

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.015

LID 径流控制效果对设计暴雨重现期的响应

杨少雄¹, 侯精明¹, 陈光照¹, 李东来¹, 马 越², 梁行行²

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心, 陕西 西安 712000)

摘要:为分析不同重现期降雨与径流控制率的变化规律,以西咸新区典型海绵建设小区为例,采用基于 GPU 加速技术并耦合了管网系统的二维城市雨洪过程模型,对该小区不同重现期设计降雨条件下的径流控制效果变化规律进行量化分析。结果显示:通过与实测资料进行对比验证,模型模拟的流量与实测流量过程吻合度较高;随着降雨重现期的增大,径流控制率逐渐减小;在 1 年一遇降雨条件下,径流控制率为 82.5%,100 年一遇条件下,径流控制率降为 29.5%;随着重现期的增大,径流控制率的差值逐渐减小,径流控制率减小的趋势逐渐平缓。

关键词:暴雨重现期;径流控制率;城市雨洪模型;管网模型;数值模拟;GPU 加速技术

中图分类号:TV125;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0093-06

Response law of LID runoff control effect to design rainstorm return period//YANG Shaoxiong¹, HOU Jingming¹, CHEN Guangzhao¹, LI Donglai¹, MA Yue², LIANG Hanghang² (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. The Technology Research Center for Sponge City, Fengxi New City Development and Construction Group Co., Ltd. of Shaanxi Xixian New Area, Xi'an 712000, China)

Abstract: In order to analyze the variation law of rainfall and runoff control rate in different return periods, this research through using two-dimensional urban flooding model based on GPU acceleration technology and coupled with a pipe network system developed by author. This work adopted to quantitatively analyze the runoff control rate of the district by simulating the runoff control effect of the district under the typical design rainfall process. The results indicate that the simulated flow process is in good agreement with the measured value through comparison and verification with the measured data. With the increase of rainfall return period, runoff control rate gradually decreases. Under the condition of rainfall once a year, the runoff control rate is 82.5%, and under the condition of rainfall once a hundred years, the runoff control rate is reduced to 29.5%. With the increase of return period, the difference of runoff control rate gradually decreases and the decreasing trend of runoff control rate gradually flattened.

Key words: rainfall return period; runoff control rate; urban storm water management model; pipe network model; numerical simulation; GPU acceleration technology

为了有效解决气候变化和城市化进程加快^[1]导致的城市内涝频发^[2-3]的问题,美国于 20 世纪 90 年代提出低影响开发(low impact development, LID)^[4]。2009 年,仇保兴^[5]提出在城市规划时推广 LID,以达到不改变地表径流量、减少对环境的影响的目的。随着海绵城市建设的兴起,海绵城市建设效果的评估成为国内各界关注的热点^[6-7]。1971 年美国环境保护署开发出 SWMM 模型,Colston^[8]利用 SWMM 模型对城市径流的特征进行了模拟,SWMM

模型在新版本中加入了 LID 模块;2007 年,侯爱中等^[9]利用 SWMM 模型对国内下凹式绿地和蓄水池两种海绵措施对城市型洪水的影响进行了研究;2014 年,Marléne 等^[10]以悉尼西部某城市为研究区域,根据 SWMM 模型对该区域的模拟结果进行分析,得到雨水滞留池可以减少洪峰流量与系统径流量的结论。但以上研究只是对单一 LID 措施的径流控制效果进行模拟,而对系统的 LID 措施对径流控制效果未进行分析。2017 年,侯精明等^[11]利用自

基金项目:国家自然科学基金(51609199);陕西省水利科技项目(2017slkj-14)

