

# LID与传统开发模式下雨水管渠运行状态对比研究

许萍<sup>1</sup>, 任恒阳<sup>1</sup>, 徐慧纬<sup>2</sup>, 何俊超<sup>3</sup>, 张雅君<sup>1</sup>, 任心欣<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学水环境国家级实验教学示范中心 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 住房和城乡建设部 城乡规划管理中心, 北京 100835; 3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 4. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东 深圳 518028)

**摘要:** 以深圳市光明新区门户区为研究区域,采用SWMM模拟不同重现期下低影响开发(LID)模式和传统开发模式下的雨水管网运行情况,分别从管渠水深、节点溢流、径流总量和峰值流量、径流系数等方面分析LID对区域雨水管渠运行状态的影响。结果显示:与传统开发模式相比,LID模式下各节点的最大水深可降低0.20~0.95 m,峰值流量可降低62.7%~67.5%,峰值延迟时间最大可达11 min;在1~10年重现期下管网节点均未发生溢流情况,总出口断面的径流总量削减率为39.3%~50.5%,径流系数均控制在0.5以内。

**关键词:** 低影响开发; 传统开发模式; 雨水管渠; 运行参数; SWMM

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0127-06

## Comparison of Stormwater Sewer Running State between LID and Traditional Development Mode

XU Ping<sup>1</sup>, REN Heng-yang<sup>1</sup>, XU Hui-wei<sup>2</sup>, HE Jun-chao<sup>3</sup>, ZHANG Ya-jun<sup>1</sup>,  
REN Xin-xin<sup>4</sup>

(1. National Demonstration Center for Experimental Water Environment Education, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Administration Center of Urban-Rural Planning, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100835, China; 3. China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China; 4. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China)

**Abstract:** SWMM was used to simulate the rainwater sewer operation of low impact development (LID) mode and traditional development mode under different return periods in Menhu District of Shenzhen Guangming New District. The impact of LID technology on the running status of the stormwater sewer was analyzed from water depth of the sewer, node overflows, runoff volume, peak flow and runoff coefficient respectively. The results showed that, compared with the traditional development mode, the maximum depth of each node and peak flow under LID mode were reduced by 0.20-0.95 m and 62.7%-67.5% respectively. In addition, peak latency was up to 11 min after using LID technology. No overflow occurred at the pipe network nodes under 1-10 years return periods. Moreover, the reduction rate of

outlet runoff volume was 39.3% – 50.5% , and the runoff coefficient was controlled within 0.5.

**Key words:** low impact development; traditional development mode; stormwater sewer; operation parameter; SWMM

低影响开发(LID)作为源头减排技术在海绵城市建设中应用较多,可以通过硬质工程软质化使场地开发前后的水文特征基本维持不变,在气候调节、雨水控制、水质净化、地下水补给、环境美化、栖息地保护等方面效果显著<sup>[1]</sup>。同时 LID 在源头对径流进行渗透、滞蓄和净化,可以达到控制径流总量、削减峰值流量、延迟径流时间的效果<sup>[2,3]</sup>,研究人员提出在 LID 应用的基础上应加强城市雨水管渠建设,提高城市排水能力,在采用 LID 时要注意“微排水-小排水-大排水”系统的设计衔接<sup>[4,5]</sup>。因此,在 LID 模式下,探究雨水管渠运行状态的变化,进而达到优化城市雨水管渠系统的目的,还需要对 LID 模式下雨水管渠的运行进行系统深入的研究。笔者以深圳市光明新区门户区为研究区域,采用 SWMM 模型在重现期分别为 1、2、3、5、10 年,降雨历时为 120 min 的设计降雨条件下,模拟传统开发模式和 LID 模式下的雨水管网运行情况,分析 LID 对雨水管渠运行状态的影响。

## 1 LID 模式搭建与模型确定

### 1.1 规划情景搭建

深圳市门户区位于光明新区的中南部,为国家低影响开发雨水综合利用示范区,隶属于茅洲河流域。本研究选择的区域为门户新区的集汇水区,总集水面积约为 1.8 km<sup>2</sup>。按照相关规划要求,结合研究区流域规划地形图、土地利用类型图和雨水管网图,搭建 LID 模型。将研究区域概化为 130 个汇水地块、100 个节点、97 段雨水管道、3 个暗渠和 1 个总排出口,主要规划地块类型包括:商业、居住、工业、办公、交通设施、公共绿地和城市公园用地。研究区域 LID 规划满足区域年均径流控制率不小于 60%、污染物 SS 总量削减率不小于 40% 的要求,应用 Matlab 全局最优算法<sup>[6]</sup>设计新建区域的设施组合方案,主要通过控制绿地下沉比例、屋顶绿化比例、透水铺装地面比例和硬化地块径流污染物控制比例优化得出各类设施的控制指标优化值;已建区域根据实际方案布置各类设施控制比例。研究区域的新建和已建区域规划概化和 LID 规划方案布置如图 1 所示。

