

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.003

基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施 径流减控效果评估

李永坤^{1,2}, 薛联青³, 邸苏闯^{1,2}, 潘兴瑶^{1,2}, 张书函^{1,2}, 王丽晶^{1,2}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048;
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了分析海绵措施在流域尺度的雨水径流减控效果, 提出适用于海绵城市系统建设的最优组合模式。基于 Infoworks ICM 模型构建马草河综合流域洪涝模型, 结合雨水控制与利用工程设计规范, 定量评估调蓄池、下凹式绿地及透水铺装海绵组合模式的蓄滞效果。研究结果表明: (a) 海绵组合措施对 10 年一遇以下低重现期降雨径流量、洪峰流量和峰现时间的削减延迟效果较好; 当降雨重现期达到 10 年一遇及以上时, 径流量和洪峰流量削减比例不同程度地降低, 洪峰流量削减和峰现时间延迟效果明显降低。 (b) 实施海绵措施后流域年径流量平均削减 39%, 各管控地块全部满足控制标准, 现行雨水设计规范标准有助于支撑海绵城市试点建设。

关键词: Infoworks ICM; 流域洪涝模型; 海绵组合模式; 径流量; 洪峰流量; 峰现时间; 雨水控制; 雨水利用工程; 马草河

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)05-0398-08

Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model

LI Yongkun^{1,2}, XUE Lianqing³, DI Suchuang^{1,2}, PAN Xingyao^{1,2}, ZHANG Shuhan^{1,2}, WANG Lijing^{1,2}

(1. Beijing Hydyaulic Research Institute, Beijing 100048, China;
2. Beijing Unconventional Water Resources and Water Saving Engineering Technology
Research Center, Beijing 100048, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the effect of sponge measures on the reduction of rainwater runoff at the watershed scale, this study presented an optimal combination mode for the construction of sponge city system. An integrated flooding and water-logging model for the Macao River was established based on the Infoworks ICM model and following the code for the design of storm water management and harvest engineering to quantitatively evaluate the storage effect of storage ponds, hollow grassland and the permeable pavement sponge combination mode. The results show that the sponge combination measures have better effect on the reduction of rainfall runoff, flood peak discharge and flood peak time in the low-recurring period of less than 10 years. In comparison while the return period of rainfall reaches 10 years and above, the reduction ratio of runoff and flood peak discharge decrease to different extents, and the flood peak discharge reduction and flood peak time delay significantly decrease. After the implementation of the sponge measures, the annual runoff of the basin was reduced by an average of 39%, when all controlled blocks meet the control standards. Current design standards for rainwater can help support the pilot construction of sponge cities.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07103-002); 国家自然科学基金 (51779074); 北京市科委项目 (Z181100005318003); 北京市科技新星计划 (Z161100004916085)

作者简介: 李永坤 (1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事流域洪涝模拟研究。E-mail: 15010176877@163.com

引用本文: 李永坤, 薛联青, 邸苏闯, 等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 398-406.

LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 398-406.

Key words: Infoworks ICM; watershed floods and water-logging model; sponge combination mode; runoff; flood peak discharge; flood peak time; storm water management and harvest engineering; Macao River

近年来海绵城市建设衍生出若干城市水文学问题,涉及海绵措施径流响应机理及效应研究^[1-3],首先是怎样定量海绵措施不同尺度下的减控效果,其次是如何确定建成区海绵措施建设标准,最终怎样促进区域小海绵与流域大海绵水系统的有机结合。综合评价雨洪利用工程布局及其优化组合模式对场次降雨和年降雨量的控制效果,成为海绵城市亟待研究的首要问题。2013 年,北京市发布 DB 11/685—2013《雨水控制与利用工程设计规范》^[4],规定新建项目按照统一标准配套建设雨洪利用工程,当新建工程硬化面积达到 2 000 m² 及以上时,每千平方米硬化面积应配套建设不小于 30 m³ 的雨水调蓄池,绿地率建设工程下凹式绿地比例至少 50%,公共停车场、人行道等透水铺装率不小于 70% (以下简称为“3+5+7”海绵改造措施)。随着北京市入选第二批海绵试点城市,相继发布了《北京市海绵城市专项规划》^[5],将中心城区划分为 308 个雨水管控单元及 31 018 个地块单元,确定各管控单元的年径流总量控制率,以保障中心城区总体年径流总量控制率达到 75% 以上。

