

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.023

# 不同 LID 设施的面积比例优选及径流污染控制效果

戎贵文<sup>1,2</sup>, 甘丹妮<sup>1</sup>, 李姗姗<sup>1</sup>, 孙浩淼<sup>1</sup>, 王莉莉<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210029)

**摘要:**为探究低影响开发(LID)设施对缓解城市洪涝灾害以及削减污染物负荷的效果,以淮南市某老旧小区为研究对象,基于 SWMM 模型构建了暴雨径流管理模型,分析了单项 LID 设施不同面积占比时的总成本效益,针对 4 种 LID 设施组合方案,模拟了不同设计降雨重现期的地表径流、排放口流量及污染负荷。结果表明:对于单项 LID 设施,占屋顶总面积 45% 的绿色屋顶、占不透水道路面积 60% 的渗透铺装和占绿地总面积 10% 的生物滞留设施总成本效益最高;不同 LID 设施组合均有较好的雨洪控制效果及污染物削减效果,但随着降雨量的增大,效果均有所减小。

**关键词:**低影响开发;洪涝灾害;污染控制;SWMM 模型;总成本效益

**中图分类号:**X52      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2022)03-0168-06

**Area proportion optimization of different LID facilities and effect of runoff pollution control** // RONG Guiwen<sup>1,2</sup>, GAN Danni<sup>1</sup>, LI Shanshan<sup>1</sup>, SUN Haomiao<sup>1</sup>, WANG Lili<sup>1</sup> (1. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** To investigate the effect of low impact development (LID) facilities on alleviating urban flood disaster and reducing pollutant load, taking an old district of Huainan City as the research object, this paper constructed the rainstorm runoff management model based on SWMM model, analyzed the cost-effectiveness of different area proportions of individual LID facility, and then simulated the surface runoff, discharge and pollution load of the four LID facility combination plans at different design rainfall return periods. The results show that green roof accounting for 45% of the total roof area, permeable pavement accounting for 60% of the total impervious road area and biological retention facility accounting for 10% of the total green area are the most cost-effective for individual LID facility. Different LID facility combinations have good effects on storm flood control and pollutant reduction, while the effects decrease with rainfall increasing.

**Key words:** low impact development; flood disaster; pollution control; SWMM model; total cost-effectiveness

随着全球气候变化和城市化的快速发展,城市洪涝灾害给人类造成的威胁越来越大。推进海绵城市建设对缓解城市内涝、改善城市生态环境具有重要意义<sup>[1]</sup>。海绵城市建设倡导从源头滞水、蓄水、渗水和净水,旨在城市开发过程中保持良好的雨水储存、渗透和净化功能<sup>[2-3]</sup>。Li 等<sup>[4]</sup>针对中国广西的一个体育中心项目分析了 5 种低影响开发(low impact development, LID)设计方案的性能,结果表明按一定比例设计的生物滞留设施和下沉式绿地,能够每年减少 75% 的总径流量,小型分散式 LID 设施的综合性能可以达到最佳。周昕等<sup>[5]</sup>研究了南京

市雨花台某区域的不同 LID 设施,发现不同 LID 设施均有明显的雨洪控制效果,但随着降雨重现期的增大,效果会逐渐降低。吴海春等<sup>[6]</sup>研究发现 SWMM 模型在模拟污染物时未考虑 LID 设施的净化作用,考虑 LID 设施净化作用后固体悬浮物的净化率可以提高 1.3 倍。LID 设施在保护城市环境中具有许多优势,但是 LID 设施的建设与管理成本较高,探讨 LID 设施在不同面积比例下的总成本效益及径流污染控制效果能够为海绵城市建设提供科学依据<sup>[7-9]</sup>。目前,我国正在全面推进海绵城市建设和城镇老旧小区改造,将海绵城市建设理念运用到城镇老

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508206);国家自然科学基金(51579002);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251)

作者简介:戎贵文(1976—),男,教授,博士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:gwrong934sx@163.com