作者简介:杨少雄(1995—),男,硕士研究生,研究方向为海绵城市建设效果数值模拟。E-mail: 2180421238@stu.xaut.edu.cn

通信作者:侯精明,教授。E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

主开发的基于 GPU 加速技术的耦合水文水动力过程的二维城市雨洪模型,研究了不同设计暴雨雨型对城市内涝的影响,发现设计暴雨重现期短于 20 a 时,峰值比例较小的设计暴雨内涝积水总量较大,而重现期长于 20 a 时,规律相反,系统地揭示了暴雨雨型与内涝积水的量化规律,但作者未对径流控制率变化的量化规律进行系统研究;2018 年,张曼等^[12]基于 SWMM 模型对城市典型 LID 措施水文效应及雨洪控制效果进行基础性的模拟研究,得到 LID 措施的不同组合对径流控制效果的影响,但未对已建成海绵小区不同重现期的径流控制效果进行模拟;2016 年,Laurent 等^[13]通过研究发现 LID 措施对城市洪水有明显削减作用,但并未对不同重现期的降雨对径流的影响进行研究;陈莎等^[14]基于 SWMM 模型对海绵城市建设前后不同降雨条件径流削减效果进行数值模拟,发现海绵城市建设后对径流削减效果显著;朱寒松等^[15]基于 SWMM 模型对城市工业园区 LID 效果进行了模拟评估,得到 LID 措施的径流削减效果在重现期为 2 a、10 a 时更显著的结论,但未对较大降雨重现期的径流控制效果以及量化规律进行模拟研究;刘家宏等^[16]基于海绵城市建设技术指南核算了特定年份径流总量控制率,探讨了海绵城市不同水文年型径流总量控制率的量化规律。

上述研究对 LID 措施布设完成区域的场次降雨径流控制率随不同重现期量化规律进行的研究较少,但该量化规律对海绵城市建设区域进行内涝防治以及对海绵设施功能精确评估有重要意义。在自然条件下,由于城市区域降雨随机性显著,量化大重现期场次降雨条件下 LID 设施的径流控制效果,对揭示 LID 设施在极端降雨条件下的控制效果有重要意义。使用 SWMM 模型计算径流控制率,尤其是在较大重现期条件下,当管网产生溢流时,由于其对地表的简化,管网汇流部仅能模拟出管网节点的溢流量,却不能模拟出水体从节点溢流后在地表的淹没情况,无法精确计算当管网排水能力恢复后地表积水进入管网的水量^[17-18]。本文基于 GPU 加速技术并耦合管网系统的高效高精度二维城市雨洪过程模型^[19],对西咸新区沣西新城某典型海绵建设小区在不同降雨重现期下径流控制率的变化规律进行模拟,以期对海绵城市 LID 建设效果评估提供理论依据。

1 数学模型及其求解方法

1.1 控制方程

模型地表产汇流部分采用考虑水文过程的二维水动力浅水方程(简称 SWEs)^[20],守恒性方程为

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x - C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -gh\partial z_b/\partial y - C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix}$$

式中: t 为时间; h 为水深; q_x 和 q_y 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速; \mathbf{f} 和 \mathbf{g} 分别为 x 、 y 方向上的通量矢量; \mathbf{S} 为源项矢量; i 为降雨强度; z_b 为底面高程;谢才系数 $C_f = gn^2/h^{1/3}$, n 为曼宁系数; g 为重力加速度。

地表水汇入雨水井的水量计算采用堰流公式:

$$Q = mb \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (2)$$

式中: Q 为地表水汇入管网的流量; m 为流量系数; b 为雨水井宽度。经过实际降雨与流量监测数据的验证,证明在研究区域内该公式具有良好的适用性。

管网模块采用扩散波方程计算管道流量,扩散波方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_T}{\partial x} = 0 \\ \frac{dQ_T}{dt} + gA \frac{d\eta}{dx} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 为管道过水断面面积; Q_T 为管道流量; x 为固定横截面沿流程的距离; $d\eta/dx$ 为水力坡降; S_f 为摩阻比降。