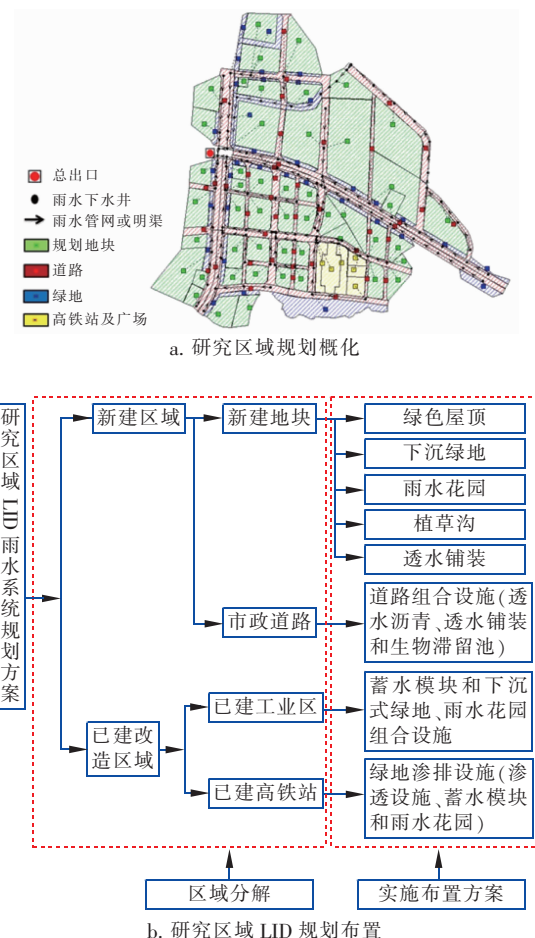


图 1 研究区域规划概化与方案布置

Fig. 1 Planning generalization and scheme arrangement map of study area

方案中 LID 设施面积为 66.5 hm<sup>2</sup>, 占规划区域总面积的 36.9%。其中,市政道路中规划新型 LID 组合设施道路为 16.6 hm<sup>2</sup>, 占区域总面积的 9.2%; 规划新建地块内,可将小区内部路、公园小路、广场及停车场规划为透水地面,面积为 24.0 hm<sup>2</sup>, 占区域总面积的 13.3%; 主干道有承重要求,采用传统的不透水路面,但主干道两旁布置宽 1.6 m 的植草沟,用于收集、滞留和转输路面雨水,植草沟布置面积为 2.85 hm<sup>2</sup>, 占总面积的 1.6%; 屋顶按规划要求,部分规划为绿色屋顶,面积为 6.4 hm<sup>2</sup>, 占总面积的 3.6%; 将 25% 的河道附近草皮与低矮的灌木、小区内绿地及广场内部的花坛等公共绿地规划为下

沉绿地和雨水花园,面积分别为 9.8 和 6.8  $\text{hm}^2$ ,占总面积的 9.2%。另外,已建区域因施工难度和工程局限性,硬化屋顶和高铁站广场布置蓄水设施,总体积为 1 300  $\text{m}^3$ ,可充分收集雨水并回用。

## 1.2 SWMM 构建与情景模拟

### 1.2.1 模型参数选用与确定

设定的 LID 设施结构参数根据手册典型值和实际设计规格而设定,其他模型参数需要根据文献<sup>[7-9]</sup>和模型手册给出的参数典型值范围设定,采用修正 Morris 筛选法作为 SWMM 模型参数局部灵敏度分析方法<sup>[10]</sup>,通过监测数据进行率定。模型参数率定采用人工试错法<sup>[11]</sup>,误差检验方法采用 Nash-Sutcliffe 系数( $E_{\text{NS}}$ )来评价模拟结果与监测结果的吻合程度,采用  $R^2$  指标来衡量模拟结果与监测结果之间的线性相关程度。