通信作者:甘丹妮(1996—),女,硕士研究生,主要从事城市雨洪管理与雨水利用研究。E-mail:1826905300@qq.com

旧小区改造过程中,能够提高老旧小区的雨水源头减排效率,促进海绵城市建设的规范化和科学化。

合理的 LID 设施类型和面积比例能够节约城镇老旧小区改造成本。本文以淮南市某老旧小区为研究对象,构建 SWMM 模型研究老旧小区不同 LID 设施组合方案的雨洪控制和污染负荷削减效果,并通过总成本效益和径流污染控制效果确定 LID 设施的最佳布设面积比例。

## 1 研究区概况

研究区位于北纬 32.63°、东经 117.02°,地处安徽省淮南市,属亚热带季风气候,冬天寒冷,夏天炎热。年平均气温 15.3℃,年平均降水量为 937.2 mm。降雨分布不均匀,主要集中在夏季,6 月底到 7 月中旬为梅雨季节。

该老旧小区总体地势较为平坦,平均坡度为 2.52%,总面积约 7.20 hm<sup>2</sup>,不透水面积约占总面积的 67.5%。不透水面积主要包括建筑面积、不透水道路面积和其他不透水面积等,其中,建筑面积约为 1.96 hm<sup>2</sup>,其他不透水面积约为 2.90 hm<sup>2</sup>;透水面积包括原有的绿化面积和透水铺装面积等,绿化面积约为 1.70 hm<sup>2</sup>,透水铺装面积约为 0.64 hm<sup>2</sup>。

## 2 SWMM 模型构建

根据研究区高程及管道走向,将区域概化为 13 个子汇水区和 14 条排水管道,管网节点 14 个,管网末端排水口 1 个,概化结果如图 1 所示。

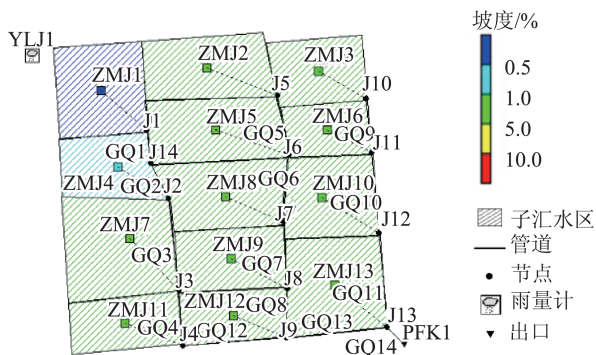


图 1 研究区子汇水区划分

Fig. 1 Sub-catchment area division of study area

### 2.1 设计暴雨

根据《给水排水设计手册》<sup>[10]</sup>,淮南市降雨强度公式为

$$i = \frac{12.18(1 + 0.71\lg P)}{(t + 6.29)^{0.71}} \quad (1)$$

式中: $i$ 为降雨强度,mm/h; $P$ 为设计降雨重现期,a; $t$ 为降雨历时,min。

利用芝加哥雨型生成器生成降雨历时为 2 h、设

计降雨重现期为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 的降雨过程,绘制降雨过程线,不同设计降雨重现期降雨强度过程线如图 2 所示。

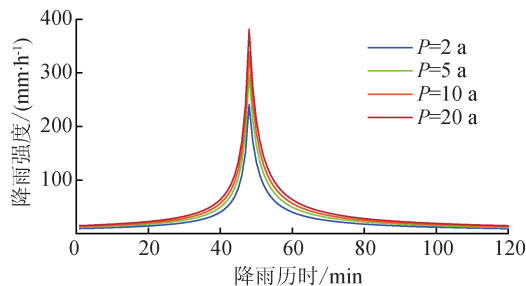


图 2 不同设计降雨重现期降雨强度过程线

Fig. 2 Rainfall intensity process lines at different design rainfall return periods