大量研究结果表明^[6-8]海绵措施等外界胁迫条件下流域水文情势变异度影响分析主要采用数值模型及变化范围法。由于变化环境下城市流域历史径流监测序列不完整,或存在非一致性等问题,因此现状主要选用数值模型法。Omar^[9]利用 SWMM 模型分析低影响措施在城市密集区域的雨水径流减控效果。陆小蕾等^[10]基于 SWMM 模型研究,指出当下凹绿地深度达到 5 ~ 10 cm 能够有效削减雨水径流。陈韬等^[11]以嘉兴市南湖区世合小镇为例,应用 i-Tree 模型评估了低影响开发措施水量水质控制效果。王文亮等^[12]应用 SWMM 模型模拟雨水花园、植被浅沟和透水铺装 3 种措施对场地雨水径流的影响,结果表明场地 LID 措施可将峰值流量及年径流外排率恢复到开发前状态。上述海绵措施模拟模型研究,重点针对建筑小区或区域尺度,缺少流域尺度不同降雨下的径流控制效果的系统性研究,难以对流域整体新建及改建工程提供有效的指导意见。本文基于 Infoworks ICM 城市流域洪涝模型,利用流域出口水文监测断面实测降雨径流过程进行率定验证,通过情景构建定量评价流域“3+5+7”海绵措施对场次及年度降雨径流过程的综合影响。

1 研究区概况

马草河是北京市中心城区西南部的一条重要排洪河道,属于凉水河水系,是凉水河中心城区范围内的最大支流,西起京津铁路涵洞,在洋桥闸附近汇入凉水河干流,全长 13 km,流域面积 25.53 km²,流域下垫面高程介于 36.88 ~ 54.72 m 之间。研究区域范围内用地类型主要分为道路、普通房屋、裸土、河道面等 13 类,不透水面积比例为 67%,根据不同下垫面类型雨量径流系数建议取值^[4],加权平均得出流域综合径流系数为 0.67,城市流域特点显著。按照《北京市海绵城市专项规划》所提出的规划目标,研究区域涉及 18 个雨水管控单元,各管控单元年径流总量控制率目标值为 71% ~ 90%。马草河流域位置分布见图 1。

2 研究方法

常用水文水力学模型主要包括 Grid-XAJ-SATIN、LSX-HMS、Infoworks ICM、SWMM、MIKE 等^[8,13-14], Infoworks ICM 模型适用于城市流域雨水系统各种复杂水文水力学过程模拟,广泛应用于城市排水领域。模型集成了世界上多种产汇流模型,基于子集水区划分和不同产流特征表面进行降雨径流计算,采用圣维南方程组模拟明渠和管道水力学演进过程,采用 Pressmann Slot 方法模拟超负荷管道水力学演进过程^[8]。Infoworks ICM 模型可以模拟生物滞留槽、雨水花园、绿色屋顶等 8 类海绵措施的水文水质过程,能够与降雨径流、管网汇流、河道汇流以及地面漫流过程交互耦合,系统能模拟下垫面、排水管网系统与地表接纳水体之间的水文水力学效应。模型将透水铺装、下凹式绿地、雨水调蓄池概化为表层、填料层、蓄水层的 3 层竖向介质,各层之间通过雨水径流入渗过程实现水量传递,基于非线性水库法求解,计算公式如下:

$$i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 = \frac{\partial d_1}{\partial t} \tag{1}$$

