

基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析

梅超^{1,2}, 石虹远^{1,3}, 李瑞栋⁴, 李玉龙³, 刘家宏^{1,2}, 栾清华³, 王浩^{1,2}, 王佳^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038; 3. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038;
4. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为解析降雨径流过程对不透水面空间分布的响应关系,构造了一个3 km×3 km的假想试验区,面向试验区域构建了包含6个不透水率的36种不透水面空间分布,并建立相应的数值试验模型,模拟了重现期分别为2、5、10、20、50、100 a共6种不同重现期短历时设计降雨下的降雨径流过程,基于模拟结果对不同不透水面空间分布情景下的降雨径流过程进行了分析。结果表明:在同一不透水率下,不同不透水面空间分布的径流系数差异相对较小,不透水面空间分布对径流特征的影响主要体现在径流峰值和峰现时间上;在同一降雨条件下,不透水率变化是径流过程变化的主导因素,径流系数与不透水率呈线性相关关系,随着不透水率的增加,径流过程线逐渐由“矮胖”变得“尖瘦”。

关键词:不透水面;空间分布;不透水率;降雨径流;数值试验

中图分类号:TV121 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2024)01-0086-07

Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments//MEI Chao^{1,2}, SHI Hongyuan^{1,3}, LI Ruidong⁴, LI Yulong³, LIU Jiahong^{1,2}, LUAN Qinghua³, WANG Hao^{1,2}, WANG Jia^{1,2}(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to analyze the response of rainfall-runoff process to spatial distribution of impervious area, a hypothetical experiment area of 3 km×3 km was constructed, and 36 kinds of spatial distributions of impervious area with six impervious rates were set. Numerical experimental models were established to simulate the rainfall runoff process under six kinds of short-duration design rainfall with different return periods of 2, 5, 10, 20, 50, and 100 years. Based on the simulation results, the runoff processes under different rainfall conditions and spatial distributions of impervious area were analyzed. The results show that, under the same impervious rate, the difference of runoff coefficient under different spatial distributions of impervious area is generally small, and the spatial distribution of impervious area has a certain influence on the peak runoff and time to peak runoff. Under the same rainfall condition, the change in impervious rate is the dominant factor for the alternation of the runoff process, and there exists a linear relationship between the runoff coefficient and impervious rate. With the increasing of impervious rate, the runoff process line gradually changes from “low and fat” to “sharp and thin”.

Key words: impervious area; spatial distribution; impervious rate; rainfall runoff; numerical experiment

随着城市化快速推进,城市不透水面积显著增加,引发了强烈的城市水文效应,并成为城市内涝的重要诱发因素之一,受到广泛关注^[1-4]。在城市化水文效应研究中,以往总体上对城市化引起的不透水

基金项目:国家自然科学基金项目(52009139);国家重点研发计划项目(2021YFC30001404);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(WR110145B0012023,WR110145B0022022);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室资助项目(61010101221)
作者简介:梅超(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事城市水文与智慧水利研究。E-mail:meichao@iwhr.com
通信作者:刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liujh@iwhr.com

率变化及其水文效应研究较为深入^[5-6]。城市不透水面的类型多样、空间分布呈现“犬牙交错”的状态,透水面与不透水面的空间连接关系复杂^[7],仅用不透水率这一指标难以直接体现不透水面空间分布不同带来的影响,特别是在高密度城市区域中,透水面和透水面空间分布关系以及二者与排水系统的连接关系均对径流过程有一定影响,近年来,相关研究已开始关注这一问题^[8-10]。基于对不同不透水面空间分布下径流过程差异的认识,有效不透水面的概念被提出,Ebrahimian 等^[11]利用欧洲等地的降雨径流实测数据,提出了有效不透水面估算方法。对于不透水面空间分布对径流过程的影响,已有学者采用试验和模拟等多种方法开展了研究,Ferreira 等^[12]基于室内试验分析了不透水面上游型、下游型、规则型等多种分布方式对降雨径流过程的影响;任梅芳等^[13]结合试验和数值模拟,分析了不同不透水率下有效不透水型和无效不透水型不透水面空间分布对径流系数的影响;石树兰等^[14]在典型区域构建 SWMM (storm water management model) 模型,发现考虑不透水面的有效性后,模型精度得到提升;周宏等^[8]系统总结了城市有效不透水下垫面及其识别研究进展,并指出深入分析不同种类不透水面之间的关系及其对城市雨洪过程的影响是未来的研究重点。此外,在城市规划设计中,已有研究关注在控制性详细规划约束下考虑城市不透水面管控^[15]。