### 2.2 模型参数

#### 2.2.1 子汇水区基本参数

子汇水面积、坡度、不透水面积比通过实测数据获取,地表洼蓄量、曼宁系数、下渗模型的参数等通过查阅国内外相关文献以及 SWMM 用户手册获取<sup>[11-13]</sup>。子汇水区宽度按以下经验公式<sup>[14]</sup>计算:

$$W = k\sqrt{A} \quad (2)$$

式中: $W$ 为子汇水区宽度,m; $K$ 为常数,取值为 0.2~5.0; $A$ 为子汇水区面积,m<sup>2</sup>。

不透水地面曼宁系数取 0.011,透水性地面曼宁系数取 0.2,管段曼宁系数取 0.013。不透水洼地蓄水量取 2.0 mm,透水洼地蓄水量取 6.0 mm,无洼地蓄水不渗透百分比取 60%。由于研究区面积较小,下渗模型采用 Horton 入渗模型,最大和最小入渗率分别为 88.4 mm/h 和 11.5 mm/h,衰减系数为 4 h<sup>-1</sup>,排干时间取 7 d。

#### 2.2.2 水质模块参数

选取雨水中常见污染物总悬浮污染物(TSS)作为水质模拟的主要污染物指标,模拟管网末端排放口污染物的质量浓度。将研究区下垫面分为绿地、道路和屋面 3 种土地利用类型,根据实际情况赋予对应的不同子汇水区相应的面积百分比。污染物质量浓度的积累过程采用饱和函数计算,污染物质量浓度的削减过程采用指数函数计算,参数初值参考 SWMM 用户手册和相关文献<sup>[15-18]</sup>确定,结果如表 1 所示。

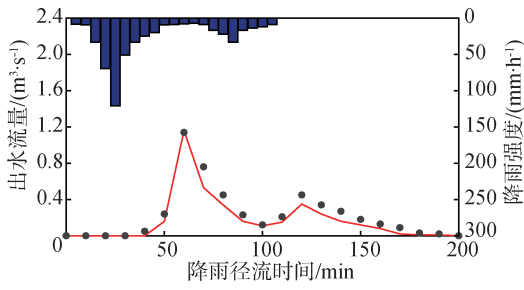
表 1 污染物累积与冲刷参数

Table 1 Pollutant accumulation and scouring parameters

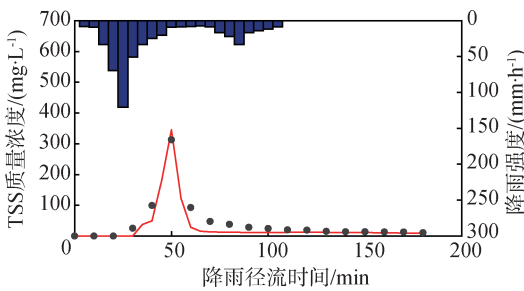
下垫面	最大积累量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	速率常数	饱和常数	冲刷系数	冲刷指数
绿地	35	0.5	7	0.006	1.2
道路	60	0.6	7	0.009	1.9
屋面	45	0.5	7	0.010	1.8

## 2.3 模型验证

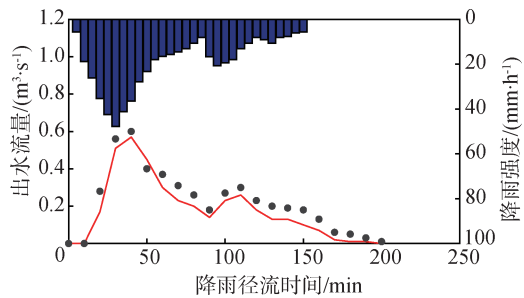
为了验证模型的准确性,选取 2020 年 7 月 19 日和 2020 年 8 月 8 日两场降雨,通过监测排水管网出水口末端的流量和 TSS 质量浓度对模型进行率定。采用纳什系数评价模型的模拟结果,当纳什系数大于 0.65 时,表明模型可靠。模型率定结果如图 3 所示,可以看出模型模拟结果良好,在两次降雨排水管网末端出水流量的实测值与模拟值的纳什系数分别为 0.84 和 0.87,排放口 TSS 质量浓度实测值与模拟值的纳什系数分别为 0.87 和 0.85,均大于 0.65,表明模型模拟结果可靠。



