

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.019

基于SWMM的LID设施空间格局优化模拟研究

杜颖恩¹, 侯精明¹, 马红丽², 刘祺超³, 王兴桦¹, 张兆安¹, 陈光照¹

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

2. 鄂尔多斯市水利勘测设计院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 3. 北京首创股份有限公司, 北京 100044)

摘要: 为研究LID设施空间格局对径流控制和雨水径流污染负荷的影响,以雨水花园为例,采用SWMM构建的城市雨洪过程模型进行数值模拟,根据雨水花园在研究区汇水面上、中、下游区布设位置的不同来拟定优化方案,计算不同设计降雨重现期下雨水花园不同空间格局对径流调控和雨水径流污染负荷削减的提升效果。结果表明:①对于3种方案,径流总量控制率与设计降雨重现期呈负相关,将雨水花园布设在下游时,对径流总量控制率的提升效果最好;②在不同设计降雨重现期下,不同优化方案均对雨水径流污染负荷具有一定的调控效果,且雨水花园位于下游时对雨水径流污染负荷的净化效果最好,雨水花园对TSS和COD的削减效果整体要好于对NH₃-N和TP的削减效果。

关键词: LID设施空间格局优化; SWMM模型; 径流总量控制率; 雨水径流污染负荷削减率; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0120-06

Spatial Pattern Optimization of LID Facility Based on SWMM

DU Ying-en¹, HOU Jing-ming¹, MA Hong-li², LIU Qi-chao³, WANG Xing-hua¹,
ZHANG Zhao-an¹, CHEN Guang-zhao¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Ordos Water Conservancy Survey and Design Institute, Ordos 017000, China; 3. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: To investigate the influence of LID facilities spatial pattern on runoff control rate and rainwater runoff pollution load, an urban stormwater process model established by SWMM was used for numerical simulation in a rain garden. According to the different locations of the rain gardens at the upstream, midstream and downstream of the catchment surface, the optimization schemes were formulated, and the effects of different spatial patterns of the rain gardens on the runoff control and rainwater runoff pollution load reduction under different return periods were calculated. For the three

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609199); 国家十三五重大研发专项(2016YFC0402704); 陕西省国际科技合作交流计划项目(2017KW-014); 西咸新区沣西新城海绵城市基础研究资金资助项目(2018610002000097); 海绵城市建设效果关键指标数值模拟研究项目(2017-HMKT-01)

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

schemes, the total runoff control rate was negatively related to the return periods of the design rainfall, and the rain garden located downstream had the best improvement effect on the total runoff control rate. Under different design rainfall return periods, different optimization schemes had certain regulation effect on the rainwater runoff pollution load, and the rain garden located downstream had the best purification effect on the rainwater runoff pollution load. In addition, the reductions of TSS and COD were better than those of $\text{NH}_3 - \text{N}$ and TP in the rain garden as a whole.

Key words: spatial pattern optimization of LID facilities; SWMM; total runoff control rate; reduction rate of rainwater runoff pollution load; numerical simulation

随着我国城市化进程的加快,地面硬化率提高,城市内涝现象频发,水污染也愈发严重^[1-2]。目前,对于治理城市雨洪问题,传统的解决方式主要以“快排”为主^[3],这难免造成雨水资源的浪费以及污染物在水中的富集。基于低影响开发(LID)理念的海绵城市的发展,为缓解城市雨洪和水质问题提供了新途径。低影响开发设施的类型不同,其功效和作用机理也不同,为满足经济-效益最大化,低影响开发设施布设的优化研究就显得格外重要。