1.2 求解方法

在求解地表产汇流模块时,采用 Godunov 格式有限体积法离散 SWEs 方程,采用二阶 MUSCL 方法对变量值进行空间插值来提高计算精度^[21]。在控制单元内,界面上的物质与动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器进行求解。通过二步龙格-库塔方法来进行时间推进。引入 GPU 加速技术,在不降低精度的条件下大幅提升计算速度^[22]。在进行管网模块求解时,采用有限差分法对方程进行离散,将管道内的水流按照非恒定流形式进行计算,通过堰流公式计算地表雨水汇入雨水井的水量,通过求解扩散波方程计算管道流量,并且修正了雨水井出现负水深的情况,可以准确真实地反映排水系统的运行状态。

2 研究区域及基础数据

2.1 研究区域概况

陕西省西咸新区是国家第一批海绵试点城市之

一。研究区域多年平均降水量约 520 mm, 其中 5—10 月降水量最多, 7—9 月降水量最大。夏季降水多以暴雨形式出现, 易形成内涝。本文选取沣西新城天福和园小区为研究区域, 小区位于沣西新城天府路以南, 兴信路以西, 咸户路以东, 天雄西路以北 (图 1)^[23]。研究区内布设有透水铺装和雨水花园两种 LID 措施, 并安装有微气象站和流量监测仪器, 监测数据完善。

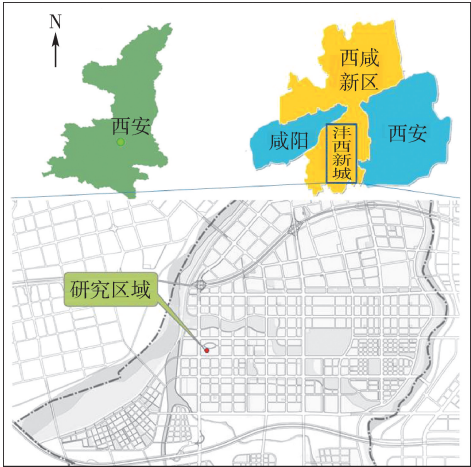


图 1 研究区域区位示意图

Fig. 1 Location map of study area

2.2 基础数据

2.2.1 降雨数据

采用根据咸阳市秦都区国家基本气象站近 30 年 (1981—2010 年) 的实测降雨资料分析得到的暴雨公式^[24]为

$$q_i = \frac{1239.91(1 + 1.9711 \lg T)}{(t + 7.4246)^{0.8124}} \quad (4)$$

式中: q_i 为设计暴雨强度; T 为重现期; t 为地面集水时间。利用暴雨公式和芝加哥雨型生成器得到不同重现期降雨, 峰值比例为 0.45, 降雨时长为 2 h, 文中降雨雨强均为降雨时程的平均雨强。选取的降雨重现期为 1 a、2 a、5 a、10 a、50 a 和 100 a, 降雨过程线如图 2 所示。

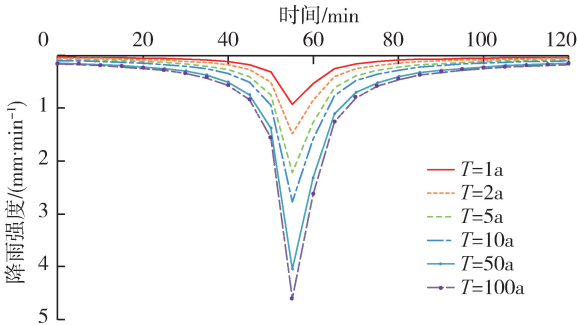


图 2 研究区域不同重现期降雨过程

Fig. 2 Rainfall processes of study area in different return periods

2.2.2 地形及管网数据

本文所用 DEM 数据是通过无人机机载激光雷达技术获取的 1 m 高精度地形数据, 高精度的地形能反映微观的地表特征, 能精确体现小区内 LID 措施的调蓄作用, 有效提高地表产汇流过程的准确性, 研究区域地形见图 3。