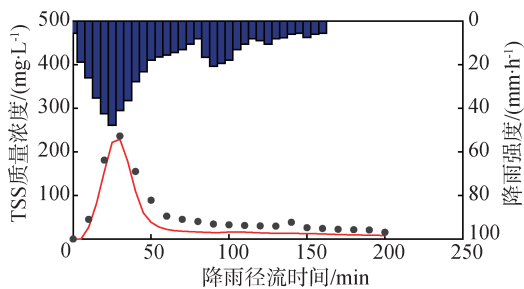
(a) 2020 年 7 月 19 日出水流量



(b) 2020 年 7 月 19 日 TSS 质量浓度



(c) 2020 年 8 月 8 日出水流量



(d) 2020 年 8 月 8 日 TSS 质量浓度

图 3 排水管网末端出水流量与 TSS 质量浓度率定  
Fig.3 Calibration of outlet flow and TSS mass concentration at end of drainage pipe network

## 2.4 LID 设施类型

目前较为常见的 LID 设施类型主要包括绿色屋顶、雨水桶、雨水花园、渗渠、植被浅沟和透水铺装等,本文根据所研究的老旧小区现场勘测资料以及不同下垫面的分布情况,选用绿色屋顶、渗透铺装和生物滞留设施 3 种 LID 设施,参照相关文献<sup>[19-20]</sup>及 SWMM 用户手册,LID 设施的参数设置如表 2~4 所示。

表 2 LID 设施表面层参数设计值

Table 2 Parameter design values of surface layer of LID facilities

LID 设施	护堤高度/ mm	植被 覆盖率	曼宁系数	表面 坡度/%
绿色屋顶	4.5	0.6	0.10	2.0
渗透铺装	0	0	0.12	0.5
生物滞留设施	300	0.2	0.20	0.3

表 3 LID 设施土壤层参数设计值

Table 3 Parameter design values of soil layer of LID facilities

LID 设施	厚度/ mm	孔隙 率	产水 能力	萎蔫 点	导水率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	吸上水 头/mm	渗透性/ (mm·h <sup>-1</sup> )
绿色屋顶	150	0.45	0.2	0.1	12.5	110	
渗透铺装	120	0.20					250
生物滞留设施	300	0.50	0.20	0.1	10	90	

表 4 LID 设施排水层与蓄水层参数设计值

Table 4 Parameter design values of drainage layer and storage layer of LID facilities

LID 设施	厚度/ mm	孔隙率	曼宁 系数	渗水速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	堵塞 因子
绿色屋顶 (排水层)	200	0.50	0.1		
渗透铺装 (蓄水层)	400	0.30		12.5	
生物滞留 设施(蓄水层)	500	0.75		0.5	1.8

## 2.5 总成本效益分析方法

生命周期成本分析方法是一种应用较广泛的估计系统寿命总成本的分析方法<sup>[21]</sup>,本文结合 LID 设施现值以及 LID 设施对洪峰流量和径流总量的削减效率分析总成本效益,选取最大生命周期效益的 LID 设施比例确定单项 LID 设施面积。计算公式为

$$C_E = C_C - C_C S_V + C_D \quad (3)$$

$$C_V = C_E + C_M \frac{(1+j)^n - 1}{j(1+j)^n} \quad (4)$$

式中:  $C_E$  为 LID 总成本费用,元;  $C_C$  为建造费用,元;  $S_V$  为残值率;  $C_D$  为设计费用,元;  $C_V$  为 LID 设施现值,元;  $C_M$  为运行与维修费用,元;  $j$  为贴现率;  $n$  为使用年限, a。