低影响开发技术是20世纪90年代末由美国提出,并首先在美国东部的马里兰州开始实施的一项雨洪管理技术^[4]。作为一种新的雨洪管理措施,LID倡导“源头控制,分散治理”的理念,通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施来实现对雨水的吸收消纳和净化利用^[4]。目前,关于LID的优化研究,王婷等人^[5]利用SWMM模型研究了在不同设计暴雨条件下,不同LID占比(0.1%~15%)对径流控制的影响,寻求最佳布设比例;Eckart等人^[6]开发了耦合优化-模拟模型,采用SWMM模型对不同类型的LID组合方案进行研究;黄铁兰等人^[7]利用ArcGIS和SWMM模型来搭建城市雨洪管理模型,通过模拟不同设计降雨条件下地表径流和管道溢流的结果,来预估所研究LID设施的经济-效益成本,再结合研究小区实际状况,通过调整LID的组合类型达到综合布局的优化;章双双等人^[8]采用线性归一化法和最优化目标函数确定不同设施占比的最优化方案,耦合SWMM模型与最优化目标函数,计算出城市化区域不同LID设施占比的经济-效益最优解。由此可见,SWMM模型能较好地模拟LID措施的建设效果和水质变化。关于LID措施的优化研究多数学者致力于对LID面积占比以及组合类型的优化,但此类优化的实施会导致建设成本增加,笔者主要研究了LID设施组合类型及面积占比不变的情况

下,LID设施不同空间位置对LID措施建设效果的影响,并结合模拟结果得到关于不同空间位置的LID布设优化方案。

为了研究LID设施空间格局对径流控制和雨水径流污染负荷的影响,笔者采用SWMM模型,以雨水花园为例,利用不同重现期的设计降雨数据,以西咸新区沣西新城的天福和园小区为研究对象进行模拟,分析不同空间格局的雨水花园建设效果,研究不同空间格局的雨水花园布设对径流控制和雨水径流污染负荷的影响规律,旨在为LID设施布设规划提供借鉴。

1 研究方法

SWMM模型是一种基于水动力学可以用来模拟降雨、下渗、地表漫流以及管网排水系统的动态模拟模型。本次模拟区域为城市流域,经实测,研究区下渗规律近似为霍顿下渗过程,因此产流过程的下渗模型采用霍顿下渗公式进行计算,模型的汇流过程采用非线性水库法。SWMM中管网计算方法有稳定流、动力波和运动波3种,其中动力波法计算结果最为精确,且本研究需要添加LID设施,管道流态存在非均匀流,因此管网计算采用动力波法^[9]。水质模拟时,根据不同土地利用的污染物累积模型与污染物冲刷模型进行计算,本研究选用幂函数累积模型和指数冲刷模型^[10]。通过数值模拟评定方案效果,进而得出LID措施的空间位置对径流控制和雨水径流污染负荷的影响规律。

2 模型构建

2.1 研究区概况

沣西新城属温带大陆性季风气候区,年均气温为13.6℃,冷热适中,月均气温最高为26.8℃、最低为-0.5℃;年均湿度较大,降雨多集中在7月—9月,降雨量可达全年的一半,根据历史记载,多呈现暴雨,极易致涝。

2.2 SWMM 模型构建

2.2.1 模型建立

天福和园小区是沔西新城海绵建设试点小区之一,小区布设有气象站、流量计等监测设备,且具有长历时的实测资料。SWMM 模型的输入条件一般包括降雨(或入流)资料、子汇水分区的相关参数(包括面积、特征宽度、不透水占比等)和管网资料等,根据沔西新城管委会所提供的管网和小区的 LID 布置图对小区进行 SWMM 模型中管网和低影响开发设施的布置,并进行土地利用划分(见图 1),主要分为房屋、雨水花园、绿地、道路、透水铺装,总面积分别为 16 076、3 030、24 339、9 210、7 618 m²,占比分别为 26.67%、5.03%、40.38%、15.28%、12.64%。根据天福和园小区实际资料,将小区概化为 140 个子汇水区域、50 个排水管段、2 个排口,子汇水走向根据实际地形走势进行搭建,概化模型如图 2 所示。

