

基于边际效益分析的 LID 设施组合比例研究

高 曼¹, 池勇志¹, 赵建海¹, 姜远光¹, 付翠莲^{1,2}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学建筑设计研究院, 天津 300384)

摘 要: 以河南省巩义市某待建海绵生态小区为研究对象,运用 SWMM 软件,借用边际效益和成本效益分析方法,进行山地小区低影响开发(LID)设施组合比例的研究。结果表明:从边际效益递增的规律来看,可以提高下凹式绿地和透水铺装的比例,但在下凹式绿地率较高(60%)时,透水铺装率不宜超过 70%;在实现相同的综合雨量径流系数和峰值流量削减率时,可能存在多种 LID 设施组合,存在成本优化的必要性;LID 设施的优化组合是透水铺装率为 60%与下凹式绿地率为 60%的组合。

关键词: 海绵城市; 低影响开发; 边际效益分析; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0127-07

Composition Ratio of Low Impact Development Facilities Based on Marginal Benefit Analysis

GAO Man¹, CHI Yong-zhi¹, ZHAO Jian-hai¹, JIANG Yuan-guang¹, FU Cui-lian^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Quality Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The composition ratios of low impact development (LID) facilities in a mountain district were studied by using storm water management model (SWMM) and marginal and cost benefit analysis method in a planned sponge ecological district of Gongyi, Henan Province. The results indicated that the proportion of sunken lawn and permeable pavement could be improved from the law of increasing marginal benefit. However, the proportion of permeable pavement should not exceed 70% when the proportion of sunken lawn reached a high level (60%). There were several sets of LID combinations which could achieve the same integrated pluviometric runoff coefficient and peak flow reduction rate, so it was necessary to optimize the cost. The optimal composition of LID facilities was sunken lawn rate of 60% and permeable pavement rate of 60%.

Key words: sponge city; low impact development; marginal benefit analysis; SWMM

北方山地城市年降雨量极其不稳定,旱涝交替明显。山地城市的地表径流流速快、汇流时间短,对

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106001)

通信作者: 付翠莲 E-mail: fx0905@126.com

地表的冲击力大。另外,山地城市小区地形复杂,往往被开发商建造成各种不同高程的台地,各台地之间的标高相差较大。由于山地小区道路地面波动多、起伏大,不利于重力排水管线的布置,通常需设置横向雨水管道和纵向排洪明渠。通过有效控制山地小区各台地内的雨水径流量与洪峰流量,可减小雨水外排量和雨水传输渠道的压力,对山地城市的雨洪控制有重要意义。

低影响开发(LID)作为一种新型的雨洪管理方法,主要功能是通过削减洪峰流量与径流量,延长峰现时间,增加土壤渗透量、蒸发量等,在源头上对雨水进行处理,从而减轻排水系统的负荷^[1]。已有一些学者进行了LID布局与优化研究^[2-4],但未探究过LID设施组合中各单项指标的合理范围。鉴于此,笔者以某待建山地小区为研究对象,在传统开发模型的基础上,设计了9种LID比例方案,运用暴雨洪水管理模型(SWMM)软件进行模拟;同时,借用边际效益和成本效益分析方法,探讨LID组合设施比例的优化思路并提出较优比例,以期为当地海绵城市建设中LID设施的规划和设计提供参考。

1 研究区域概况

研究区域位于河南省巩义市市郊区,南面紧邻伊洛河,占地面积约为6.61 hm²,最低点与最高点的高程分别为114和195.5 m,高差为81.5 m,共设置了13个平整台地和1条小区主道路。下垫面分析见表1,分为建筑屋面、道路广场、绿地和小区主道路共4类。道路广场是在平整台地内的下垫面,坡度约为1°;小区主道路坡度较大,平均约为5°。

表1 下垫面分析

Tab.1 Analysis of underlying surface

用地类型	下垫面	占地面积/ hm ²	占地 比例/ %	综合雨量 径流系数	综合流量 径流系数
平整台地	建筑屋面	1.31	20	0.90	0.95
	道路广场	2.43	37	0.90	0.95
	绿地	1.61	24	0.15	0.20
小计		5.35	81	0.68	0.73
小区主道路	小区主道路	1.26	19	0.90	0.95
合计		6.61	100	0.72	0.77