参考 LID 设施的各项费用(表 5)<sup>[22-24]</sup>,结合洪

峰削减率和径流量削减率,确定最佳 LID 设施的比例。总成本效益  $S$  计算公式<sup>[22]</sup>为

$$S = \frac{(R_p + R_0)/2}{C_v} \quad (5)$$

式中: $R_p$  为洪峰削减率; $R_0$  为径流量削减率。

表 5 LID 设施费用参考值

Table 5 Cost reference values of LID facilities

LID 设施	建造费用/ (元·m <sup>-2</sup> )	设计费用/ (元·m <sup>-2</sup> )	运行与维修费 用/(元·m <sup>-2</sup> )	使用 年限/a
绿色屋顶	382.89	15.0	12.69	20
渗透铺装	274.83	22.2	8.46	8
生物滞留设施	567.30	22.4	18.63	20

### 3 结果与分析

#### 3.1 单项 LID 设施总成本效益

为研究单项 LID 设施的最优比例和总成本效益规律,单项 LID 设施的工况模拟比例均按公差为 5% 的等差数列设置,其中绿色屋顶占屋顶总面积的比例设置为 30%~90% 共 13 个比例,渗透铺装占不透水道路面积的比例设置为 35%~70% 共 8 个比例,生物滞留设施占绿地总面积的比例设置为 10%~40% 共 7 个比例。通过对各种工况的总成本效益分析,选出最佳 LID 面积设置比例。

由图 4 可知,绿色屋顶和渗透铺装的总成本效益均出现峰值。当绿色屋顶占屋顶总面积的 45% 时,总成本效益最高;当绿色屋顶占屋顶总面积的 30% 时,总成本效益最低;当绿色屋顶面积大于屋顶总面积的 45% 以后,总成本效益波动不大。渗透铺装占不透水道路面积的 60% 时,总成本效益最高。生物滞留设施总成本效益则呈现随面积设置比例增大而减小的趋势,当生物滞留设施占绿地总面积的 10% 时,总成本效益最高,在一定范围内,随着生物滞留设施面积的增加,总成本效益递减。

由图 4 可知,绿色屋顶的总成本效益最低,而生物滞留设施总成本效益最高,这主要是由于绿色屋顶只能削减其本身覆盖区域的水量和水质,而生物滞留设施除了对其自身区域有较好削峰减流的效果外,还对周围地面或草地等透水面和路面等不透水

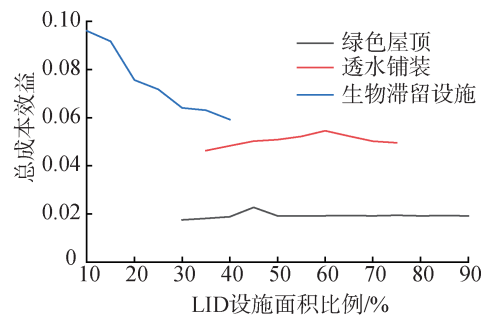


图 4 LID 设施不同面积比例的总成本效益

Fig. 4 Total cost-effectiveness of different area proportions of LID facilities

面的径流和污染也有显著的削减功能。

经过单项 LID 设施的分析,最终确定按绿色屋顶占屋顶总面积的 45%、渗透铺装占不透水道路面积的 60%、生物滞留设施占绿地总面积的 10% 进行布设。

#### 3.2 LID 设施组合方案总成本效益

根据单项 LID 设施不同面积比例的总成本效益分析结果,对 LID 设施进行 4 种方案组合分析。①方案 I:占屋顶总面积 45% 的绿色屋顶与占绿地总面积 10% 的生物滞留设施组合;②方案 II:占屋顶总面积 45% 的绿色屋顶与占不透水道路面积 60% 的渗透铺装组合;③方案 III:占不透水道路面积 60% 的渗透铺装与占绿地总面积 10% 的生物滞留设施组合;④方案 IV:占屋顶总面积 45% 的绿色屋顶、占不透水道路面积 60% 的渗透铺装与占绿地总面积 10% 的生物滞留设施组合。