为进一步探讨不透水面空间分布对降雨径流过程的影响,本文基于数值试验开展不同降雨情景下降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析。基于数值试验结果,量化不透水面空间分布对径流系数、径流峰值、峰现时间等径流特征值和径流过程的影响,以期为进一步解析城市化区域降雨径流形成过程和管控城市不透水面提供参考。

1 数值试验方案

1.1 试验假设与模型构建

1.1.1 试验假设

为开展数值试验,构造一个 3 km×3 km 试验区域,如图 1 所示。将试验区域视为一个坡面,设置统一的坡度(α)为 1%。通过在试验区域中改变不透水面空间分布设置不同下垫面试验情景,开展设计降雨条件下的降雨径流过程模拟,基于模拟结果统计不同下垫面试验情景下径流过程和径流特征值,分析降雨径流过程对不透水面空间分布的响应。在数值试验中,假设试验区域是一个均匀连续的坡面,降雨落到坡面上后,经过下渗和汇流,沿坡面向下自由出流。

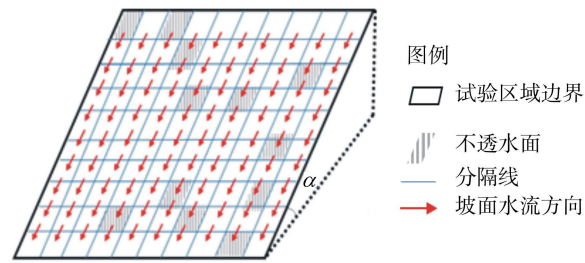


图 1 数值试验区域

Fig. 1 Numerical experiment area

1.1.2 模型构建

本文基于考虑下渗的二维水动力模型开展数值试验,采用二维浅水方程进行地表坡面汇流过程模拟,其控制方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} h \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} P_f \\ -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} + f_x \right) \\ -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} + f_y \right) \end{bmatrix}$$

式中: h 为水深; u, v 分别为水流沿 x, y 方向的平均速度; z_b 为底部高程; P_f 为考虑降雨、入渗等过程的净质量通量; f_x, f_y 分别为水流沿 x, y 方向的摩擦阻力,可通过曼宁公式计算; g 为重力加速度。

二维浅水方程采用基于非结构三角形网格单元离散的半隐式有限体积法求解^[16],在非结构化网格上,采用一维土壤水运动方程进行分层下渗计算^[17]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial z_b}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K + S \right) \quad (2)$$

式中: θ 为土壤体积含水量; S 为入渗或回归流等过程引起的土壤水源汇项; D 为土壤水扩散率; K 为土壤导水率。

按 Brooks-Corey 经验模型^[18]做如下参数化:

$$K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{2b+3} \quad (3)$$

$$D = K \psi \frac{b}{\theta - \theta_r} \quad (4)$$

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-b} \quad (5)$$

式中: K_s 为饱和土壤导水率; ψ 为土壤吸力; ψ_s 为进气值; θ_s 为饱和含水量; θ_r 为残余含水量; b 为拟合参数。

参考已有相关研究^[19-20],本文数值试验参数取值如下: $K_s=1\text{ mm/min}$, $\psi_s=0.5\text{ m}$, $\theta_s=0.66\text{ m}^3/\text{m}^3$, $\theta_r=0.04\text{ m}^3/\text{m}^3$, $b=2.33$ 。将 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 试验区域坡面离散为57.8万个三角形网格,试验区域下游出流边界设置为开边界,其余边界设置为闭边界,将构建的数值模型应用于不同情景的降雨径流过程模拟。