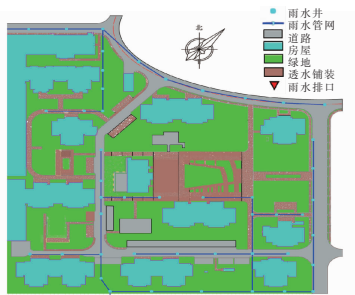


图 1 研究小区土地利用及管网布置

Fig. 1 Land use and pipe network layout of study area

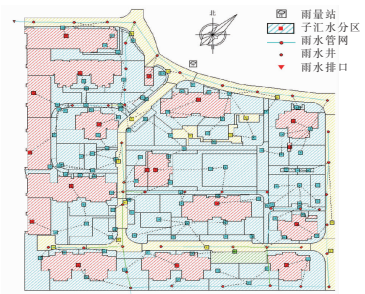


图 2 SWMM 模型概化结果

Fig. 2 Generalization result by SWMM model

2.2.2 参数率定

在 SWMM 建模过程中,会涉及诸多参数的设定,这些参数可分为测量得到的确定参数和需要率定的不确定参数^[9]。根据该研究区 2017 年 8 月 20 日和 9 月 9 日以及 2018 年 4 月 12 日的 3 场实测降雨数据以及小区西南排水口的实测流量过程来对模

型进行参数率定。对于城市小区而言,地形起伏较小,故子汇水区平均坡度取值 0.5%,根据文献[9]和[11]以及 PCSWMM 模型手册,主要的敏感参数率定取值结果见表 1。该小区的主要污染物类型为 COD、TSS、TP 和 NH₃-N,其中当地直接降雨的雨水污染物浓度分别为 46、58、0.17、4.5 mg/L,相关参数的设置如表 2 所示。

表 1 模型参数率定结果

Tab. 1 Calibration of model parameters

项 目	物理意义	参考范围	率定结果
S - Imperv/mm	不透水地面洼蓄量	1 ~ 3	3
S - Perv/mm	透水地面洼蓄量	3 ~ 10	7.5
Max Rate/(mm · h ⁻¹)	初始下渗能力	10 ~ 100	65
Min Rate/(mm · h ⁻¹)	稳定下渗能力	0 ~ 10	3.1
Decay	下渗能力衰减指数	0 ~ 7	7
N - Perv	透水区域曼宁系数	0.1 ~ 0.3	0.2
N - Imperv	不透水区域曼宁系数	0.001 ~ 0.015	0.006
Roughness	管道曼宁系数	0.001 ~ 0.4	0.017

表 2 土地利用类型对应的模型参数设置

Tab. 2 Model parameter setting corresponding to land use type

项目	参数	TSS	COD	NH ₃ -N	TP
绿地	最大增长率/(kg · km ⁻²)	65	55	5	1.2
	速率常数/d ⁻¹	11	11	11	11
	冲刷系数	0.004 5	0.005	0.001 3	0.002
	径流指数	1.25	1.25	1.25	1.25
	清洁效率/%	0	0	0	0
房屋	最大增长率/(kg · km ⁻²)	145	75	3	0.6
	速率常数/d ⁻¹	11	11	11	11
	冲刷系数	0.009	0.005	0.002 5	0.003
	径流指数	1.4	1.4	1.4	1.4
	清洁效率/%	0	0	0	0
道路	最大增长率/(kg · km ⁻²)	275	175	4	0.7
	速率常数/d ⁻¹	11	11	11	11
	冲刷系数	0.015	0.01	0.002 5	0.003
	径流指数	1.8	1.8	1.8	1.8
	清洁效率/%	0	0	0	0

2.2.3 模型验证

由于该小区缺乏水质监测,本研究仅通过排口流量过程进行模型验证。依据国家关于水文水情模拟相关规范的要求,水文模拟需要对模型的拟合效果做出定量评价,本研究采用 Nash - Sutcliffe 系数

(NSE)评价模型的精度,并以 $NSE \geq 0.5$ 作为模型率定的最低值,该系数的计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{ip} - q_{im})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{ip} - \bar{q_p})^2} \quad (1)$$

式中: q_{ip} 为实测流量序列; q_{im} 为模拟流量序列; N 为实测流量数据个数; $\bar{q_p}$ 为实测流量均值。

文中实测流量序列和降雨数据均来自“西咸新区海绵城市综合管理平台”,模拟流量序列为SWMM模拟计算结果,这3场降雨根据式(1)求得的NSE系数见表3,模型率定及验证结果见图3。