2 研究区域模型构建

2.1 模型概化

采用SWMM建立该小区的水文模型,结合研究区域的用地规划图和排水管网规划图对其进行概

化,模型概化后包含21个子汇水区、14条雨水管渠、14个节点和3个排放口,如图1所示。

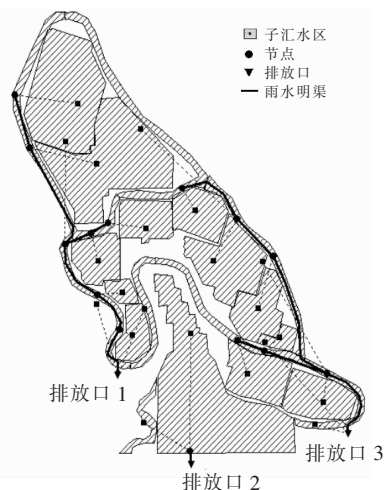


图1 研究区域模型界面

Fig.1 Model interface of study area

2.2 模型参数的设置

模型参数主要包括下垫面参数和水文参数。下垫面参数中的汇水区面积、不透水率、坡度等根据设计资料可直接获得;集水区宽度 W 采用美国农业部和自然资源保持局联合出版的《National Engineering Handbook》中的公式: $W = A/L = 2.29A^{0.4}$ (其中, A 为集水区面积, L 为地表漫流最长路径长度)来计算。水文模块包括地表产流模块和汇流模块。结合研究区域的土壤特性,地表产流模块选用Horton入渗模型,地表汇流模块采用非线性水库模型,流量演算利用动力波进行模拟。产流模块参数取值如下:最大入渗速率(Max. Infil)为76.2 mm/h,最小入渗速率(Min. Infil)为3.3 mm/h,衰减常数(Decay Constant)为4 h⁻¹,干燥时间(Drying Time)为7 d;汇流模块参数取值如下:不透水性地表系数(N-imperv)为0.015,透水性地表系数(N-perv)为0.4,不透水洼地的蓄水量(Des-imperv)为2.5 mm,透水洼地的蓄水量(Des-perv)为6 mm,无洼地蓄水的不透水面积百分比(Zero-imperv)为25%。

2.3 降雨数据

根据方案分析需要,采用短历时设计降雨评估LID设施的径流系数以及峰值流量控制效果,并在1年一遇设计降雨条件下进行传统开发模型参数率定。巩义市尚无暴雨强度公式,因此选用郑州市的暴雨强度公式,见式(1)。采用芝加哥雨型,设计降雨重现期为1、2、5、10年一遇,降雨历时为120 min,

雨峰系数 $r=0.4$ 。

$$q = \frac{3\,073(1+0.892\lg P)}{(t+15.1)^{0.824}} \quad (1)$$

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

3 传统开发模型参数率定

模型参数率定理论上可以通过实际测量获得, 但实际中由于受到各种条件的限制, 不能得到其准确数值及初始值, 故这些参数常用经验或者优化方法确定。因研究区域尚处于规划阶段, 无实测数据用于模型参数校核, 国内学者多采用基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法^[5]。因此, 本研究基于传统开发模型(即无 LID 设施), 根据《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400—2016), 按各用地类型的雨量径流系数通过加权平均计算出汇水面积的综合雨量径流系数为 0.72。SWMM 模拟得到的综合雨量径流系数为 0.76, 偏差为 5.56%。产生上述偏差是由于研究区域属于山地小区, 具有坡度较大、地形较陡、土壤含水层较薄等特征, 雨水下渗量有所减少, 地表径流量略有增加。SWMM 模拟得到的综合雨量径流系数与按规范计算得到的数值接近, 这说明该模型的建立较接近于现状, 可用于该区域的模拟研究。

4 LID 方案设计及参数设置

4.1 LID 方案设计

海绵城市规划中单项控制指标有: 下凹式绿地

率及其下凹深度、透水铺装率、绿色屋顶率、其他调蓄容积。其中, 下凹式绿地率 = 下凹式绿地面积/绿地总面积。下凹式绿地有广义和狭义之分。广义的下凹式绿地泛指具有一定调蓄容积的可用于储存、蓄渗径流雨水的绿地, 包括生物滞留设施、渗透塘、湿塘、雨水湿地等。狭义的下凹式绿地特指以草皮为主要植物、下凹深度较浅($<200\text{ mm}$)的绿地。考虑到本研究区域年降雨量少且旱涝交替明显, 旱季长期无降雨导致景观效果差, 必要时还需用自来水补给绿化设施, 造成自来水资源的浪费, 故规划主要采用狭义的下凹式绿地, 其他部分采用雨水花园、生物滞留设施等广义的下凹式绿地。在模拟时便于分析, 统一简化为狭义的下凹式绿地来考虑。