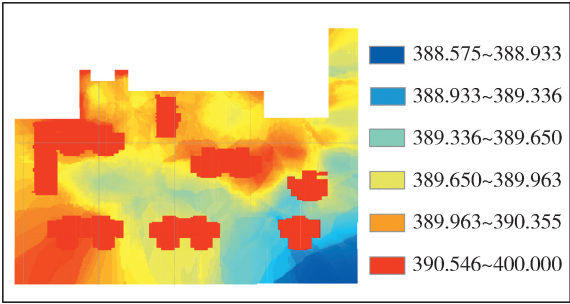


图 3 研究区域高程 (单位: m)

Fig. 3 DEM of study area (unit: m)

研究区域内主要的土地利用类型为 LID 设施、房屋、道路和绿地。小区内 LID 设施主要有雨水花园和透水铺装两种。土地利用类型分布如图 4 所示, 下渗率根据双环进行实地测量。在模拟时, 降雨强度大于绿地下渗率时, 产生径流; 而楼房在模拟时, 考虑其高程, 产生的径流由四周边界流入到相邻的区域。对于 LID 设施, 当土地类型为透水铺装时, 通过实验室实测透水铺装的下渗率来反映其相较于不透水道路的调蓄量; 对于雨水花园, 高精度地形可有效反映其调蓄深度与调蓄面积, 下渗率为利用双环测渗仪现场原位测量值, 可有效反映 LID 设施的调蓄量。在实际情况下, 在雨水花园末端会有溢流口, 溢流量进入管网排出, 处理时在有溢流口的雨水花园末端加管网节点。曼宁系数是径流过程的主要影响参数, 通过模型验证发现, 应用表中参数得到的西南排口流量过程的模拟结果与实测结果吻合较好, 表明模型可用于典型 LID 设施小区径流过程的模拟。管网分布资料由沣西新城管委会提供, 小区内管道为圆形, 各管道半径为实际值, 管道曼宁系数为 0.013。管网排口位于小区西南角, 外接市政管

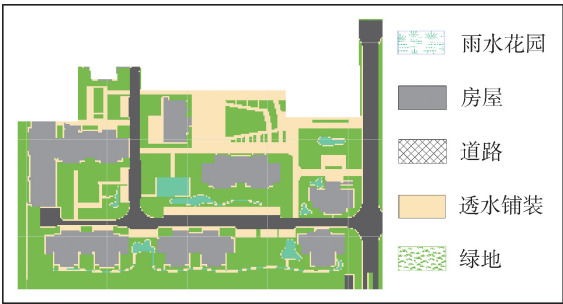


图 4 研究区域土地利用类型

Fig. 4 Land use type of study area

网,排口布设有流量计,用以监测排口出流流量过程。模型验证所应用的实测降雨来自天福和园内气象监测设备,流量数据来源于小区西南排口流量计。

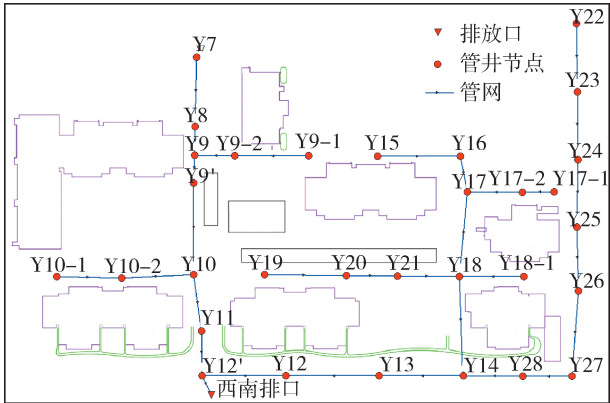


图5 研究区域管网布设
Fig.5 Pipe network layout of study area

3 模型验证与结果分析

3.1 模型验证

根据文献[25-27]及实地测量选取下垫面相关参数,并利用天福和园2017年8月20日降雨对所建模型进行验证,模拟使用的参数见表1,得到结果见图6。由图6可知,本文所建模型模拟的结果与实测的流量过程吻合较好,证明本模型适用于典型LID建成区径流的模拟。