降雨模型,利用 2010 年—2014 年所监测的 143 场实际降雨资料进行统计处理,并根据俞露、孙昆鹏等人对深圳市雨型的模拟和对比分析<sup>[12,13]</sup>,采用芝加哥雨型。推求深圳市历时 2 h、5 min 间隔的短历时雨型,根据深圳市暴雨强度公式,计算得出重现期为 1、2、3、5 和 10 年的降雨强度,以及降雨历时为 120 min、雨峰系数  $r=0.35$  的 5 种设计降雨过程线。

入渗模型选用 Horton 模型,最大、最小入渗率分别为 70 和 20  $\text{mm/h}$ ,衰减系数为  $2 \text{ h}^{-1}$ ,透水和不透水地表糙率分别为 0.240 和 0.011,管道粗糙率和明渠粗糙率分别为 0.013 和 0.025,透水和不透水洼蓄量分别为 5 和 1.27 mm。汇流模型采用非线性水库模型,研究区域采用动态波模拟。

以 SS 作为污染物研究对象,选用饱和函数累积模型和指数冲刷模型进行污染物累积、冲刷参数的敏感性分析。研究区的土地利用类型划分为 3 种:路面、屋面和绿地。

### 1.2.2 模型模拟

基于 SWMM 模型,在重现期分别为 1、2、3、5、10 年,降雨历时为 2 h 的设计降雨情景下,模拟研究区域传统开发模式和 LID 模式下的管网运行情况。区域内 36 号路进行了 LID 设施建设,可验证模型模拟的准确性,选取该路段的 J72 ~ J88 路径管段为研究对象,其雨水管渠的设计降雨重现期为 3 年,管径为 DN800 ~ 1 650。对该管段的雨水管渠运行进行模拟,分别从管渠运行水深与流速、区域管网溢流节点统计、总排放口的径流总量和峰值流量控制、径流系数变化等方面,分析 LID 对区域雨水管渠系统运行状态的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 局部管段与节点运行分析

选取 36 号路的 J72 ~ J88 管段,在对传统开发模式和 LID 模式下进行模拟后,得到其节点的运行情况,见图 2。两种开发模式下,随着汇水面积的不断增大,节点从上游到下游的平均水深和最大水深都有明显增加;LID 模式下,大多数节点的最大水深发生时间有延迟,其中 J85 节点处水深变化最大,延迟时间也最长,延迟时间达到 11 min,这是由于该节点所承担的汇水面积较大。在相同管段条件下,相比传统管渠,LID 模式下的各节点平均水深降低了 0.08 ~ 0.37 m,最大水深降低了 0.20 ~ 0.95 m。

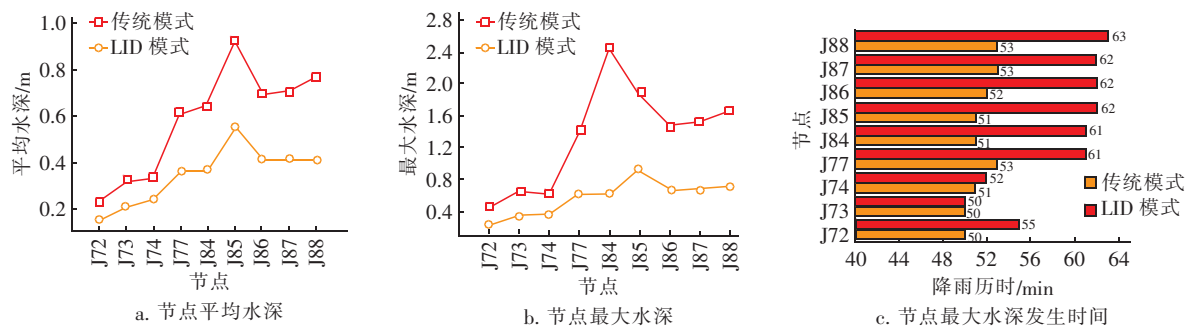


图 2 J72 ~ J88 管段的节点运行状态

Fig. 2 Nodes running state of path section of J72-J88

另外,模拟得到的 J72 ~ J88 管段的运行状况见表 1。可知,在 3 年一遇重现期下,与传统模式相比,LID 模式下的最大流量降低了 62.7% ~ 67.5%,