透水铺装率 = 透水铺装面积/硬化地面总面积。

绿色屋顶率 = 绿色屋顶面积/建筑屋顶总面积。在本研究中, 小区各平整台地内建筑屋顶为坡屋顶, 不适合优化为绿色屋顶。

目前, 规划大多根据相关规范要求或经验设置 LID 设施比例, 鉴于巩义市暂无海绵城市建设规范或导则, 故参照郑州市海绵城市规划设计导则中提到的下凹式绿地率不宜低于 50%、透水铺装率不宜低于 70%, 在传统开发模型基础上, 在各平整台地内布置两种 LID 设施: 透水铺装和下凹式绿地。以 50% 的下凹式绿地率和 70% 的透水铺装率为标准分别上下浮动 10%, 按 2 因素 3 水平全试验分组, 设计不同 LID 设施组合方案, 如表 2 所示。

表 2 LID 方案设置情况

Tab. 2 LID layout schemes

方案	LID 设施组合比例		透水铺装面积/ hm^2	下凹式绿地面积/ hm^2	LID 设施总面积/ hm^2	LID 设施占下垫面比例/%
1	60% 透水铺装率	40% 下凹式绿地率	1.46	0.64	2.10	32
2		50% 下凹式绿地率	1.46	0.80	2.26	34
3		60% 下凹式绿地率	1.46	0.96	2.42	37
4	70% 透水铺装率	40% 下凹式绿地率	1.70	0.64	2.34	35
5		50% 下凹式绿地率	1.70	0.80	2.50	38
6		60% 下凹式绿地率	1.70	0.96	2.66	40
7	80% 透水铺装率	40% 下凹式绿地率	1.94	0.64	2.58	39
8		50% 下凹式绿地率	1.94	0.80	2.74	41
9		60% 下凹式绿地率	1.94	0.96	2.90	44

4.2 LID 设施参数设置

结合研究区域情况、SWMM 用户手册以及相关文献和规范, 设置下凹式绿地和透水铺装的参数。下凹式绿地: 存水层, 深度为 150 mm、植被覆盖率为

10%; 种植层, 厚度为 200 mm、孔隙率为 0.5、田间持水率为 0.2、枯萎系数为 0.1、导水率为 3.3 mm/h。透水铺装: 铺装层, 厚度为 60 mm、孔隙率为 0.2; 基层, 厚度为 200 mm、孔隙率为 0.3。

5 模拟结果与分析

5.1 不同重现期下模拟结果总体分析

保持下凹式绿地率为40%不变,使透水铺装率由60%增加到80%,分析对综合雨量径流系数及峰值流量的影响,结果见图2。

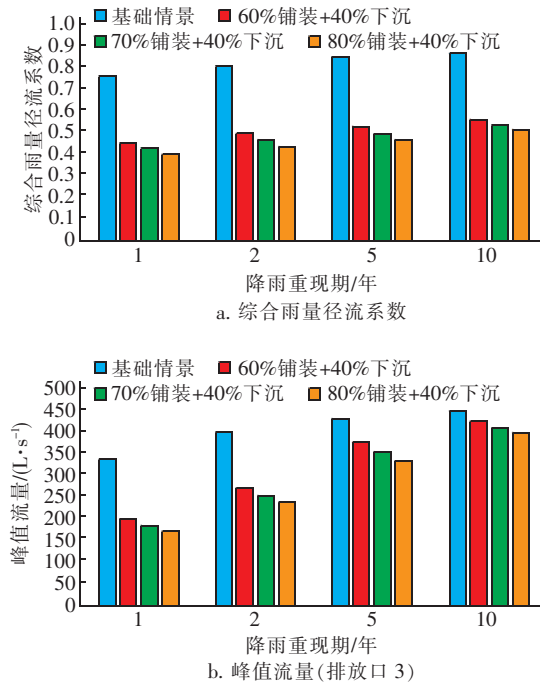


图2 透水铺装率对综合雨量径流系数及峰值流量的影响

Fig.2 Effect of proportion of permeable pavement on integrated pluviometric runoff coefficient and peak flow

由图2可以看出,增加透水铺装率可降低综合雨量径流系数及峰值流量,而且综合雨量径流系数的降低效果优于峰值流量。随着降雨重现期的增加,3种透水铺装率条件下对峰值流量的削减效果骤减,经计算,对于1年一遇的设计降雨,排放口3