$$L_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \tag{2}$$

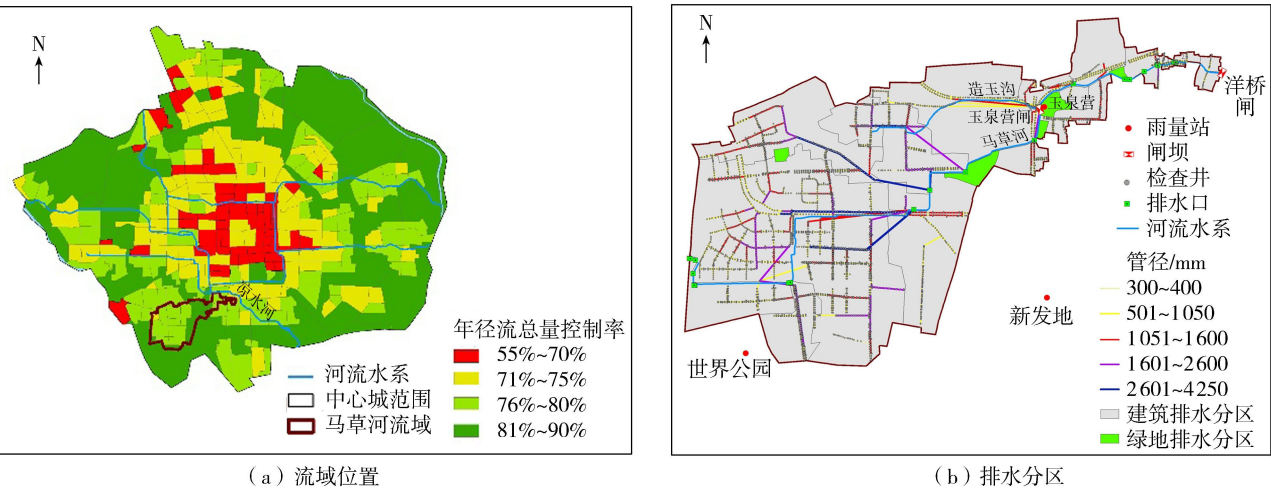


图1 马草河流域位置和排水分区

Fig.1 Location and drainage division of Macao River Basin

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - f_3 - q_3 \tag{3}$$

式中： i ——降雨强度，mm/s； q_0 ——表层入流速率，mm/s； e_1 、 e_2 ——表层、填料层蒸发量，mm/s； q_1 ——表层入渗速率，mm/s； q_3 ——暗管出流速率，mm/s； f_1 、 f_2 、 f_3 ——表层、填料层及蓄水层入渗速率，mm/s； d_1 、 d_3 ——表层及蓄水层蓄水深度，mm； L_2 ——填料层深度，mm； θ_2 ——填料层体积含水率，%； Φ_3 ——蓄水层孔隙率，%。

海绵措施表层主要接收直接降雨和不透水汇水区域的径流量，当表层蓄满后，雨水径流直接溢流外排，表层及填料层入渗采用 Green-Ampt 公式计算，表层入渗速率计算如下：

$$f_1 = K_{2s} \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i)(d_1 + \Psi_2)}{F} \right] \tag{4}$$

式中： K_{2s} ——土壤饱和水力传导度，mm/s； θ_s ——土壤饱和含水量，%； θ_i ——土壤初始含水量，%； Ψ_2 ——土壤中湿润锋以上的吸水头，mm； F ——单位面积累积入渗量，mm。

填料层承接表层入渗水量，填料层入渗速率计算式如下：

$$f_2 = \begin{cases} K_{2s} \exp[-H_{c0}(\theta_s - \theta_2)] & \theta_2 > \theta_{fc} \\ 0 & \theta_2 \leq \theta_{fc} \end{cases} \tag{5}$$

式中： H_{c0} ——入渗率衰减曲线常系数； θ_{fc} ——土壤田间持水量，mm。

蓄水层水量来自填料层下渗，蓄水层可下渗至下层本地土壤层。当设置排水暗管时，蓄水层水量可通过排水暗管外排，排水暗管出流速率计算式如下：

$$q_3 = C h^n \tag{6}$$

式中： C ——排水系数，若该层下无排水管则 $C=0$ ； h ——排水暗管上方饱和介质厚度，mm； n ——排水指数，当取值为 0.5 时相当于孔口出流。

3 模型构建

Infoworks ICM 模型构建包括子集水区产汇流、管网汇流和河道汇流。依据排水管网路由与雨水口的空间位置关系，综合建筑物、大范围绿地等下垫面类型，划分 29 个排水分区，其中建筑排水分区 24 个（平均面积 104 hm²），绿地排水分区 5 个（平均面积 10 hm²）。结合检查井空间分布，通过泰森多边形法进一步划分子集水区，作为降雨径流的最小计算单元，最终将研究区划分为 5 107 个子集水区，平均面积 0.510 hm²。依据不同土地类型渗透性能将径流表面概化为道路、屋顶、绿地及裸土 4 类，定量统计各子集水区 4 种径流表面的面积比例，建立产汇流模型。马草河流域排水分区分布见图 1。

马草河流域排水管网包括分流制和合流制管线，在详细收集雨水和雨污合流管线勘测资料基础上，进行管网汇流路径、上下游管底高程拓扑检查，确保上下游管线连接关系、上下游底高程、坡度以及检查井地面高

程、埋深等属性参数的合理性。研究区域共有 5 102 个检查井,5 110 条排水管线,29 个排水口,管线总长度 129 km,管道形状多为圆管或方涵,管径分布在 300 ~ 4250 mm 区间,管道糙率系数取 0.013,建立管网汇流模型。管网汇流通过排水口排入河道,排水口是管网与河道的连接点。综合考虑河道勘测断面和出水口位置设置河道计算节点,河道糙率系数取 0.03,建立河道汇流模型。