1.2 不透水面空间分布

基于 CityEngine 进行 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 假想城市区域的不透水面空间分布情景模拟,为便于设置不透水面空间分布情景,将试验区域划分为900个 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的方格,利用 CityEngine 中 CGA (computer generated architecture) 形状语法编译随机生成方法进行不透水面空间分布随机模拟,得到不透水率分别为8.3% (S1)、16.7% (S2)、33.3% (S3)、50.0% (S4)、66.7% (S5)、83.3% (S6)的不透水面空间分布情景,在每一个不透水率下,按照空间分布差异大的原则,随机生成6种不透水面空间分布,分别记为r1~r6,如图2所示。为了进一步量化表征不透水面的空间分布,采用景观形状指数、连通性指数、分离度指数3个景观格局指数表征不透水面空间分布特征^[21]。景观形状指数表征斑块总体形状复杂度,连通性指数表征斑块间的连通程度,分离度指数表

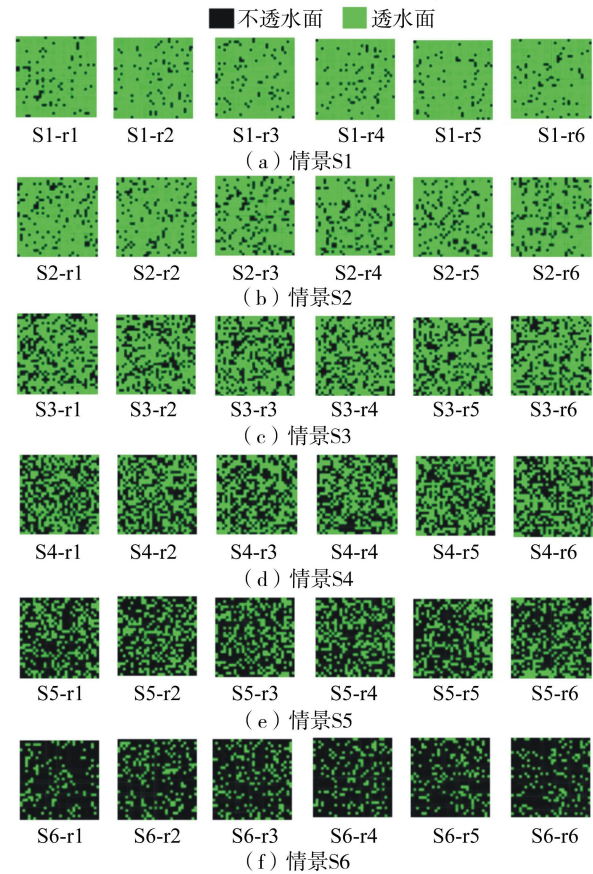


图2 不透水面空间分布

Fig.2 Spatial distribution of impervious areas

征斑块间的分散程度。采用 Fragstats 软件计算本试验设置的36个不透水面空间分布景观格局指数,景观形状指数、连通性指数、分离度指数的范围分别为4.7~12.0、0%~100%和1.0~75.3。

1.3 设计降雨情景

参考 DB11/T969—2016《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》中北京市暴雨强度公式进行设计降雨情景设置:

$$q=\frac{1602(1+1.037\lg P)}{(t+11.593)^{0.681}}\tag{6}$$

式中: q 为降雨强度; P 为重现期; t 为降雨历时。采用芝加哥雨型,取雨峰系数为0.4,降雨历时为120 min,生成重现期分别为2、5、10、20、50、100 a的设计降雨过程,降雨总量分别为54.7、71.9、84.9、97.9、115.1、128.2 mm,不同重现期设计降雨过程如图3所示。