最大流速平均降低了 24.4%。LID 模式下相同节点的最大水深或相同管段的最大流量发生时间比传统模式下也有所滞后。在最大水深与满管水深的比值



中,LID 模式下的比值基本都小于 0.5,而传统模式下的比值大多都在 0.5 以上。

表 1 管段运行状态参数

Tab. 1 State parameters of section running

项 目	最大流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大流量时刻	最大流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大流量/满流流量	充满度( $h/D$ )
GQ74	传统模式	1.29	00:50	2.97	0.41
	LID 模式	0.44	00:55	2.24	0.14
GQ75	传统模式	2.59	00:50	4.29	0.55
	LID 模式	0.88	00:50	3.16	0.19
GQ76	传统模式	2.64	00:51	2.87	0.55
	LID 模式	0.97	00:52	2.85	0.20
GQ88	传统模式	7.34	00:55	4.66	0.96
	LID 模式	2.73	01:01	3.97	0.36
GQ89	传统模式	7.35	00:55	4.20	0.96
	LID 模式	2.74	01:02	3.29	0.75
GQ90	传统模式	8.95	00:50	5.07	2.14
	LID 模式	3.14	00:52	1.82	0.19
GQ94	传统模式	9.73	00:52	4.62	1.05
	LID 模式	3.16	01:02	3.77	0.34

已有研究表明<sup>[14,15]</sup>,管道内水深对沉积物的形成至关重要,当充满度在 0.5~1 时无沉积物累积;当充满度 <0.5 时易形成沉积,并且管道沉积物的累积主要发生在晴天旱流。以 36 号路管段为例,不同开发模式下的 SS 污染负荷见表 2。可以看出,LID 模式中源头设施虽然可以较大程度地削减 SS 污染负荷,但下游管道径流中还会存在较高的 SS 污染负荷。因此,在进行大规模 LID 模式建设的改造区,对于已建成的雨水管渠,由于最大水深与满管水深的比值下降,需要考虑因管渠沉积物而造成的维护管理问题。

表 2 36 号路管段内 SS 污染负荷

Tab. 2 SS pollution load in section of 36 Road kg

项 目	GQ74	GQ75	GQ76	GQ88	GQ89	GQ90	GQ93	GQ94
传统模式	54.7	112.0	118.8	366.3	366.3	441.4	476.9	476.3
LID 模式	21.0	44.3	51.2	141.7	141.6	165.2	173.9	173.7

## 2.2 区域雨水管网与总出口运行分析

在不同重现期下,模拟传统模式和 LID 模式下研究区域雨水管网的运行情况。

### 2.2.1 节点溢流情况

分析 1~10 年一遇重现期下的管网节点溢流情况,结果表明:对于 LID 模式,管网节点在重现期 ≤ 10 年条件下均未发生溢流;对于传统开发模式,在重现期 ≤ 3 年的降雨情况下管网节点不发生溢流,

但在 5 年和 10 年一遇重现期下均发生了溢流,主要发生在高铁站附近的管道,由于高铁站及其广场为大面积的不透水下垫面,在高重现期下径流较大而造成管网溢流、地面积水现象。因此,LID 技术可以提高雨水管渠的设计重现期,降低管网节点溢流的发生概率。以上 LID 布置方案的径流量、峰值流量及管渠运行结果表明,采用 LID 模式可将市政管网承载能力由 3 年一遇提高到 10 年一遇。

### 2.2.2 管网总出口流量

研究区域雨水管网总出口断面的径流曲线如图 3 所示。

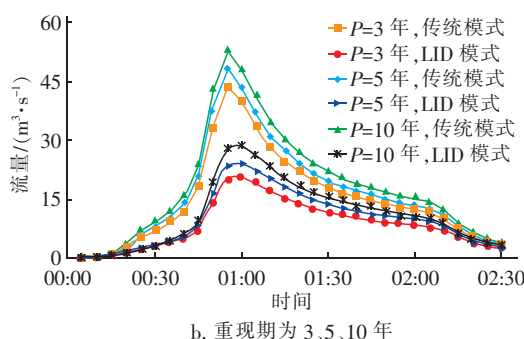
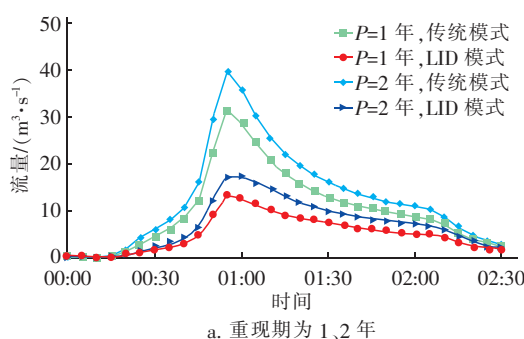


