to 2012. (2) A fluctuation occurred in the change of arable land, woodland and grassland, which occupied a large percentage of the total area. Before 2012, the area of arable land increased from 601.42 km² to 806.72 km², and the proportion of woodland and grassland decreased to 14.5%. From 2012 to 2018, the area of arable land has declined while the proportion of woodland and grassland increased to 24.9%. (3) The water body has shown a shrinking trend since 2006, and decreased from 217.02 km² to 168.28 km² from 2015 to 2018.

Model calculations based on rainfall data from meteorological stations shows some fluctuations in the increasing trend of the runoff coefficient under the circumstance of impervious area expansion year by year. From 1995 to 2000, the increase in the proportion of green space caused the runoff coefficient to decrease instead. This finding revealed that runoff generation process in the study area is influenced by the changes of various underlying surface types and meteorological conditions. Under the same meteorological conditions, a high consistency existed between the change characteristics of runoff and impervious surface ratio over the years. The runoff coefficient ascended from 0.31 to 0.38, and the runoff depth increased from 444.87 mm to 557.76 mm, respectively. In a typical rainstorm event, the peak flow has increased from 1 504.64 m³/s to 1 649.77 m³/s from 1987 to 2018, while the flow curve dropped in some part of 2006 and 2015, which could be attributed to the increase of green land and water bodies that acted as rainwater saver in the early rainy period.

Conclusions (1) The land use in the study area shows a transforming trend from pervious to impervious area. There's a fluctuation in the area of arable land, woodland and grassland and a shrinking trend in the water body. Especially, the area of construction land has been increasing year by year. (2) The influence factors of runoff coefficient is a combination of the underlying surface changes and the rainfall process, while the impervious surface ratio is dominant in the study area. Under the same meteorological conditions, the proportion of impervious area is increased from 0.49% to 10.58%, and the runoff coefficient is ascended from 0.31 to 0.38 from 1987 to 2018 in the study area. (3) Under a typical rainstorm event, the peak flow is increased by 10%, the flood process line became steeper, and the recession process was significantly slowed down from 1987 to 2018. Green land and water bodies could alleviate the amplification effect of runoff brought about by the urbanization process to a certain extent.

Key words: runoff change; urbanization; time variant gain model; underlying surface; LUCC