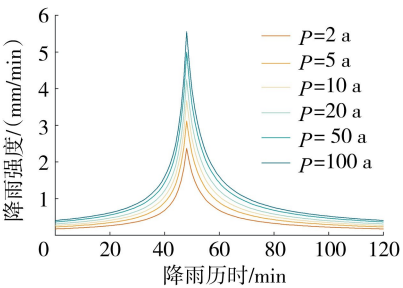


图3 不同重现期设计降雨过程

Fig.3 Design rainfall processes with different return periods

2 结果与分析

2.1 径流特征值对不透水面空间分布的响应分析

2.1.1 径流系数

不同降雨重现期下径流系数随不透水率变化的统计结果如图4所示。从图4可以看出,在不同降雨重现期下,径流系数均与不透水率呈显著线性相关关系,径流系数随着不透水率的增加而增加,表明在试验条件下,不透水率变化是降雨径流过程变化的主导因素。在同一不透水率和降雨重现期下,不同不透水面空间分布下的径流系数无明显差异。以33.3%不透水率为例,在100年一遇降雨条件下,6种不透水面空间分布中,径流系数最大差异为0.01,最大相对差值(两值之差与两值中最大值的比例)为5.2%,说明在本试验条件下,不透水面空间分布对径流系数的影响总体较小。

2.1.2 径流峰值

不同降雨重现期下径流峰值随不透水率变化的统计结果如图5所示。从图5可以看出,同一降雨重现期下,径流峰值随着不透水率增加而增加。在

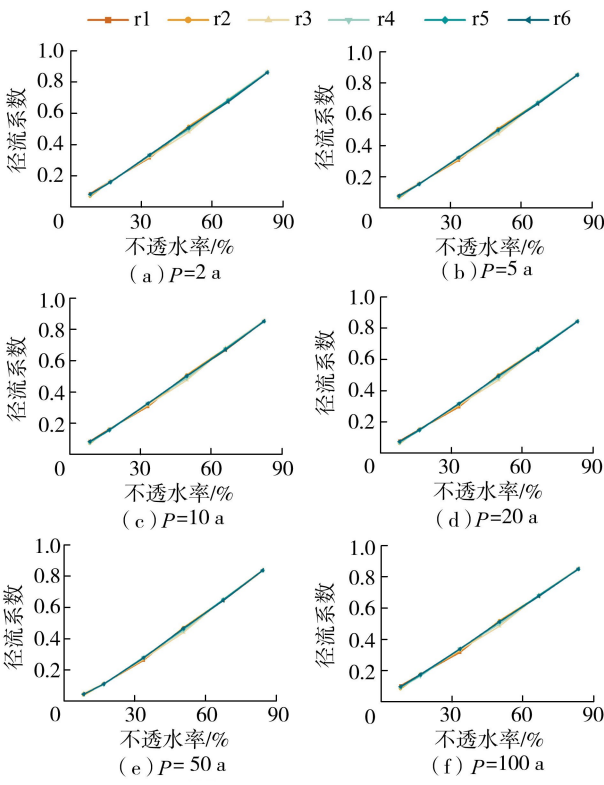


图4 不同降雨重现期下径流系数随不透水率的变化
Fig.4 Runoff coefficient varying with impervious rates under different rainfall return periods

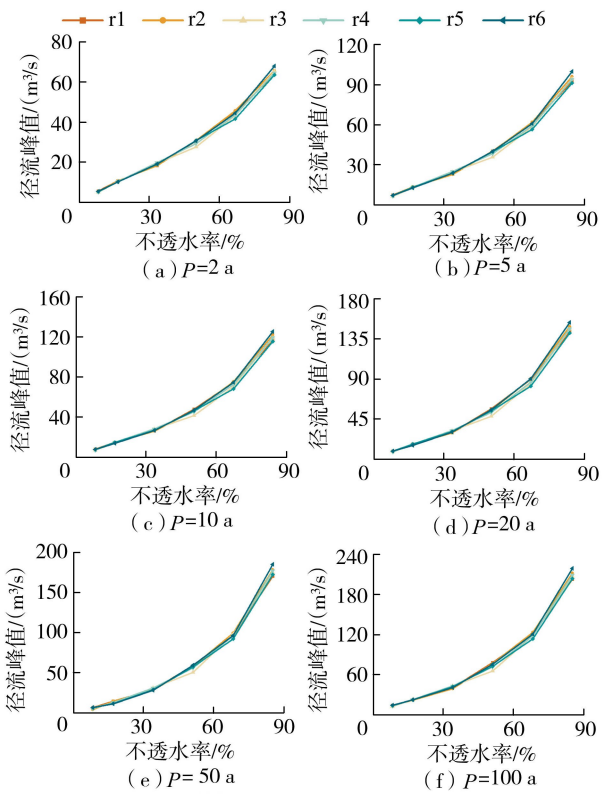


图5 不同降雨重现期下径流峰值随不透水率的变化
Fig.5 Peak runoff varying with impervious rate under different rainfall return periods