4 模型率定及验证

径流表面中道路、屋顶为不透水下垫面,选用固定径流系数法、SWMM 汇流模型计算子集水区坡面产汇流过程,主要率定参数为径流系数、初损值及曼宁系数,绿地和裸土为透水下垫面,选用霍顿入渗法、SWMM 汇流模型进行产汇流计算,率定参数包括初损值、初始入渗率、稳定入渗率、衰减系数及曼宁系数,参考规范标准、模型手册和相关文献确定各参数取值范围^[4,8,15-17]。为率定模拟参数并验证模型的准确性,选取近年来影响较大的 2016 年 7 月 20 日和 2018 年 7 月 16 日两场典型降雨径流过程资料(以下简称 2016 年“7·20”和 2018 年“7·16”),参数率定方法采用人工试错法,其中 2016 年“7·20”作为率定场次,2018 年“7·16”作为验证场次。

研究系统收集两场典型场次中世界公园、玉泉营、新发地 3 个代表性雨量站实测降雨序列,以及洋桥闸实测流量序列,数据资料来源于北京市水文总站。通过雨量站点泰森多边形划分,空间插值提取各子集水区降雨过程输入模型,经分析河道涨水过程,将河道基流量 2 m³/s 作为边界条件,采用相对误差 δ 和 Nash-Sutcliffe 效率系数检验模拟精度。在率定期,2016 年“7·20”马草河流域面平均降雨量 301 mm,最大 24 h 降雨重现期大于 20 年一遇小于 50 年一遇,洋桥闸洪峰流量为 92.95 m³/s,洪水重现期接近 20 年一遇,流域平均径流深为 113.65 mm。模拟洪峰流量为 84.25 m³/s,峰值相对误差为 9%;峰现时间误差为 40 min,小于许可误差(4 h);模拟径流深为 132.82 mm,径流深相对误差为 17%;模拟洪水过程 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.92。在验证期,2018 年“7·16”流域面平均降雨量为 120 mm,最大 24 h 降雨重现期大于 1 年一遇小于 3 年一遇,洋桥闸洪峰流量为 19.29 m³/s,平均径流深为 50.44 mm。模拟洪峰流量为 20.93 m³/s,峰值相对误差为 9%;峰现时间误差为 1 h,小于许可误差 4 h;模拟径流深为 52.77 mm,径流深相对误差为 5%;模拟洪水过程 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.78。这 2 场洪水均存在涨水阶段模拟值偏低、退水阶段模拟值偏高的情况,在验证期洪水过程模拟精度有所降低,这可能与雨污合流管线截污改造、污水处理厂补给河道等人工调度措施有关,并不是自然降雨径流过程。总体来说,基于 Infoworks ICM 构建的马草河流域洪涝模型率定参数合理可靠,径流量、洪峰流量和流量过程模拟精度较高,可用于不同降雨情景下的模拟分析。模型参数率定结果见表 1。率定及验证场次洋桥闸模拟结果见图 2。

表 1 Infoworks ICM 模型参数率定结果
Table 1 Calibration results of model parameters of Infoworks ICM

用地类型	径流系数	曼宁系数	降雨初损值/mm	降雨后损值		
				初始入渗率/(mm·h ⁻¹)	稳定入渗率/(mm·h ⁻¹)	衰减系数
道路	0.7	0.02	2.0			
屋顶	0.8	0.02	1.5			
绿地		0.15	6.0	76	20	2.28
裸土		0.04	4.0	34.8	6	3.30

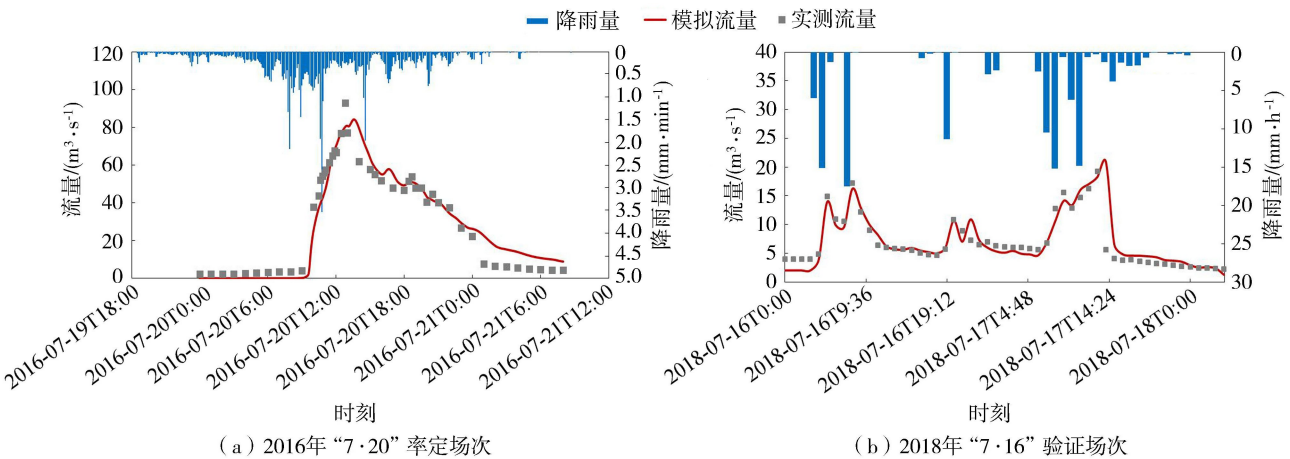


图 2 场次降雨模拟结果
Fig. 2 Comparison between simulated results and measurements in the rainfall event