的峰值流量削减率为41%~49%,而对于10年一遇的设计降雨,峰值流量削减率仅为6%~11%,可知LID设施对中小降雨的径流控制效果更明显(排放口1、2与其规律一致)。

5.2 边际效益分析

5.2.1 边际效益的概念及计算方法

边际效益是经济学中经常用到的一个概念,是指在其他情况不变的条件下,增加一单位要素投入给生产带来的产值增量,计算公式如下^[6]:

$$MR = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \quad (2)$$

式中:MR表示边际效益; ΔY 表示产值的变化量; ΔX 表示投入要素的变化量。

5.2.2 下凹式绿地的边际效益分析

以1年一遇设计降雨为例,下凹式绿地的边际效益计算结果见表3。下凹式绿地的单位面积成本按50万元/ hm^2 计,在本研究中10%比例的下凹式绿地面积为0.16 hm^2 ,成本为8万元。引用经济学中边际分析的概念,假定自变量下凹式绿地的面积即 $\Delta X_{\text{面积}}$ 是10%比例的下凹式绿地面积。假定自变量为下凹式绿地的成本,即 $\Delta X_{\text{成本}}$ 是10%比例的下凹式绿地面积所对应的成本,因变量 ΔY (或 $\Delta Y'$)即为 $\Delta X_{\text{面积}} = 0.16 \text{ } hm^2$ 时对应的综合雨量径流系数或峰值流量的绝对变化值。通过式(2)计算可得每单位下凹式绿地对于综合雨量径流系数及峰值流量的边际效益 $MR_{\text{面积}}$ 和 $MR_{\text{成本}}$ (或 $MR_{\text{面积}}'$ 和 $MR_{\text{成本}}'$)。另外,“2-1”表示表2中方案2(透水铺装率为60%、下凹式绿地率为50%)减去方案1(透水铺装率为60%、下凹式绿地率为40%)得到的下凹式绿地的 $\Delta X_{\text{面积}}$ 、 $\Delta X_{\text{成本}}$ 、 ΔY ,以此类推。

表3 下凹式绿地的边际效益

Tab.3 Marginal benefit of sunken lawn

项 目		自变量变化值 ΔX		综合雨量径流系数			峰值流量		
		$\Delta X_{\text{面积}} / \text{ } hm^2$	$\Delta X_{\text{成本}} / \text{ 万元}$	ΔY	$MR_{\text{面积}}$	$MR_{\text{成本}}$	$\Delta Y'$	$MR_{\text{面积}}'$	$MR_{\text{成本}}'$
60% 透水铺装率	2-1	0.16	8	-0.012	-0.070	-0.001 5	-15.17	-94.81	-1.90
	3-2						-17.08	-106.75	-2.14
70% 透水铺装率	5-4						-14.58	-91.13	-1.82
	6-5						-16.44	-102.75	-2.06
80% 透水铺装率	8-7						-13.92	-87.00	-1.74
	9-8						-15.34	-95.88	-1.92

① 下凹式绿地率变化对综合雨量径流系数的边际效益影响:由表3可知,综合雨量径流系数的绝

对变化值(ΔY)和边际效益($MR_{\text{面积}}$ 、 $MR_{\text{成本}}$)不随下凹式绿地率的变化而变化。对透水铺装和下凹式绿

地的面积与综合雨量径流系数的关系作回归分析,得到综合雨量径流系数(y)与透水铺装面积(x_1)和下凹式绿地面积(x_2)呈线性关系:

$$y = 0.673 - 0.116x_1 - 0.074x_2 \quad (3)$$

② 下凹式绿地率变化对峰值流量的边际效益影响:由表 3 可知,在透水铺装率一定的条件下,在设定的范围区间(即下凹式绿地率为 40%~60%)内,峰值流量的绝对变化值($\Delta Y'$)和边际效益($MR_{\text{面积}}'$ 、 $MR_{\text{成本}}'$)不为定值。在透水铺装率分别为 60%、70% 和 80% 的情况下,下凹式绿地率由 50% 增加到 60% 时的峰值流量边际效益绝对值要大于由 40% 增加到 50% 的边际效益绝对值。即在透水铺装率一定的条件下,增加下凹式绿地率时,初始下凹式绿地率越大,对峰值流量边际效益的影响越大。