表1 研究区域下垫面参数

土地利用类型	稳定下渗率/(mm·h ⁻¹)	糙率值
雨水花园	90.00	0.240
透水铺装	200.00	0.030
绿地	17.92	0.060
道路	0.00	0.015
房屋	0.00	0.014

为了对率定结果进行定量化评价,引入纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)作为模型率定和验证过程的评价标准,计算公式为

$$C_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i,obs} - Q_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \tag{5}$$

式中: C_{NSE} 为NSE值; $Q_{i,sim}$ 为模拟流量序列; $Q_{i,obs}$ 为实测流量序列; \bar{Q}_{obs} 为实测流量均值; N 为实测流量数据个数。

通过计算可得,2017年8月20日降雨NSE值为0.93,表明本文所用模型具有良好的适用性,所用参数合理。

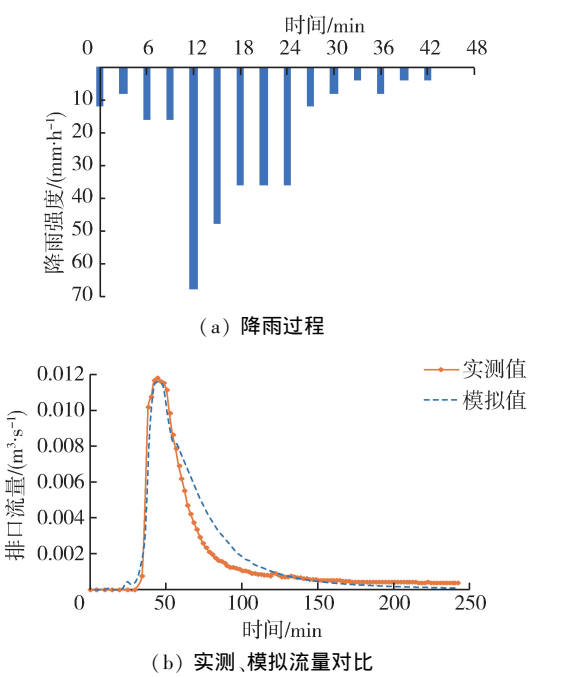


图6 8月20日降雨过程及实测、模拟流量对比
Fig.6 Comparison of rainfall process and measured-simulated discharge on 20, August

3.2 模拟结果与分析

降雨径流控制率可通过统计、计算获取,计算公式为

$$R_{AV} = \frac{P - V_o}{P} \times 100\% \tag{6}$$

式中: R_{AV} 为径流控制率; P 为研究区总降水量; V_o 为研究区对应降雨的外排总水量。

研究区为封闭区域,为研究径流控制率随降雨重现期的变化规律,在模拟时,利用耦合了管网模块的二维城市雨洪过程模型,输入地形、下垫面以及小区管网数据,模型模拟过程中采用闭边界,四周无入流,初始地表无积水,库朗数(CFL)设定为0.5。在模拟时,发现当降雨重现期为100a且时长为2h时,模拟时长到10h左右,排口流量为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,故为了充分排空管网的水量,本文在模拟时选用模拟时长为12h。当重现期较大管网产生溢流时,溢流出的水量进入地表计算,当管网具有排水能力时,再进入管网进行计算。对不同降雨重现期条件下的径流过程进行数值模拟,并根据模拟所得管网外排水量计算径流控制率,结果见表2。

根据模拟结果数据利用回归分析的方法对降水量和径流控制率关系分别进行线性、二次、三次以及指数函数曲线拟合,得到径流控制率与降水量的函数关系如式(7)~(10)所示,其中式(7)为线性函数拟合(图7),其确定系数 R^2 为0.944;式(8)(9)分别为二次、三次函数拟合,其 R^2 分别为0.996和0.998;式(10)为指数函数拟合, R^2 为0.988。