图 3 不同重现期下研究区域开发后的径流曲线

Fig. 3 Runoff curve of study area under different return periods

由图 3 可以看出,研究区域开发后的径流曲线受重现期的影响较大,随重现期的增加而逐渐增加;在相同重现期下,LID 模式下的峰值流量明显小于传统模式下的,在重现期为 1、2、3、5、10 年条件下总出口峰值流量可分别降低 58.0%、56.6%、53.7%、50.5%、46.0%,降低幅度随重现期的增加而逐渐减少。同时,采用 LID 技术时,雨水系统中总出口的流量明显小于传统雨水系统的流量,这会对 LID 建设区域的雨水管渠设计流量产生影响。

在不同重现期下,总出口断面的径流总量和峰值时间模拟结果如表 3 所示。

表 3 不同重现期下研究区域开发后的径流总量及峰值时间

Tab. 3 Runoff volume and peak time of study area under different return periods

项 目		$P=$ 1 年	$P=$ 2 年	$P=$ 3 年	$P=$ 5 年	$P=$ 10 年
径流总量/ $10^3 \text{ m}^3$	传统模式	94	118	132	146	163
	LID 模式	46	63	74	85	99
径流总量削减率/%		50.5	46.6	43.9	41.7	39.3
峰值时间/ min	传统模式	55	55	55	55	55
	LID 模式	55	55	60	60	60
峰滞时间/min		0	0	5	5	5

由表 3 可以看出,总出口断面的径流总量与重现期呈正相关。在降雨重现期为 1~10 年条件下,相比传统模式,LID 模式下总出口断面的径流总量削减率为 39.3%~50.5%,且低重现期下的削减效果优于高重现期;另外,LID 模式下总出口断面的峰值时间在 3、5、10 年重现期下都滞后了 5 min。由此可见,LID 技术对径流总量的削减效果较明显,这将有助于雨水管网承载力的提高;同时 LID 技术能够使径流的峰值时刻滞后,因此在 LID 区域雨水管渠流量的设计过程中要注意集水时间的取值。

### 2.2.3 区域径流系数变化

模拟计算研究区域开发后的径流系数,结果见表 4。

表 4 不同重现期下研究区域开发后的径流系数

Tab. 4 Runoff coefficient of study area under different return periods

重现期/年	降雨量/mm	径流系数	
		传统模式	LID 模式
1	72.53	0.73	0.37
2	88.64	0.76	0.40
3	97.40	0.77	0.43
5	106.67	0.78	0.45
10	118.03	0.79	0.48

由表 4 可知,在重现期为 1~10 年的降雨条件下,传统开发模式下的径流系数都大于 0.7,而 LID 模式下的径流系数都控制在 0.5 以内。其中,重现期为 1、2 年时,LID 模式下的径流系数比传统模式均减小了 0.36;重现期为 3、5、10 年时,则分别减小了 0.34、0.33、0.31。由此可见,LID 技术可有效降低研究区域的径流系数,且在低重现期下径流系数的降低程度要优于高重现期下。李娅<sup>[16]</sup>通过对雨水花园的径流系数分析得到径流系数与管渠设计流量呈正相关,结合本研究,LID 模式下径流系数的减

小会对雨水管渠的设计流量产生影响。

### 3 结论

① 以 36 号路 J72~J88 管段为例研究雨水管渠的运行,相比传统模式,LID 模式下的各管段最大流量、流速和水深均有下降,同时这也造成了管道内以 SS 为主的污染物沉积问题。建议在进行大规模 LID 建设的老城改造区中,对于已建成的雨水管渠,应考虑因管渠沉积物而造成的维护管理问题。

② 对于设计重现期为 3 年一遇的雨水管网,在 LID 模式下,在 10 年一遇重现期内均未发生溢流情况,因此建议对于开发程度较低的城市新建区域,在雨水管渠配套设施建设较为完善后,可将原市政管网承载能力由 3 年一遇标准提高到 10 年一遇。

③ 在重现期为 1~10 年的设计降雨条件下,相比传统模式,LID 模式下雨水管网总出口的径流总量和峰值流量减小幅度分别为 39.3%~50.5%、46.0%~58.0%,径流系数由 0.73~0.79 减少到 0.37~0.48,且峰值时间发生滞后。因此建议,在应用 LID 技术的区域,计算雨水管渠设计流量时应合理选取集水时间、径流系数等参数的值。