5 模拟情景设置

按照 DB 11/685—2013《雨水控制与利用工程设计规范》^[4]中海绵措施组合配套建设标准,研究流域道路面积为 1 175 hm²,透水铺装面积为 822 hm²;绿地面积为 724 hm²,下凹式绿地面积为 362 hm²;硬化面积为 861 hm²,雨水调蓄池建设规模为 20 万 m³。综合考虑海绵措施建设规范,设置竖向规模参数^[4],透水铺装表层、填料层、蓄水层深度分别为 80 mm、50 mm 及 200 mm,表层、填料层入渗率取值为 100 mm/h 及 29.97 mm/h,蓄水层未设置暗管;下凹式绿地护坡、填料层、蓄水层深度分别为 200 mm、300 mm、200 mm,填料层入渗率为 29.97 mm/h;雨水调蓄池排水指数取 0.5,调蓄池蓄满后经孔口出流外排,排水延时为 24 h,即降雨结束后 24 h 调蓄池收集雨水外排。各类海绵措施模拟参数如表 2 所示。

表 2 海绵措施模拟参数
Table 2 Model parameters of sponge measures

海绵措施	护坡 高度/mm	表层 深度/mm	表层入渗率/ (mm·h ⁻¹)	填料层 深度/mm	填料层入渗率/ (mm·h ⁻¹)	雨水桶 高度/mm	蓄水层 深度/mm	排水 系数	排水指数/ (mm·h ⁻¹)	偏移 高度/mm	延时/h
透水铺装		80	100	50	29.97		200	0	0.5	150	
下凹绿地	200			300	29.97		200	2	0.5	150	
调蓄池							150	10000	0.5	0	24

根据《北京市水文手册》^[18]第一分册暴雨图集,查询研究区内最大 10 min、30 min、60 min、360 min 和 1 440 min 标准历时的多年平均降雨量 $\bar{x}$ 和年最大变差系数 C_v ,计算不同重现期下的设计降雨量。马草河流域多年平均最大 24 h 降雨量为 110 mm,1 年一遇、3 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇和 50 年一遇设计降雨量分别为 47 mm、113 mm、150 mm、204 mm、270 mm 及 350 mm。依据 DB 11/T 969—2016《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》^[17]推荐的同频率放大方法和北京地方雨型分配表,确定不同重现期逐 5 min 降雨过程,作为模型输入降雨事件。

收集研究区域 3 个雨量站点 2012—2016 年降雨历史序列,选取近年来降雨量强度偏大和量级偏多的 2012 年及 2016 年逐 1 h 降雨过程数据输入模型^[19-20],评价流域尺度实施海绵措施改造后年径流量的削减效果。

6 模拟结果分析

1 年一遇至 50 年一遇不同重现期模拟结果显示,马草河流域现状模拟径流总量区间范围为 9.54 ~ 159.13 mm,径流系数为 0.20 ~ 0.45,洪峰流量变化区间 10.97 ~ 106.31 m³/s,洪峰滞时 200 ~ 90 min,流域汇流时间约为 180 min,现状流域产流量大、汇流速度快,符合城市流域产汇流特点。由图 3 可以看出,实施调蓄池、下凹式绿地和透水铺装海绵改造后,能够有效削减径流总量和峰值流量,径流量削减幅度为 90.46% ~ 38.88%,流域出口洋桥闸洪峰削减比例为 93.25% ~ 15.60%,峰现时间较现状滞后 225 ~ 0 min,表明海绵组合措施能够对雨洪资源进行拦截及渗蓄,降低地面径流总量和坡面汇流时间,对各重现期设计降雨具有不同程度的削减效果。