同一不透水率和降雨重现期下,不同不透水面空间分布下径流峰值表现出一定差异。在不同降雨重现

期下,不透水面空间分布不同导致的径流峰值差异平均值最大为 $15.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。以 50 年一遇降雨情景为例,不透水率为 8.3% 时,不同不透水面空间分布下径流峰值最大相对差值为 34.9%。在其余情景下,这一数值处于 4.1% ~ 22.2% 之间,表明不透水面空间分布对径流峰值有一定影响。

2.1.3 峰现时间

不同降雨重现期下径流峰现时间随不透水率变化的统计结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着不透水率增加,径流峰现时间减小,说明不透水率变化导致地表汇流加快,洪峰加速形成。在不同重现期下,总体上同一不透水率下、不同不透水面空间分布导致的峰现时间差异变化未呈现明显规律性。在 50 年一遇降雨情景下,不透水率为 16.7% 时,不同不透水面空间分布下的峰现时间差异较大,r2 和 r6 峰现时间差异最大,相对差值为 66.4%。

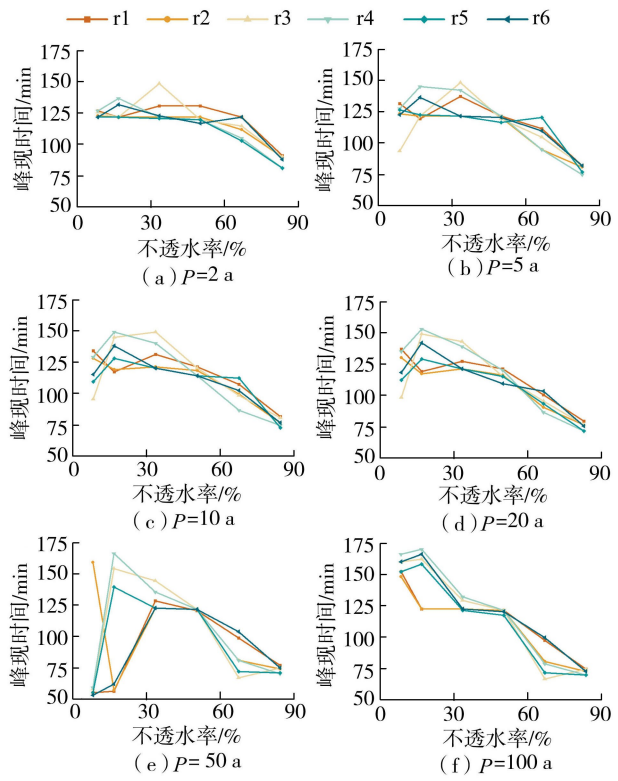


图6 不同降雨重现期下径流峰现时间随不透水率的变化
Fig.6 Time to peak runoff varying with impervious rate under different rainfall return periods

2.2 径流特征值与不透水面空间分布参数响应关系分析

从前述分析可知,在同一不透水率下,不透水面空间分布对径流系数的影响较小,但对径流峰值和峰现时间有一定影响,表明不透水面空间分布变化在一定程度上驱动了径流特征值的变化。不透水面空间分布参数会随着不透水率发生变化,以 50.0% 不透水率情景为例,绘制径流特征值与不透水面空

间分布参数折线图,进一步分析不透水面空间分布特征对径流特征值的影响,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在 50.0% 不透水率下,本文选取的 3 个径流特征值随 3 个不透水面空间分布参数的变化未呈现明显的规律,一方面可能与本文设置的不透水面空间分布数量较少有关,另一方面,降雨径流过程数值模拟的尺度效应和参数不确定性也可能是导致该结果的原因之一。