对于表 3 分组比较中的“2-1”,其透水铺装率为 60%,当下凹式绿地率从 40% 增加到 50% 时,相应峰值流量的 $\Delta Y'$ 、 $MR_{\text{面积}}'$ 和 $MR_{\text{成本}}'$ 绝对值分别为 15.17、94.81 和 1.90;对于“5-4”,其透水铺装率为 70%,当下凹式绿地率从 40% 增加到 50% 时,相应峰值流量的 $\Delta Y'$ 、 $MR_{\text{面积}}'$ 和 $MR_{\text{成本}}'$ 绝对值分别为

14.58、91.13 和 1.82;对于“8-7”,其透水铺装率为 80%,当下凹式绿地率从 40% 增加到 50% 时,相应峰值流量的 $\Delta Y'$ 、 $MR_{\text{面积}}'$ 和 $MR_{\text{成本}}'$ 绝对值分别为 13.92、87.00 和 1.74。由此可知,当下凹式绿地率变化区间一定时,下凹式绿地的峰值削减边际效益随着透水铺装率的增加而递减。

峰值削减边际效益最高的是“3-2”,即透水铺装率为 60%、下凹式绿地率从 50% 增加到 60% 时的分组。因此,从边际效益角度出发,在设定的比例范围内,边际效益最高的 LID 设施比例变化出现在透水铺装率为 60%、下凹式绿地率由 50% 增加到 60% 时。

5.2.3 单位面积透水铺装边际效益分析

透水铺装的成本为 200 万元/hm²,在本研究中 10% 比例的透水铺装面积为 0.24 hm²,成本为 48 万元。以 1 年一遇设计降雨为例,透水铺装的边际效益计算结果见表 4。“4-1”表示表 2 中方案 4 (透水铺装率为 70%、下凹式绿地率为 40%) 减去方案 1 (透水铺装率为 60%、下凹式绿地率为 40%) 得到的透水铺装 $\Delta X_{\text{面积}}$ 、 $\Delta X_{\text{成本}}$ 、 ΔY ,以此类推。

表 4 透水铺装的边际效益

Tab. 4 Marginal benefit of permeable pavement

项 目		自变量变化值 ΔX		综合雨量径流系数			峰值流量		
		$\Delta X_{\text{面积}} / \text{hm}^2$	$\Delta X_{\text{成本}} / \text{万元}$	ΔY	$MR_{\text{面积}}$	$MR_{\text{成本}}$	$\Delta Y'$	$MR_{\text{面积}}'$	$MR_{\text{成本}}'$
40% 下凹式 绿地率	4-1	0.24	48	-0.028	-0.115	-0.000 6	-39.03	-162.63	-0.81
	7-4						-39.30	-163.75	-0.82
50% 下凹式 绿地率	5-2						-38.44	-160.17	-0.80
	8-5						-38.64	-161.00	-0.81
60% 下凹式 绿地率	6-3						-37.80	-157.50	-0.79
	9-6						-37.54	-156.42	-0.78

① 透水铺装率变化对综合雨量径流系数的边际效益影响:由表 4 可知,在设定的透水铺装率范围区间(即 60%~80%),当透水铺装率变化时,综合雨量径流系数的边际效益保持不变。

② 透水铺装率变化对峰值流量的边际效益影响:当自变量为透水铺装单位面积时,峰值流量的边际效益不为定值。当下凹式绿地率为 40% 和 50% 时,增加透水铺装率对峰值流量削减的边际效益呈略微递增趋势;但当下凹式绿地率为 60% 时,增加透水铺装率对峰值流量削减的边际效益呈递减趋势,即透水铺装率为 70%~80% 时的峰值流量削减边际效益比透水铺装率为 60%~70% 时的要小。

因此,透水铺装率增加带来的峰值削减的边际效益不明显,且当下凹式绿地率较高(60%)时,透水铺装率不宜超过 70%。

随着下凹式绿地率的增加,单位面积透水铺装的峰值削减边际效益呈递减趋势。在试验组中,峰值削减边际效益最高的是下凹式绿地率为 40%、透水铺装率由 70% 增加到 80% 时。在本研究中,峰值流量(y)与透水铺装面积(x_1)和下凹式绿地面积(x_2)的关系式为:

$$y = 801.72 - 173.75x_1 - 75.42x_2 + 19.47x_1x_2 - 0.61x_1^2 - 33.79x_2^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,存在交叉项 x_1x_2 ,表明当 LID 设