表2 不同降雨重现期条件下研究区径流控制率

Table 2 Runoff control rate of study area
under different rainfall return periods

降雨重 现期/a	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降水总 量/m ³	排出水 量/m ³	径流控 制率/%
1	17.50	642.99	112.66	82.48
2	27.89	1024.73	300.71	70.65
5	41.61	1528.83	697.48	54.38
10	51.99	1910.22	1026.88	46.24
50	76.10	2796.10	1838.73	34.24
100	86.48	3177.60	2241.39	29.46

$$R_{AV} = -0.007q + 0.925 \quad (7)$$

$$R_{AV} = 0.00006149q^2 - 0.014q + 1.019 \quad (8)$$

$$R_{AV} = 0.0000003836q^3 + 0.000005222q^2 - 0.012q + 1.008 \quad (9)$$

$$R_{AV} = 0.9980628896576838e^{-0.01362629505513258q} \quad (10)$$

式中 q 为降雨强度。

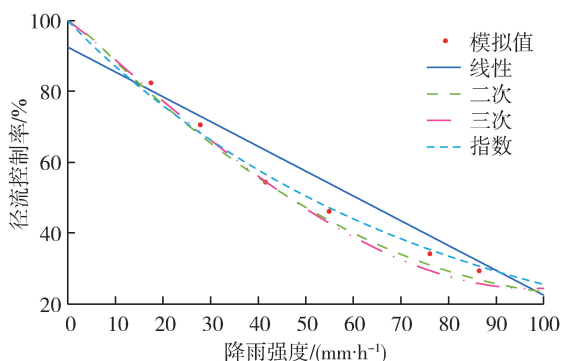


图7 降雨强度与径流控制率拟合函数

Fig. 7 Fitting function of rainfall intensity
and runoff control rate

由图7可见,本研究降雨强度与径流控制率模拟结果使用三次函数决定系数更高,更加符合结果所表征的关系。所有的拟合函数均揭示了径流控制率与雨强呈负相关关系,与实际情况相符。

通过对天福和园小区径流控制率随降雨重现期变化的模拟,发现在重现期增大时,降水量增大,海绵措施及绿地通过下渗控制的水量减少,更多的径流通过排水管网排出,故随着重现期的增大,径流控制率从1年一遇的82.5%逐渐减小到100年一遇的29.4%;在较小重现期,即降雨重现期小于10a时,重现期增大时,降雨强度变化较大,径流控制率随重现期的变化较大。当降雨重现期大于10a时,相较于较小重现期条件,降雨强度远超管网设计标准,LID措施下渗逐渐饱和,对径流控制效果有所减弱,径流控制率随降雨重现期的增大变化趋于平缓,从1年一遇到10年一遇,径流控制率减小36.4%,从10年一遇到100年一遇,径流控制率减小16.7%。

4 结 论

a. 所应用的耦合管网系统的二维城市雨洪过程模型适用于海绵城市径流控制率的模拟评估,模拟精度较高,对于海绵城市建设模拟评估有借鉴意义。

b. 天福和园小区径流控制率的模拟表明,随着降雨重现期的增大,径流控制率逐渐减小,当降雨重现期为1a时,径流控制率为82.5%,降雨重现期为100a时,径流控制率为29.4%。

c. 在降雨重现期较小时,降雨重现期的变化对径流控制率影响较大,如当降雨重现期从1a变化为10a时,径流控制率减小36.4%。当降雨重现期较大时,径流控制率随降雨重现期的增大逐渐趋于平缓,如重现期从10a增长到100a时,径流控制率只降低16.7%。