### 参考文献:

- [1] 胡东起,陈星,张其成,等. 低影响开发在海绵城市建设中的应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4):18-21.  
Hu Dongqi, Chen Xing, Zhang Qicheng, et al. Application of low impact development in sponge city construction[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(4): 18-21 (in Chinese).
- [2] Kong F, Ban Y, Yin H, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development[J]. Environ Modell Softw, 2017, 95: 132-142.
- [3] 刘建,李四新,陈慧,等. 市政道路低影响开发设施设计案例分析[J]. 中国给水排水,2017,33(4):14-19.  
Liu Jian, Li Sixin, Chen Hui, et al. Case study of low impact development facilities for municipal roads[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(4): 14-19 (in Chinese).
- [4] 杨一夫. 厦门海绵城市建设的冷静思考[J]. 中国给水排水,2017,33(2):27-30,36.  
Yang Yifu. Reconsideration of current sponge city development practice: a case study of Xiamen[J]. China Wa-

- ter & Wastewater, 2017, 33 (2): 27 - 30, 36 (in Chinese).
- [5] Eckart K, Mcphee Z, Bolisetti T. Performance and implementation of low impact development - A review[J]. Sci Total Environ, 2017, 607/608: 413 - 432.
- [6] Xu P, Gao F, He J, *et al.* Modelling and optimization of land use/land cover change in a developing urban catchment[J]. Water Sci Technol, 2017, 75 (11/12): 2527 - 2537.
- [7] Niazi M, Nietch C, Maghrebi M, *et al.* Storm water management model: performance review and gap analysis [J]. J Sustainable Water Built Environ, 2017. DOI: 10.1061/JSWBAY.0000817.
- [8] 郭凤, 陈建刚, 杨军, 等. SWMM 模拟植草沟功能的参数敏感性分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (9): 131 - 134.
- Guo Feng, Chen Jiangang, Yang Jun, *et al.* Parameter sensitivity analysis of SWMM model for simulation of grass swales[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (9): 131 - 134 (in Chinese).
- [9] 赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报, 2015, 35 (6): 1961 - 1972.
- Zhao Lei, Yang Fengle, Yuan Guolin, *et al.* Simulation of the quantity and quality of the urban runoff[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (6): 1961 - 1972 (in Chinese).
- [10] 高颖会, 沙晓军, 徐向阳, 等. 基于 Morris 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27 (3): 87 - 90.
- Gao Yinghui, Sha Xiaojun, Xu Xiangyang, *et al.* Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27 (3): 87 - 90 (in Chinese).
- [11] 许萍, 何俊超, 任心欣, 等. 基于 SWMM 模型的城市道路 LID 设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (2): 21 - 25.
- Xu Ping, He Junchao, Ren Xinxin, *et al.* Optimization of LID design parameters of urban road based on SWMM model[J]. Water Resources and Power, 2016, 34 (2): 21 - 25 (in Chinese).
- [12] 俞露, 荆燕燕, 许拯民. 辅助排水防涝规划编制的设计降雨雨型研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (19): 141 - 145.
- Yu Lu, Jing Yanyan, Xu Zhengmin. Study on design rainfall pattern supporting urban drainage and waterlogging prevention planning [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (19): 141 - 145 (in Chinese).
- [13] 孙昆鹏. 深圳市光明新区 LID 设施对雨水径流削减效果研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- Sun Kunpeng. Reduction Effect of LID Facilities on Runoff and Pollution in Shenzhen Guangming New District[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014 (in Chinese).
- [14] 熊丽君, 李怀正, 董梦珂, 等. 基于 SWMM 模型的排水系统溢流污染模拟效果综述[J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (12): 55 - 62.
- Xiong Lijun, Li Huaizheng, Dong Mengke, *et al.* Effects of simulating overflow pollution based on SWMM storm-water management model: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39 (12): 55 - 62 (in Chinese).
- [15] 王红武, 董敬磊, 张一龙, 等. 排水管道沉积物的动态模拟及方法比较[J]. 中国给水排水, 2017, 33 (3): 110 - 114.
- Wang Hongwu, Dong Jinglei, Zhang Yilong, *et al.* Dynamic modeling and methods comparison for sewer sediments[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (3): 110 - 114 (in Chinese).
- [16] 李娅. 雨水花园径流系数的率定及影响因素分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- Li Ya. The Calibration and the Influence Factor Analysis of Runoff Coefficient of Rain Garden [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).



作者简介: 许萍 (1971 - ), 女, 河南平顶山人, 博士, 教授, 主要从事城市 LID 雨水利用技术、节水评价理论与标准研究。

E-mail: xuping@bucea.edu.cn

收稿日期: 2018 - 01 - 10