从水文学的角度,降雨径流过程是一个非线性过程^[22-24]。在本文设置的试验情景下,从降雨到坡面下游形成出口流量是一个非线性过程,在此过程中,复杂的不透水面空间分布可能造成降雨在上游形成的净雨向下游汇流过程中与下游区域净雨叠加后再入渗,这种再入渗反复叠加组合,形成一个更为复杂的非线性过程,这也是导致同一不透水率下不同不透水面空间分布的出口流量过程出现差异的重要原因之一。本文基于数值试验初步揭示了这一现象,但对于该现象背后的形成机制、科学机理还需要更深入的研究。未来研究中,需要进一步量化不透水面空间分布与径流特征值之间的关系,科学识别导致城市径流过程出现差异的主要不透水面空间分布参数,从而为城市水文模型构建和城市不透水面空间管控提供科学的参考依据^[25-26]。

2.3 不同情景下的径流过程对比分析

图 8 为不同降雨重现期和不透水率下的径流过程,从图中可以看出,在同一降雨情景下,不透水率增加使得产汇流过程发生显著变化,主要表现为峰值流量增加、峰现时间提前,径流过程线从“矮胖”变得“尖瘦”,即在不透水率较大的情景下,径流过程呈现陡涨陡落的形态。以 2 年一遇降雨情景为例,不透水率从 8.3% 增加到 83.3%,径流系数平均值从 0.08 增加到 0.87,径流峰值从 5.1 m³/s 增加到 65.5 m³/s,峰现时间从 125 min 减少到 87 min。上述结果表明,城市化导致的不透水率增加将使径流过程向不利于管控的方向变化,使得城市内涝风险增加。此外,在同一不透水率下,不同不透水面空间分布下的径流过程线也呈现出一定差异,表明不透水面空间分布对径流形成过程有一定影响。

2.4 讨论

本文针对降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析,基于随机模拟构建了 6 个不透水率,共计 36 种不透水面空间分布,开展了 6 种重现期设计降雨条件下的数值试验。结果表明,在试验条件下径流系数与不透水率呈线性相关关系,同一不透水率下不透水面空间分布对径流过程有一定影响,上述结论与以往相关研究结果相符^[13-14]。本文基于试验