基于建立的 SWMM 模型,计算研究区现状和不同 LID 组合方案在不同设计降雨重现期时径流量、洪峰流量、排放总量、TSS 排放量等。 $P=2a, 5a, 10a, 20a$  时,研究区 2h 降水量分别为 63.21 mm、77.94 mm、89.08 mm 和 100.23 mm。不同设计降雨重现期下径流量变化见图 5,洪峰流量、径流系数和 TSS 排放量见表 6 和表 7。

由图 5 可以看出,不同的 LID 设施组合方案均有一定的削峰减流和污染物去除效果,且各 LID 设

表 6 不同设计降雨重现期下洪峰流量、TSS 排放量和径流系数模拟结果

Table 6 Simulation results of flood peak discharge, TSS discharge and runoff coefficient at different design rainfall return periods

方案	洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )				TSS 排放量/kg				径流系数			
	$P=2a$	$P=5a$	$P=10a$	$P=20a$	$P=2a$	$P=5a$	$P=10a$	$P=20a$	$P=2a$	$P=5a$	$P=10a$	$P=20a$
现状	3.70	4.82	5.72	6.59	160.470	169.644	175.719	180.919	0.787	0.822	0.841	0.857
方案 I	2.64	3.48	4.16	4.80	110.654	118.424	123.294	127.867	0.625	0.687	0.724	0.757
方案 II	1.78	2.44	2.94	3.61	74.268	78.184	81.364	85.989	0.491	0.547	0.58	0.612
方案 III	1.81	2.44	2.94	3.46	74.790	80.586	84.677	88.260	0.465	0.516	0.547	0.575
方案 IV	1.45	1.98	2.54	3.44	61.184	65.288	68.470	72.536	0.418	0.476	0.513	0.550