d. 根据模拟结果,采用回归分析的方法得到不同降雨重现期降雨强度与径流控制率的拟合关系,拟合函数表明降雨强度与径流控制率呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 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 Zongxue, CHENG Tao. 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))
- [2] 邢国平,孙皎,董岩,等. 城市内涝防治措施的转变及启示:由“排”到“蓄”再到“渗”[J]. 安全与环境学报, 2014,14(5):141-145. (XING Guoping, SUN Jiao, DONG Yan, et al. Change and revelation of urban waterlogging control measures: from drainage to storage and then to infiltration[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5):141-145. (in Chinese))
- [3] 杜新强,贾思达,方敏,等. 海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应[J]. 水资源保护,2019,35(2):13-17. (DU Xinqiang, JIA Sida, FANG Min, et al. Recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 13-17. (in Chinese))
- [4] 姜立晖,程小文. 低冲击开发模式解决城市雨洪[J]. 中国减灾, 2010(17): 32-33. (JIANG Lihui, CHENG Xiaowen. Low impact development for urban stormwater and flood control[J]. Disaster Reduction in China, 2010(17):32-33. (in Chinese))
- [5] 仇保兴. 复杂科学与城市规划变革[J]. 城市规划, 2009,33(4):11-26. (QIU Baoxing. Complicated science

- and urban planning reform [J]. City Planning Review, 2009, 33(4): 11-26. (in Chinese))
- [6] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 793-799. (in Chinese))
- [7] 汤鹏,王浩. 基于 MCR 模型的现代城市绿地海绵体适宜性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 116-122. (TANG Peng, WANG Hao. Analysis on the suitability of green sponge space in modern city based on MCR model[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(3): 116-122. (in Chinese))
- [8] COLSTON N V. Characterization and treatment of urban land runoff[J]. Runoff, 1974, 1: 11-15.
- [9] 侯爱中,唐莉华,张思聪. 下凹式绿地和蓄水池对城市型洪水的影响[J]. 北京水务, 2007(2): 42-45. (HOU Aizhong, TANG Lihua, ZHANG Sicong. Impacts of sunken lawn and storage pond on urban flood[J]. Beijing Water, 2007(2): 42-45. (in Chinese))
- [10] MARLÈNE V D S, ATAUR R, GARRY R. Modeling of a lot scale rainwater tank system in XP-SWMM: a case study in Western Sydney, Australia [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 141: 177-189.
- [11] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese))
- [12] 张曼,周可可,张婷,等. 城市典型 LID 措施水文效应及雨洪控制效果分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 57-71. (ZHANG Man, ZHOU Keke, ZHANG Ting, et al. Hydrological effects and stormwater control effects of urban typical LID measures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 57-71. (in Chinese))
- [13] LAVRENT A, RANISH S. Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 81-91.
- [14] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 13-19. (in Chinese))
- [15] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [16] 刘家宏,丁相毅,邵薇薇,等. 不同水文年型海绵城市径流总量控制率特征研究[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1072-1077. (LIU Jiahong, DING Xiangyi, SHAO Weiwei, et al. Characteristics of total runoff control rate of sponge cities for different hydrological year types [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9): 1072-1077. (in Chinese))
- [17] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [18] 刘志峰,陈晨. 基于 SWMM 的大型地下建筑绿色屋顶低影响开发应用研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 165-173. (LIU Zhifeng, CHEN Chen. A study on the application of low impact development of green roof in large underground buildings based on SWMM [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(6): 165-173. (in Chinese))
- [19] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 96-107. (in Chinese))
- [20] HOU J, ÖZGEN I. A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System [J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 375-391.
- [21] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.
- [22] HOU J, LIANG Q, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. Computers & Fluids, 2013, 82(17): 132-147.
- [23] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 45-55. (in Chinese))

(下转第 105 页)