由图 4 可知,研究区 1 年一遇最大雨强为 19 mm/h,海绵措施径流量及峰值流量的削减效果达到 90% 以上,峰现时间延迟约 225 min,主要由于降雨强度小于海绵措施入渗率,调蓄池空间相对较大,提高流域滞蓄能力,河道洪峰坦化作用显著。当暴雨重现期达到 10 年一遇后,最大雨强达到 75 mm/h 时,径流量削减效果趋于稳定。随着暴雨重现期继续增加,洪峰流量、峰现时间削减效果明显降低。50 年一遇模拟结果图 4 所示,海绵措施改造后洪峰流量为 89.73 m³/s,洪峰流量削减比例仅 15.60%,峰现时间基本无延迟。综上所述,随着暴雨重现期增加,海绵措施对径流量与洪峰流量减控效果有所降低,海绵措施主要滞蓄 10 年一遇以下降雨径流过程。

对于年径流总量控制率,2012 年研究区年降雨总量为 820 mm,最大雨强为 60 mm/h,降雨强度达到 5 年一遇,以局地雨强较大、连续型强降雨为主,模拟年径流量为 217 mm,年径流系数为 0.26;2016 年降雨总量为 623 mm,最大雨强为 28 mm/h,降雨强度仅大于 1 年一遇小于 3 年一遇,全年以降雨强度较小、平稳型降雨

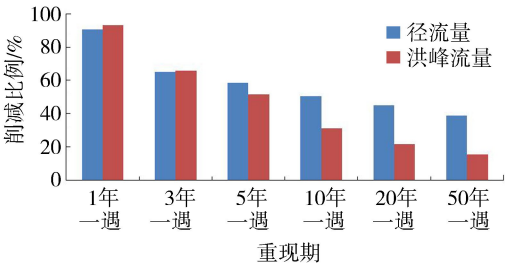


图 3 研究区域海绵措施径流减控效果
Fig.3 Runoff control effect of sponge measures at different return period rainfalls

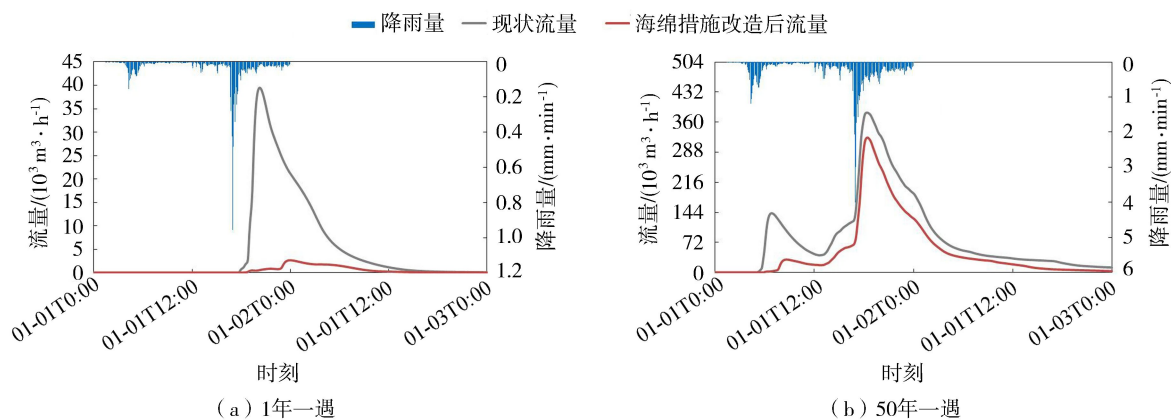


图 4 研究区域海绵措施径流减控效果

Fig. 4 Runoff control effect of sponge measures in the study area

为主,模拟年径流量为 145 mm,年径流系数为 0.23。基于子集水区模拟流量过程,通过 Arcgis 软件矢量要素 Intersect 空间分析工具,进行子集水区与管控单元相交分析,应用 Spatial Join 空间关联加权提取各管控单元年径流量和径流系数。据图 5 可知,2012 年现状各管控单元年径流系数为 0.21 ~ 0.35,其中 14 处地块未达到规划标准;2016 年各管控单元年径流系数为 0.18 ~ 0.28,共有 6 处地块未达到控制标准。