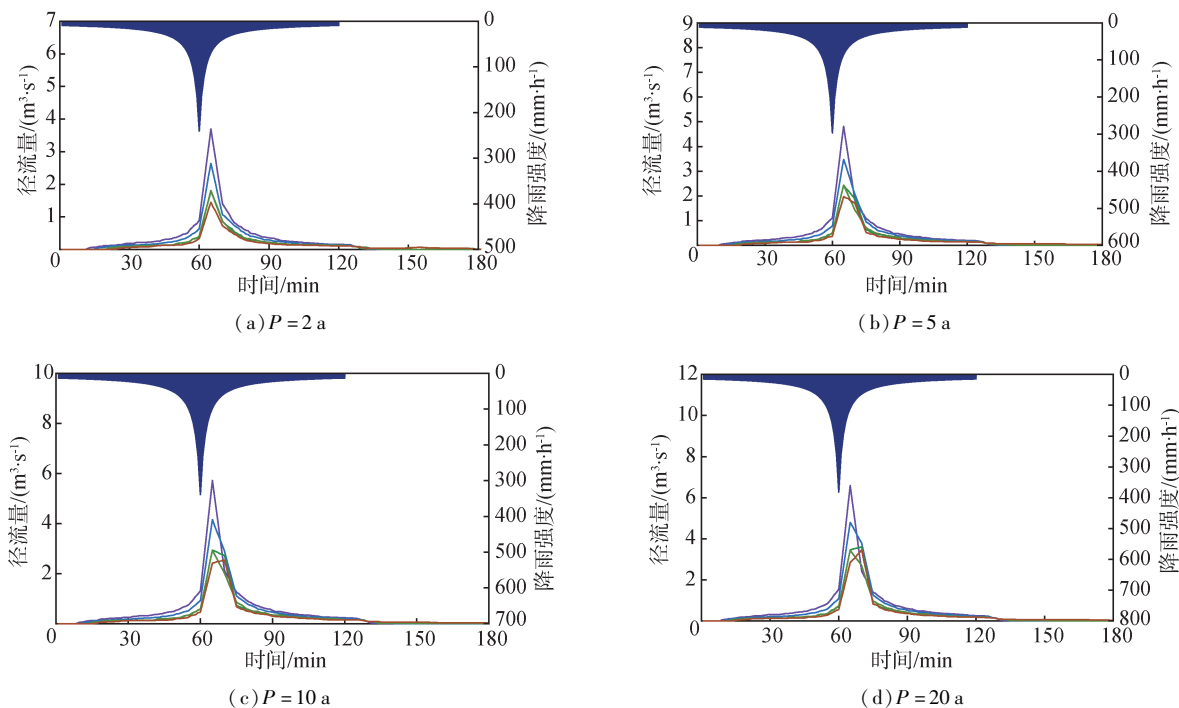


图 5 不同设计降雨重现期下径流量变化模拟结果

Fig.5 Simulation results of runoff changes at different rainfall return periods

表 7 不同设计降雨重现期下洪峰流量、TSS 排放量削减率

Table 7 Reduction rates of flood peak discharge and TSS discharge at different design rainfall return periods

方案	洪峰削减率/%				TSS 排放量削减率/%			
	P = 2 a	P = 5 a	P = 10 a	P = 20 a	P = 2 a	P = 5 a	P = 10 a	P = 20 a
方案 I	28.65	27.80	27.27	27.16	31.04	30.19	29.83	29.32
方案 II	51.89	49.38	48.60	45.22	53.72	53.91	53.70	52.47
方案 III	51.08	49.38	48.60	47.50	53.39	52.50	51.81	51.22
方案 IV	60.81	58.92	55.59	47.80	61.87	61.51	61.03	59.91

施组合方案均能延缓峰值流量出现时间,其中,方案 IV 的雨洪控制效果最好,其次为方案 III、II、I。方案 I 的雨洪控制效果相对较差,主要是因为生物滞留设施面积较小,而方案 II、III、IV 中由于添加了渗透铺装, LID 设施总面积有所增加,从而增加了下渗量,同时因为渗透铺装总成本效益高,因此,雨洪控制效果明显提升。

由表 6 和表 7 可知,对洪峰流量、TSS 排放量及径流系数而言,方案 IV 的效果最好,在 2 年一遇降雨时,洪峰削减率高达 60.81%, 污染物削减率达到 61.87%。对于不同重现期,方案 III 对径流量、洪峰流量以及 TSS 的控制效果与方案 II 整体比较接近,在 2 年一遇降雨时,方案 II 的控制效果要比方案 III 的控制效果好,但是在 20 年一遇的降雨时,方案 III 的控制效果要优于方案 II,说明在雨量较大时,生物滞留设施比绿色屋顶削减径流效果更好。相比于 2 年一遇的降雨,方案 III 在 20 年一遇的降雨时,洪峰削减率减小了 7%。

## 4 结 论

a. 采用研究区排水管网末端流量和 TSS 质量浓度对建立的模型进行验证,结果表明模型模拟结果良好,可靠度高。

b. 单项 LID 设施总成本效益分析结果表明,占屋顶总面积 45% 的绿色屋顶、占不透水道路面积 60% 的渗透铺装和占绿地总面积 10% 的生物滞留设施的总成本效益最高,而对于不同 LID 设施而言,生物滞留设施的总成本效益最高,绿色屋顶的总成本效益最低。

c. 对于不同设计降雨重现期,不同 LID 设施组合方案均能够削减径流总量、降低洪峰流量和延缓排放口雨水排放时间,且对污染物 TSS 有一定的削减作用,其中方案 IV 的效果最好。