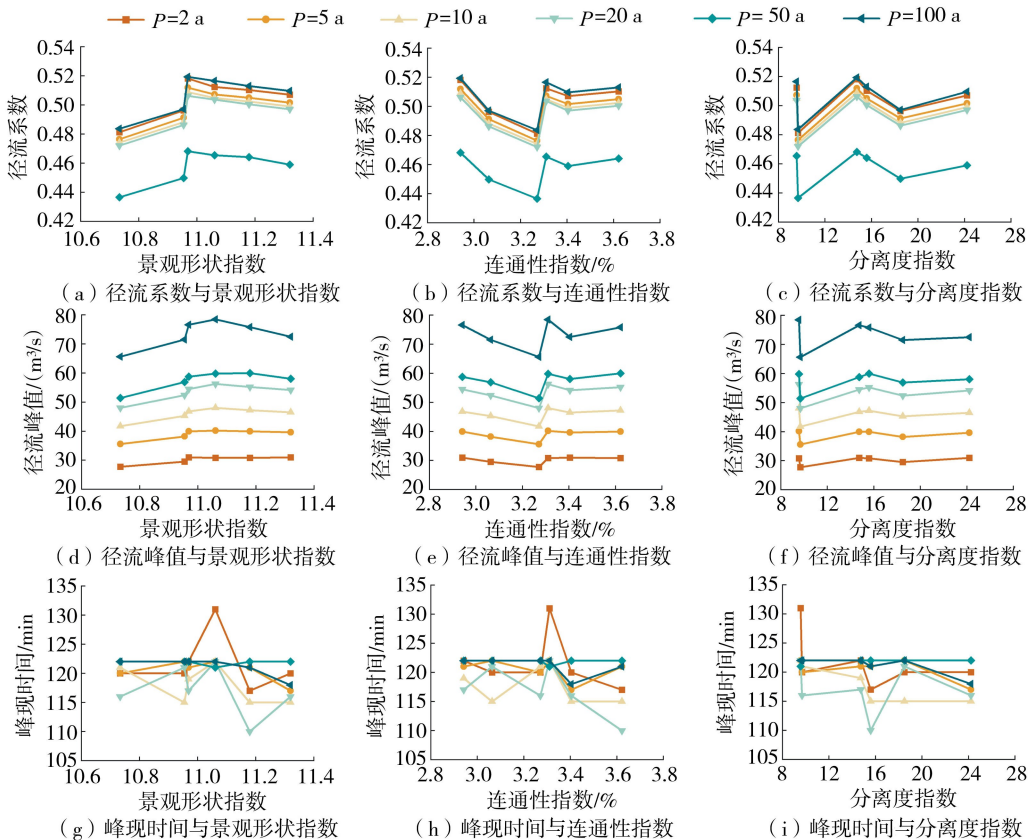


图 7 径流特征值与不透水面空间分布参数关系

Fig. 7 Runoff characteristic values versus spatial distribution parameters of impervious area

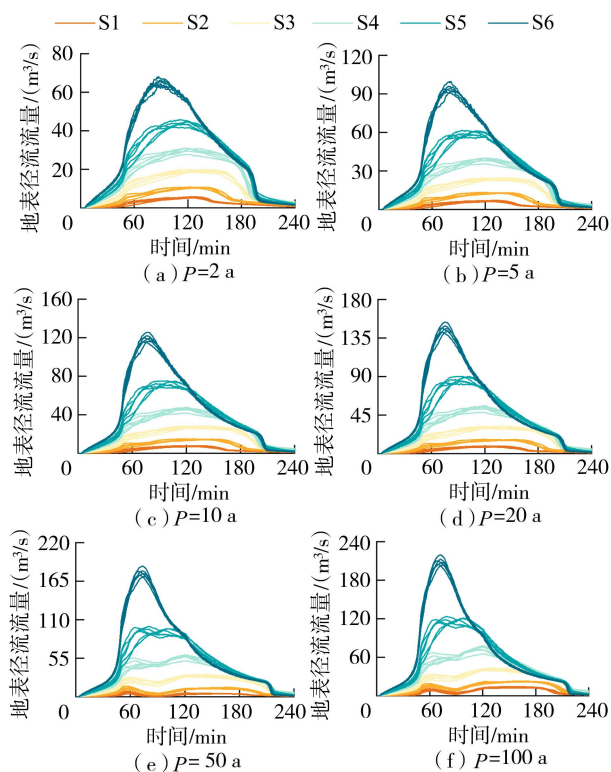


图8 不同降雨重现期和不透水率下的径流过程
Fig.8 Runoff processes under different rainfall return periods and impervious rates

结果深入分析了不透水面空间分布对降雨径流过程的影响,从数据分析来看,上述影响存在,但并未呈现出明显规律性,一方面可能与试验情景的数量有限有关,另一方面可能与随机模拟得到的不透水面空间分布均处于分散分布而非集中式的上游或下游分布型有一定关系。

3 结论

a. 在本文设计的数值试验条件下,不透水面空间分布对径流特征值有一定影响,其中,对径流系数影响相对较小,对径流峰值和峰现时间影响相对较大;本文选取的径流特征值随不透水面空间分布参数变化未呈现出明显规律性。

b. 随着不透水率增加,径流过程线总体由“矮胖”变得“尖瘦”;同一不透水率下,不同不透水面空间分布下的径流过程呈现一定差异。

参考文献:

[1] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

[2] 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 Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, 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))

[3] 李曦亭,王磊之,王银堂,等. 基于安全裕度理论的太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):150-156. (LI Xiting, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Standard syntaxis of urban drainage and sub-basin flood standards based on safety margin theory in the north of Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):150-156. (in Chinese))

[4] 李镇洋,李国芳,高倩雨,等. 变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):35-40. (LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Runoff response of Fulaerji station in Nenjiang River under changing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):35-40. (in Chinese))

[5] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展,2021,32(5):791-800. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes [J]. Advances in Water Science,2021,32(5):791-800. (in Chinese))

[6] 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[J]. 湖泊科学,2021,33(5):1574-1583. (SUN Yanwei, XU Youpeng, GAO Bin, et al. Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization:a case study of Qinhuai River in Nanjing [J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(5):1574-1583. (in Chinese))