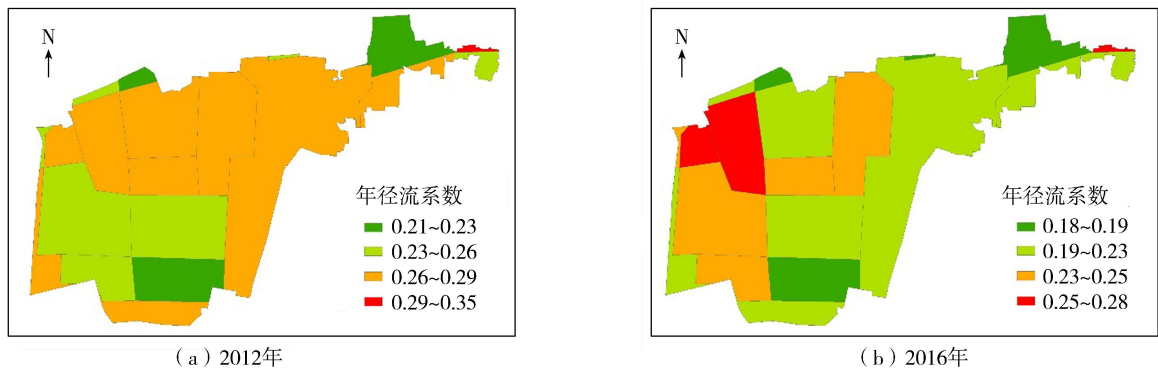


图 5 现状年径流系数

Fig. 5 Current annual runoff coefficient

据图 6 可知,实施“3+5+7”海绵措施改造后:研究区域 2012 年模拟年径流量为 139 mm,较现状年径流量削减 36%,年径流总量控制率为 83%,各管控单元控制率为 82% ~ 95%;2016 年模拟年径流量为 84 mm,较现状年径流量削减 42%,年径流总量控制率达到 87%,各管控单元控制率为 86% ~ 93%。实施海绵措施改造后 2012 年及 2016 年各地块均能够达到控制标准,现行雨水控制与利用工程设计规范能够有效促进海绵城市建设达标。

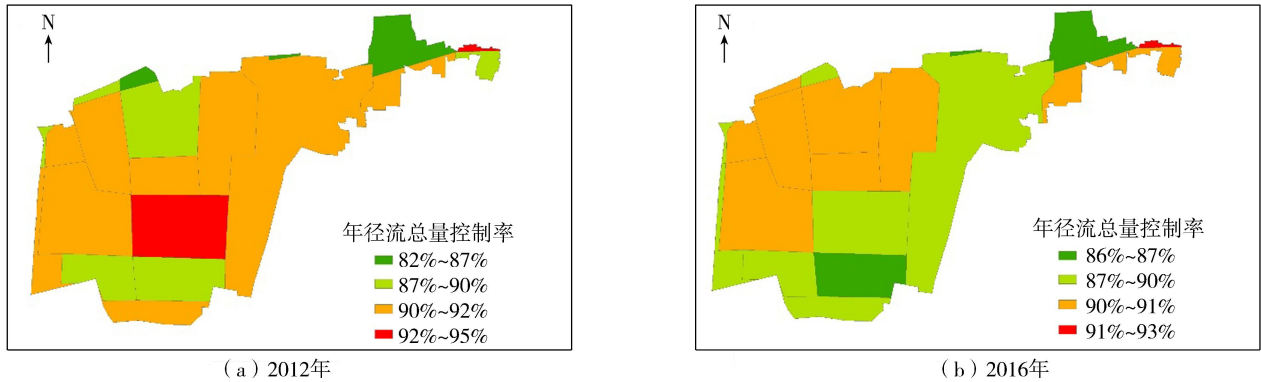


图 6 海绵措施改造后年径流总量控制率

Fig. 6 Volume capture ratio of annual rainfall after implementation of sponge measures

7 结论与展望

a. 按照“3+5+7”建设比例进行海绵措施改造,能够有效削减场次径流量,1年一遇至50年一遇重现期下径流量削减比例为90.46%~38.88%,河道洪峰流量削减比例为93.25%~15.60%,峰现时间滞后225~0 min,海绵措施对低重现期降雨呈现较好的控制效果。随着场次降雨重现期的增加,径流量及洪峰流量削减比例有所降低,洪峰流量削减、峰现时间延迟效果降低显著。

b. 研究区域现状平均年径流系数为0.24,各管控单元年径流系数为0.18~0.35,平均10处地块未达到控制标准。实施海绵措施后流域年径流总量控制率达到85%,年径流量平均削减39%,各管控地块全部达到控制标准。实施“3+5+7”海绵措施后,能够有效减控年径流量,约束各管控地块达标排放,现行雨水控制与利用工程设计规范满足海绵城市建设要求。

本研究重点针对透水铺装、下凹式绿地、雨水调蓄池3类特定组合比例海绵措施的径流减控效果,未来可进一步研究不同海绵措施及其不同组合方式的水量水质减控效果,为促进海绵城市效果评估提供理论支撑。

参考文献:

[1] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):1-8. (in Chinese))

[2] 陈垚,何智伟,张琦,等. 基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价[J]. 水资源保护,2019,35(6):1-8. (CHEN Yao, HE Zhiwei, ZHANG Qi, et al. Evaluation of reconstruction schemes for small- and medium-scale sponge city based on hydrological control target[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):1-8. (in Chinese))

[3] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报,2015,46(11):1261-1271. (WANG Hong, DING Liuqian, CHENG Xiaotao, et al. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(11):1261-1271. (in Chinese))

[4] 北京市规划委员会,北京市质量技术监督局. 雨水控制与利用工程设计规范:DB11/685—2013[S]. 北京:北京市城乡规划标准化办公室,2013.