- Yang, WU Penglin. Evaluation of water resources sustainability based on DPSIR-PCA model in Shanxi Province[J]. Yellow River, 2019, 41 (4): 42-45. (in Chinese))
 - [14] 胡林凯,崔东文. 基于 SBO-PP 模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济, 2017, 35(5): 7-11. (HU Linkai, CUI Dongwen. Evaluation model for sustainable development capacity of water resources based on SBO-PP model and its application[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5): 7-11. (in Chinese))
 - [15] 马海良,李珊珊,侯雅如. 河北省城镇化与水资源系统的耦合协调及预测[J]. 水利经济, 2017, 35(3): 37-41. (MA Hailiang, LI Shanshan, HOU Yaru. Coupling coordination and forecast of urbanization and water resource system in Hebei Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(3): 37-41. (in Chinese))
 - [16] 刘晓,王红瑞,俞淞,等. 南水北调进京后的北京市水资源短缺风险研究[J]. 水文, 2015, 35(4): 55-61. (LIU Xiao, WANG Hongrui, YU Song, et al. Study on water resources risk in Beijing after "South-North Water Transfer" Project[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(4): 55-61. (in Chinese))
 - [17] 刘江侠. 北京市未来供水保障方案探讨[J]. 海河水利, 2018(3): 4-7. (LIU Jiangxia. Discussion on Beijing's future water supply protection plan [J]. Haihe Water Resources, 2018(3): 4-7. (in Chinese))
 - [18] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability index for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(5): 381-390.
 - [19] HASHIMORO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
 - [20] 刘大根,赵建世. 特大城市水资源系统可持续性分析: 以北京市为例[J]. 中国水利, 2017(23): 24-28. (LIU Dagen, ZHAO Jianshi. Evaluation of sustainability of water resources system of megacities: a case study of Beijing Municipality[J]. China Water Resources, 2017(23): 24-28. (in Chinese))
 - [21] 刘呈玲,方红远,刘志辉. 改进的灰色预测模型在区域用水总量预测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 57-62. (LIU Chengling, FANG Hongyuan, LIU Zhihui. Application of grey system model in prediction of regional water consumption [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 57-62. (in Chinese))
 - [22] 王西琴,张远. 中国七大河流水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 500-506. (WANG Xiqin, ZHANG Yuan. The allowable exploitation rate of rivers water resources of the seven major rivers in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 500-506. (in Chinese))
 - [23] 钱正英. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
 - [24] 李伟,程利涛. 一种改进的快速 K-近邻分类方法[J]. 现代计算机: 专业版, 2015(35): 14-17. (LI Wei, CHENG Litao. An improved speeding K-nearest neighbor classification method [J]. Modern Computer, 2015(35): 14-17. (in Chinese))
 - [25] 苏心玥,于洋,赵建世,等. 南水北调中线通水后北京市辖区水资源配置的博弈均衡[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(2): 239-251. (SU Xinyue, YU Yang, ZHAO Jianshi, et al. Game analysis of trans-regional water resources allocation in Beijing [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(2): 239-251. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-09-05 编辑: 熊水斌)

+++++

(上接第 98 页)

 - [24] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 37-45. (CHEN Guangzhao, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, et al. Xixian New Area numerical simulation of rainfall spatial inconsistency effects on flood inundation process [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 37-45. (in Chinese))
 - [25] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 13-18. (in Chinese))
 - [26] 王兴桦,侯精明,李丙尧,等. 多孔透水砖下渗衰减规律试验研究[J]. 给水排水, 2019, 55(增刊 1): 68-71. (WANG Xinghua, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Experimental research on the law of permeability decline of porous permeable bricks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(Sup 1): 68-71. (in Chinese))
 - [27] 侯精明,李钰茜,同玉,等. 植草沟径流调控效果对关键设计参数的响应规律模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 18-28. (HOU Jingming, LI Yuxi, TONG Yu, et al. Simulation of response law for control effect of runoff control at grass swale to key design parameters [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 18-28. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-12-30 编辑: 王芳)