[7] 张永勇,侯进进,夏军,等. 中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(8):1427-1442. (ZHANG Yongyong, HOU Jinjin, XIA Jun, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(8):1427-1442. (in Chinese))

[8] 周宏,刘俊,丁华凯,等. 城市有效不透水下垫面及其识别研究进展[J]. 水资源保护,2022,38(6):39-48. (ZHOU Hong, LIU Jun, DING Huakai, et al. Research progress on urban effective impervious surface and its identification [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):39-48. (in Chinese))

[9] 唐钰嫣,潘耀忠,范津津,等. 土地利用景观格局对城市内涝灾害风险的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):1-11. (TANG Yuyan, PAN

- Yaozhong, FAN Jinjin, et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban wateloggng disaster [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 (12):1-11. (in Chinese))
- [10] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 50-57. (ZHU Hui, HE Qisheng, LI Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 50-57. (in Chinese))
- [11] EBRAHIMIAN A, WILSON B N, GULLIVER J S. Improved methods to estimate the effective impervious area in urban catchments using rainfall-runoff data[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536:109-118.
- [12] FERREIRA C S S, MORUZZI R, ISIDORO J M G P, et al. Impacts of distinct spatial arrangements of impervious surfaces on runoff and sediment fluxes from laboratory experiments[J]. Anthropocene, 2019, 28:100219.
- [13] 任梅芳,宋利祥,庞博,等. 基于物理机制的城市汇水单元降雨径流特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 37-47. (REN Meifang, SONG Lixiang, PANG Bo, et al, Research on urban rainfall and runoff characteristics based on physical mechanism[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 37-47. (in Chinese))
- [14] 石树兰,庞博,赵刚,等. 基于有效不透水面识别的城市雨洪过程模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 595-602. (SHI Shulan, PANG Bo, ZHAO Gang, et al. Urban stormwater simulation based on recognition of effective impervious area [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 595-602. (in Chinese))
- [15] 李强,黄浩,张鲸. 控制性详细规划约束下的城市不透水面研究:以北京典型街区为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(7): 1-6. (LI Qiang, HUANG Hao, ZHANG Jing. Study on urban impervious surface restricted by regulatory detailed planning: a case study of typical blocks in Beijing[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(7): 1-6. (in Chinese))
- [16] SONG Lixiang, ZHOU Jianzhong, GUO Jun, et al. A robust well-balanced finite volume model for shallow water flows with wetting and drying over irregular terrain [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(7): 915-932.
- [17] WANG Zhihua, BOU-ZEID E, SMITH J A. A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139 (675): 1643-1657.
- [18] BROOKS R H. Hydraulic properties of porous media[M]. Colorado: Colorado State University, 1965.
- [19] SUN Ting, BOU-ZEID E, WANG Zhihua, et al. Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport [J]. Building and Environment, 2013, 60: 211-224.
- [20] CAO Xuejian, QI Youcun, NI Guangheng. Significant impacts of rainfall redistribution through the roof of buildings on urban hydrology [J]. Journal of Hydrometeorology, 2021, 22(4): 1007-1023.
- [21] 吴江华,刘康,张红娟,等. 西安市主城区景观格局演变对地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 83-92. (WU Jianghua, LIU Kang, ZHANG Hongjuan, et al. Impacts of landscape pattern changes on surface runoff in main urban area of Xi'an City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 83-92. (in Chinese))
- [22] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))
- [23] 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 Fudong, CAI Tao, SUN Yuhua, 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))
- [24] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))
- [25] 周宏,刘俊,高成,等. 考虑有效不透水下垫面的城市雨洪模拟模型: I. 模型原理与模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 474-484. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Development of an urban stormwater model considering effective impervioussurface: I. theory and development of model [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 474-484. (in Chinese))
- [26] 周宏,刘俊,高成,等. 考虑有效不透水下垫面的城市雨洪模拟模型: II. 雨洪模拟及水文响应分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 485-494. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Development of an urban stormwater model considering effective impervious surface: II. urban stormwater simulation and anaysis of hydrological response [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 485-494. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-21 编辑:施业)