表3 实测降雨序列的模型率定效果

Tab.3 Model calibration effect of measured rainfall sequence

降雨日期	降雨历时/min	降雨量/mm	NSE
2017-08-20	96	21.6	0.83
2017-09-09	960	12.0	0.94
2018-04-12	1 680	20.6	0.66

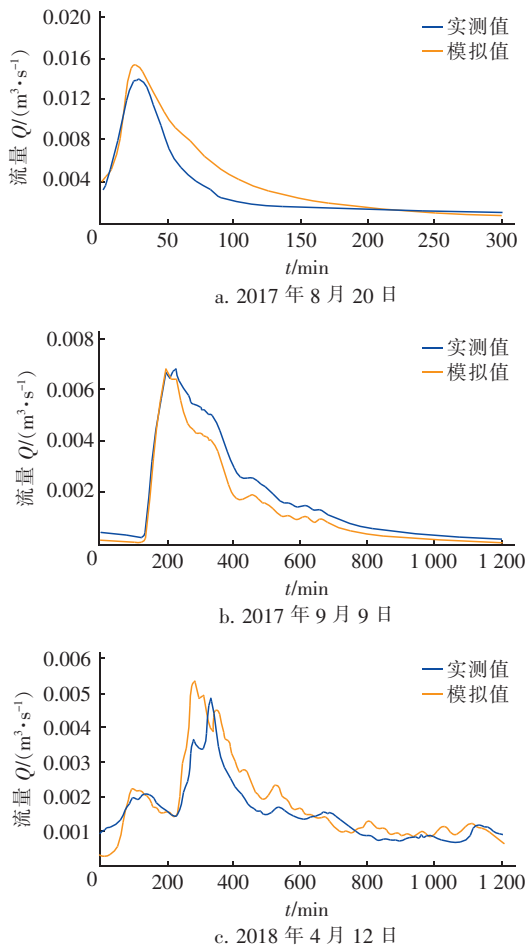


图3 模型率定及验证结果

Fig.3 Calibration and verification results of model

率定结果表明,所构建的SWMM模型对3场降雨径流过程的模拟结果与实测数据的NSE系数分别为0.83、0.94和0.66,均大于0.5,证明所建模型能较好地模拟研究区产汇流过程。

3 优化方案及模拟结果

3.1 优化方案拟定

采用控制单一变量的方法,在维持小区原有雨水花园总面积不变的情况下,仅针对雨水花园布设空间位置对径流控制率的影响进行研究。小区的管网是按照地形走势由高到低布设,经查阅相关文献^[12],本研究根据小区实际地形由高到低的走势将小区分为上、中、下游区,将雨水花园布设在不同区段进而得到不同的优化方案:①雨水花园集中布设在上游区的绿地之内;②雨水花园集中布设在中游区的绿地之内;③雨水花园集中布设在下游区的绿地之内。该小区有两条主管线,因此上、中、下游区的划分也分两部分进行,见图4。

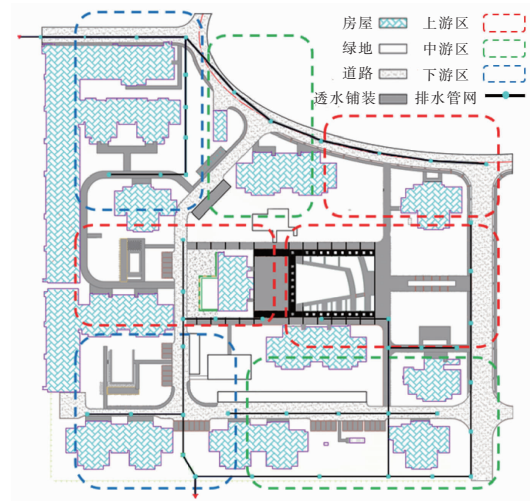


图4 研究区段划分

Fig.4 Segmentation of study area

采用沔西新城重现期分别为1、2、5、10、20、50年的设计降雨作为降雨数据并输入已率定的SWMM模型,分别计算不同优化方案下的径流控制率和污染物削减率。根据文献[9],暴雨雨型选用芝加哥雨型,降雨历时采用120 min,峰值比例为0.3,暴雨公式为:

$$q = \frac{1\,239.91 \times (1 + 1.971 \lg P)}{(t + 7.424\,6)^{0.812\,4}} \quad (2)$$