d. 随着设计降雨重现期的增大,不同 LID 设施组合方案对研究区的径流量削减效果较明显,而对于洪峰流量及 TSS 削减效果相对较差。

## 参考文献:

- [ 1 ] YIN D, CHEN Y, JIA H, et al. Sponge city practice in China: a review of construction, assessment, operational and maintenance [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124963.
- [ 2 ] 戎贵文, 沈齐婷, 戴会超, 等. 基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨 [ J ]. 水利学报, 2017, 48 ( 8 ): 1002-1008. ( RONG Guiwen, SHEN Qiting, DAI Huichao, et al. Roof rainwater source controlling technology based on design of sponge city [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 ( 8 ): 1002-1008. ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 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 ) )
- [ 4 ] LI Q, WANG F, YU Y, et al. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: a case study in Guangxi, China [ J ]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 10-20.
- [ 5 ] 周昕, 高玉琴, 吴迪. 不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟 [ J ]. 水资源保护, 2021, 37 ( 3 ): 26-31. ( ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures [ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 3 ): 26-31. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] 吴海春, 胡爱兵, 任心欣. 基于 SWMM 模型的 LID 措施年 SS 总量去除率计算 [ J ]. 水资源保护, 2018, 34 ( 5 ): 9-12. ( WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [ J ]. Water Resources Protection, 2018, 34 ( 5 ): 9-12. ( in Chinese ) )
- [ 7 ] 郝晓丽, 穆杰, 喻海军, 等. 城市洪涝试验研究进展 [ J ]. 水利水电科技进展, 2021, 41 ( 1 ): 80-86. ( HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 ( 1 ): 80-86. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 杨少雄, 侯精明, 陈光照, 等. LID 径流控制效果对设计暴雨重现期的响应 [ J ]. 水资源保护, 2020, 36 ( 6 ): 93-98. ( YANG Shaoxiong, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Response law of LID runoff control effect to design rainstorm return period [ J ]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 6 ): 93-98. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] 曹永强, 袁立婷, 王飞龙. 基于文献计量学的洪涝灾害研究现状及发展趋势分析 [ J ]. 水利经济, 2018, 36 ( 4 ): 33-39. ( CAO Yongqiang, YUAN Liting, WANG Feilong. Current research situation and development trend of flood and waterlogging disasters based on bibliometrics [ J ]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 ( 4 ): 33-39. ( in Chinese ) )
- [ 10 ] 上海市政工程设计研究院. 给水排水设计手册 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [ 11 ] BAEK S-S, LIGARAY M, PYO J, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development ( LID ) in urban watersheds [ J ]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124886.
- [ 12 ] 陈泓宇, 董宇翔, 闫娜, 等. 石家庄某郊野公园雨洪调控效益研究 [ J ]. 给水排水, 2019, 55 ( 12 ): 13-17. ( CHEN Hongyu, DONG Yuxiang, YAN Na, et al. Research of stormwater management performance in suburban park in Shijiazhuang [ J ]. Geomatics World, 2019, 55 ( 12 ): 13-17. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 吴忠, 曾一鸣, 师懿. 小区雨水面源污染控制 SWMM 模拟研究 [ J ]. 环境科学与技术, 2019, 42 ( 9 ): 171-177. ( WU Zhong, ZENG Yiming, SHI Yi. Study on non-point source pollution control of rainwater in residential area with software SWMM [ J ]. Environmental of Science & Technology, 2019, 42 ( 9 ): 171-177. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 周志才. 基于 SWMM 模型的上海市松江国际生态商务区海绵城市建设效果评价 [ J ]. 环境工程, 2020, 38 ( 8 ): 167-173. ( ZHOU Zhicai. Effect assessment of sponge city construction in the international eco-business district in songjiang district in Shanghai based on SWMM [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 38 ( 8 ): 167-173. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] UOMELA C, SILLANPÄÄN, KOIVUSALO H. Assessment of stormwater pollutant loads and source area contributions with storm water management model ( SWMM ) [ J ]. Journal of Environmental Management, 2019, 233: 719-727.
- [ 16 ] RONG Guiwen, HU Liangyu, WANG Xing, et al. Simulation and evaluation of low-impact development practices in university construction: a case study of Anhui University of Science and Technology [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126232.
- [ 17 ] 朱甜甜, 于增知, 于晗, 等. 基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与 LID 措施研究 [ J ]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 ( 3 ): 8-14. ( ZHU Tiantian, YU Zengzhi, YU Han, et al. Analysis of initial stormwater runoff pollution characteristics and LID controls based on different land uses [ J ]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31 ( 3 ): 8-14. ( in Chinese ) )

( 下转第 204 页 )