[5] 北京市规划和自然资源委员会. 北京市海绵城市专项规划[R]. 北京:北京市规划和自然资源委员会,2017.

[6] 黄显峰,贾永乐,方国华,等. 基于PP-RVA法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(6):479-485. (in Chinese))

[7] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(1):1-6. (in Chinese))

[8] 黄国如,冯杰,刘宁宁,等. 城市雨洪模型及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[9] OMAR K. Development and calibration of a high resolution SWMM model for simulating the effects of LID retrofits on the outflow hydrograph of a dense urban watershed[J]. Low Impact Development, 2008,36(3):1-9.

[10] 陆小蕾,赵然杭,郝玉伟. 基于SWMM的下凹式绿地对城市径流的影响分析[C]//中国水利学会水资源专业委员会. 变化环境下的水资源响应与可持续利用—中国水利学会水资源专业委员会论文集. 北京:中国水利学会,2009:642-648.

[11] 陈韬,曹凯琳,邹子介. 基于i-Tree模型的LID技术在降雨径流控制效果评价中的应用[J]. 水电能源科学,2016,34(3):6-10. (CHEN Tao, CAO Kailin, ZOU Zijie. Application of LID in evaluation control effect of rainfall runoff based on i-Tree model[J]. Water Resources and Power,2016,34(3):6-10. (in Chinese))

[12] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等. 基于SWMM模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水,2012,28(21):42-44. (WANG Wenliang, LI Junqi, GONG Yongwei, et al. LID stormwater control effect simulation based on SWMM[J]. China Water & Waste Water, 2012,28(21):42-44. (in Chinese))

[13] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall

runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(6):471-480. (in Chinese))

[14] 李致家,梁世强,霍文博,等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):1-6. (LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):1-6. (in Chinese))

[15] 谭琼,李田,周永潮,等. 城市雨水管网模型参数的率定与评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(1):31-35. (TAN Qiong, LI Tian, ZHOU Yongchao, et al. Calibration of urban stormwater drainage model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2008,35 (1):31-35. (in Chinese))

[16] ROSSMAN L A. Storm water management model user’ s manual version 5. 1 [R]. Ohio:National Risk Management Laboratory Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency,2015.

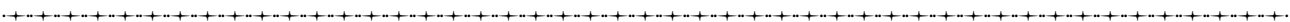
[17] 北京市质量技术监督局. 城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准:DB 11/T 969—2016 [S]. 北京:北京市城乡规划标准化办公室,2017.

[18] 北京市水利局. 北京市水文手册(暴雨图集) [M]. 北京:北京市水利局,1999:13-49.

[19] 李永坤,臧敏,潘兴瑶. 北京凉水河暴雨洪水特征规律研究[J]. 中国水利, 2017(19):57-59. (LI Yongkun, ZANG Min, PAN Xingyao. Examination of rainstorm of Liangshui River in Beijing[J]. China Water Resources, 2017(19):57-59. (in Chinese))

[20] 方国华,张钰,闻昕,等. 基于质心分析的淮河流域降水时空分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):384-389. (FANG Guohua, ZHANG Yu, WEN Xin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of precipitation in the Huaihe River Basin based on centroid analysis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(5):384-389. (in Chinese))

(收稿日期:2019 -01 -15 编辑:高建群)



• 简讯 •

2021 年土木与水利水电工程国际学术会议将在郑州召开

为了给从事土木与水利水电工程研究的专家学者、工程技术人员、技术研发人员提供一个共享科研成果和前沿技术,了解学术发展趋势,拓宽研究思路,加强学术研究和探讨,促进学术成果产业化合作的平台,由 AEIC 学术交流中心主办的 2021 年土木与水利水电工程国际学术会议(CEWCHE 2021) 将于 2021 年 1 月 15—17 日在郑州市举行。会议主要围绕土木与水利水电工程等研究领域展开讨论。

会议征文主题:土木工程材料、土木工程、岩土工程、地震工程、地质工程、给排水工程、交通工程、测量工程、市政工程、结构工程、桥梁与隧道工程、防灾减灾工程、水力学、工程水文学、水工混凝土结构、灌溉和水利、水文和水资源、水土保持、水工建筑、农业水土工程等其他相关主题。

(本刊编辑部供稿)