式中: q 为降雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为重现期,年; t 为降雨历时, min。

计算得到不同重现期的暴雨强度过程线见图 5。

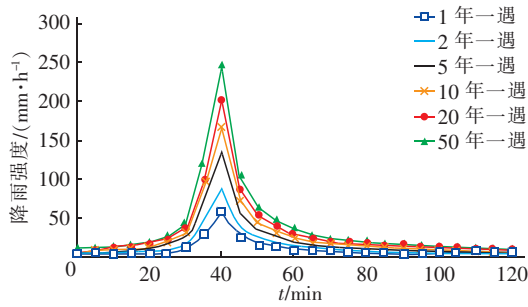


图 5 研究区不同重现期的设计暴雨

Fig. 5 Design rainstorm of different return periods in study area

3.2 模拟结果分析

3.2.1 径流调控模拟结果分析

根据以上 3 个优化方案分别进行模型设定,计算不同重现期下的径流控制率,结果如表 4 所示。

表 4 不同重现期下径流调控模拟结果

Tab. 4 Simulation results of runoff regulation under different return periods

重现期/年	1	2	5	10	20	50
径流控制率/%						
上游	78.94	71.55	62.58	56.32	51.05	45.79
中游	81.56	74.23	66.18	60.57	55.72	50.87
下游	84.68	78.22	70.27	64.59	59.72	54.79

由模拟结果可知,不同重现期下,3 种方案下的径流控制率均随着重现期的增大而减小,且这种变化趋势随着重现期的增大而逐渐趋于平稳;同一设

表 5 不同重现期下污染负荷削减率模拟结果

Tab. 5 Simulation results of pollution load reduction rate under different return periods

重现期/年	TSS 削减率/%			COD 削减率/%			NH ₃ -N 削减率/%			TP 削减率/%		
	上游	中游	下游	上游	中游	下游	上游	中游	下游	上游	中游	下游
1	84.37	90.79	93.32	84.15	90.32	92.60	47.60	52.26	54.78	40.87	44.99	47.28
2	68.61	71.29	76.20	70.83	72.92	77.23	28.20	30.14	33.10	22.86	24.49	26.94
5	45.40	48.90	52.13	52.80	55.30	57.41	18.21	20.03	21.78	14.72	16.21	17.64
10	33.48	35.22	39.06	42.94	43.16	45.90	15.25	16.15	18.03	12.50	13.25	14.80
20	26.26	29.01	31.28	35.84	37.23	37.96	13.49	14.77	15.80	11.23	12.29	13.15
50	20.72	23.44	26.01	28.64	29.97	31.05	11.59	12.72	13.77	9.81	10.79	11.68

4 结论

以 SWMM 数值模型为基础,在模型可靠的前提下对天福和园小区雨水花园的空间位置进行了优化设计,在不同设计降雨重现期条件下进行模拟,得到以下结论:

① 对于 3 种方案,径流控制率与设计降雨重现期呈负相关,其中将雨水花园布设在下游时,对径流总量控制率的提升效果最好。

计降雨重现期下,雨水花园布设在上、中、下游区的径流控制效果依次变好,布设在中游的径流控制率较布设在上游提升了 2.62% ~ 5.08%,布设在下游的径流控制率较布设在上游提升了 5.74% ~ 9.00%。因此,在小区建设规划之前或是低影响开发改造时,建议根据小区实际地形走势,优先将雨水花园布设在下游地区,增大雨水地表漫流汇入雨水花园的水量,使雨水花园的作用发挥得更充分,在不增加雨水花园总建造成本的情况下,使得径流控制率达到最大,既经济又高效。