施比例增加到一定值时,两种设施之间产生相互作用,效果有所抵消。

5.3 成本效益分析

综合雨量径流系数削减率、峰值流量削减率与 LID 投资总成本的关系如图 3 所示。

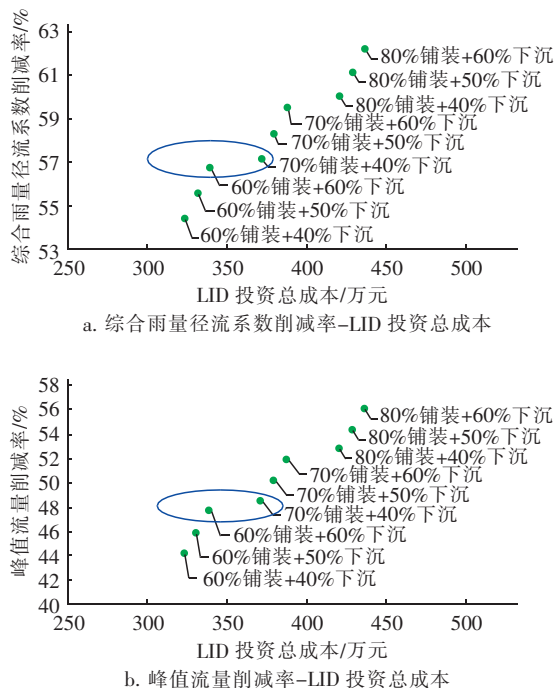


图3 LID 方案的成本-效益对应关系

Fig. 3 Correspondence between cost and benefit of LID schemes

由图 3 可知,无论是综合雨量径流系数削减率还是峰值流量削减率,都随 LID 投资总成本的增加而增加。但是在相同削减率下却可以存在不同的 LID 组合方案,即在实现相同综合雨量径流系数削减率和峰值流量削减率时,有进行成本优化的可能性。例如,60% 透水铺装和 60% 下凹式绿地的 LID 设施组合(即表 2 中的方案 3)与 70% 透水铺装和 40% 下凹式绿地的 LID 设施组合(即表 2 中的方案 4),其综合雨量径流系数削减率和峰值流量削减率相近,而方案 3 的成本明显低于方案 4。另外,下凹式绿地的成本-削减率斜率要略高于透水铺装,即在削减综合雨量径流系数和峰值流量方面,下凹式绿地的经济效益要高于透水铺装。

综上可得出:①边际效益最高的方案变化是当透水铺装率为 60%、下凹式绿地率由 50% 增加到 60% 时;或下凹式绿地率为 40%、透水铺装率由 70%

增加到 80% 时。②60% 透水铺装和 60% 下凹式绿地的 LID 设施组合与 70% 透水铺装和 40% 下凹式绿地的 LID 设施组合效益相近,但前者的投资成本明显低于后者(相差 32.5 万元);另外,在削减综合雨量径流系数和峰值流量方面,下凹式绿地的经济效益要高于透水铺装。

综合考虑边际效益和成本效益,可知:LID 设施的优化组合是透水铺装率为 60% 与下凹式绿地率为 60% 的组合。

6 结论与建议

① LID 设施对中小降雨的径流控制效果更明显;本研究设计的各 LID 设施组合方案之间相比,对径流系数和峰值流量的削减效果相差不大。

② 单位面积下凹式绿地与单位面积透水铺装的综合雨量径流系数边际效益保持不变。下凹式绿地的峰值流量边际效益随自身比例的增加而增加,随透水铺装率的增加而减少;透水铺装的峰值流量边际效益变化规律并不明显,但在下凹式绿地率较高(60%)时,透水铺装率不宜超过 70%。

③ 在实现相同的综合雨量径流系数削减率和峰值流量削减率时,可能存在多种 LID 设施组合,存在成本优化的必要性。在本研究中,综合考虑边际效益和成本效益,LID 设施的优化组合是透水铺装率为 60% 与下凹式绿地率为 60% 的组合。

参考文献:

- [1] 王俊岭,魏江涛,张雅君,等. 基于海绵城市建设的低影响开发技术的功能分析[J]. 环境工程,2016,34(9):56-60.
Wang Junling, Wei Jiangtao, Zhang Yajun, et al. Function analysis of low impact development based on the construction of the sponge city[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(9): 56-60 (in Chinese).
- [2] 胡爱兵,任心欣,丁年,等. 基于 SWMM 的深圳市某区域 LID 设施布局与优化[J]. 中国给水排水,2015,31(21):96-100.
Hu Aibing, Ren Xinxin, Ding Nian, et al. LID facilities layout and optimization in an area in Shenzhen based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 96-100 (in Chinese).
- [3] 余嵘,赵丹,刘渊博,等. SWMM 模型中不同 LID 措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, (下转第 138 页)