3.2.2 水质调控模拟结果分析

根据既定模型,不同重现期下污染负荷削减率模拟结果如表 5 所示。可知,随着重现期的增大,对 4 种污染物的削减效果逐渐减弱,对 4 种污染物的控制效果排序为 TSS > COD > NH₃-N > TP;在相同设计降雨重现期下,3 种方案对研究区总体的污染物负荷均有一定削减效果,其中雨水花园布设在下游的削减效果最好,布设在上游的削减效果最差,布设在中游对各污染物的削减效果较上游分别提升了 1.74% ~ 6.42%、0.22% ~ 6.17%、0.90% ~ 4.66%、0.75% ~ 4.12%,布设在下游对各污染物的削减效果较上游分别提升了 5.01% ~ 8.95%、2.12% ~ 8.45%、2.18% ~ 7.18%、1.87% ~ 6.41%。由此可见,雨水花园对于这 4 种污染物具有较好的削减效果,可以有效改善小区排放水质。

② 在不同设计降雨重现期下,不同优化方案均对水质具有一定的调控效果,且雨水花园位于下游时对水质的净化效果最好;雨水花园对 TSS 和 COD 的削减效果整体要优于对 NH₃-N 和 TP 的削减效果。

③ 关于小区雨水花园的布设应结合实际地形走势,着重考虑修建在下游地区,使其更加充分地发挥作用,实现成本-效益最大化。

本研究未考虑低影响设施在上、中、下不同区域组合分布的情况,在未来的研究中将其加入优化考虑,使优化方案更加合理。

参考文献:

- [1] 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 Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, *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).
- [2] 李家科,李怀恩,董雯,等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估算[J]. 水利发电学报,2012,31(4):131-138.
LI Jiak, LI Huai'en, DONG Wen, *et al.* Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 131-138 (in Chinese).
- [3] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. 给水排水,2015,41(6):1-7.
ZHANG Linwei. An introduction to sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(6): 1-7 (in Chinese).
- [4] 谭琪,丁芹. 低影响开发技术理论综述及研究进展[J]. 中国园艺文摘,2014(3):54-56,94.
TAN Qi, DING Qin. Summary and research progress of low impact development technology theory [J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2014 (3): 54-56, 94 (in Chinese).
- [5] 王婷,刁秀媚,刘俊,等. 基于SWMM的老城区LID布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):39-43,128.
WANG Ting, DIAO Xiumei, LIU Jun, *et al.* Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 39-43, 128 (in Chinese).
- [6] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 564-576.
- [7] 黄铁兰,刘志航,柯锦灿. 基于暴雨管理模型的广州某城市住区的低影响开发规划[J]. 人民珠江,2018,39(8):99-105.
HUANG Tielan, LIU Zhihang, KE Jincan. Planning of low impact development of an urban residential district in Guangzhou based on SWMM [J]. Pearl River, 2018, 39(8): 99-105 (in Chinese).
- [8] 章双双,潘杨,李一平,等. 基于SWMM模型的城市化区域LID设施优化配置方案研究[J]. 水利水电技术,2018,49(6):10-15.
ZHANG Shuangshuang, PAN Yang, LI Yiping, *et al.* SWMM model-based study on optimal allocation of LID facilities in urbanized region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6): 10-15 (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 潘璐. 武汉典型校区降雨径流污染特征及污染负荷研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2018.
PAN Lu. Study on Rainfall Runoff Pollution Characteristics and Pollution Load in Typical Campus in Wuhan [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] 蒋元勇,丰锴斌,刘学文,等. 城市雨洪SWMM模型的敏感参数研究综述[J]. 生态科学,2015,34(2):194-200.
JIANG Yuanyong, FENG Kaibin, LIU Xuewen, *et al.* Summary of sensitive parameters SWMM model of urban stormwater [J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 194-200 (in Chinese).
- [12] 齐文超,侯精明,刘家宏,等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J]. 水力发电学报,2018,37(9):8-18.
QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, *et al.* Lake control on surface runoff causing urban flood inundation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9): 8-18 (in Chinese).

作者简介:杜颖恩(1997-),男,河南伊川人,硕士研究生,研究方向为城市水力学。

E-mail:103411272@qq.com

收稿日期:2020-01-12

修回日期:2020-06-05

(编辑:任莹莹)