

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0003

戎贵文,李姗姗,甘丹妮,等.不同 LID 组合对水质水量影响及成本效益分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):21-29. RONG G W, LI S S, GAN D N, et al. Impact of different low impact developmental combinations on water quality and quantity and cost-benefit analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 21-29. (in Chinese)

不同 LID 组合对水质水量影响及成本效益分析

戎贵文^{1,2},李姗姗¹,甘丹妮¹,孙浩森¹,王莉莉¹,胡良宇¹

(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,南京 210029)

摘要:为研究不同低影响开发(low impact development, LID)组合对雨水源头控制和污染负荷削减效果,以淮南市某一工业园区为研究对象,基于暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)构建 5 种 LID 组合方案。在不同重现期下,对 5 种方案进行水量水质模拟,分析不同方案对径流量、洪峰流量及污染物质量浓度的削减效果,并利用生命周期成本分析和效益货币化分析对 5 种方案进行比选,选出最合适研究区的 LID 组合方案。结果表明:绿色屋顶、雨水罐、雨水花园和透水铺装组合方案对径流量和污染物的削减效果最好,绿色屋顶、雨水罐、植被浅沟和透水铺装组合方案对洪峰流量的削减效果最好。成本效益分析显示,雨水罐、雨水花园和透水铺装组合方案的投资回报率最高;不同的 LID 方案对水质水量均有一定的削减效果,但随着重现期的增大,削减效果均有不同程度的降低。

关键词:低影响开发;SWMM;水质水量;洪峰流量;污染物;成本效益

中图分类号:TV125;X52

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



城市化的快速发展导致下垫面发生急剧变化,加上近些年暴雨事件的频发,引发了一系列的城市洪涝灾害^[1-2]。为有效缓解城市内涝、改善城市水生态环境,我国开展了基于低影响开发(low impact development, LID)模式的海绵城市建设^[3-5],加大城市径流雨水源头减排的刚性约束,削减城市径流污染负荷^[6-7]。LID 模式是通过源头分散的小型控制设施,维持和保护场地自然水文功能。

研究表明,不同 LID 设施组合对径流调节和染污控制效果有明显差异。周昕等^[8]研究了 4 种 LID 设施组合对地表径流、排水管网溢流及污染物排放的影响。同时,不同区域性质影响着 LID 设施选择及优化配置方案,如 Baek 等^[9]、Rong 等^[10]和韩媛雯等^[11]研究发现,工业园区分布着大型厂房、厂办、研发机构和学术机构等,由于其特殊的建筑属性,绿化面积相对较少,与开发前相比,水文特性有较大的差异,在暴雨事件中,更易造成园区内涝;由于工业性质的特殊性,与其他路面相比,工业园区路面更易

形成径流污染。由于研究工业园区经济合理的 LID 组合方案,能够为工业园区的建设节约成本,并推进城市生态文明的整体发展,因此近年来工业园区的低影响开发模式研究备受政府和学者^[12-14]的关注。目前,工业园区的 LID 研究成果主要针对 LID 设施对水量水质控制作用的比较,而对 LID 设施的成本与效益分析研究较少。

本文拟基于暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),构建不同的 LID 组合方案,分析不同方案对工业园区径流量、洪峰流量以及污染物质量浓度的削减效果和成本效益,并引入生命周期成本分析,将效益货币化,根据不同方案对水质水量的控制效果,分析不同方案的投资回报率,确定更适合工业园区的 LID 组合方案,为相同类型工业园区的 LID 设施建设提供参考。

1 研究区概况

淮南市位处淮河流域,属于亚热带季风区,年平

收稿日期:2021-03-08 修回日期:2021-07-28 网络出版时间:2021-07-29

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210729.1010.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508206);国家自然科学基金项目(51579002)

作者简介:戎贵文(1976—),男,山西原平人,教授,主要从事水资源保护与生态修复研究。E-mail:gwrong934sx@163.com

均气温 16.6 ℃,全年降水量约 893.4 mm,季节性降水分布不均,且降雨主要集中在 6—8 月。研究区位于安徽省淮南市经济开发区的某工业园区,地势较为平坦,总面积约 15.4 hm²,其中:不透水面积约 12.9 hm²,占总面积的 82%,主要由厂区房、硬化路面、停车区域以及沥青路面组成;透水面积 2.7 hm²,主要由普通绿地组成,而厂区内绿化面积较少,仅为区域总面积的 18%。由于厂区绿化区域较少且分布分散,因此发生内涝的风险较大,易产生径流污染。

2 模型构建

采用美国环境保护署开发的 SWMM 模型,在 LID 模块中增加不同的 LID 设施,对单场暴雨事件过程中的地表径流、洪峰流量、水质情况等情况进行模拟,研究不同 LID 组合对雨水源头控制和污染负荷削减的效果。

2.1 模型概化

根据研究区的地形、高程以及排水管网的分布情况,将该区域分为 9 个子汇水区、10 个节点、10 个管段和 1 个出水口。具体子汇水区分布及管网概化见图 1。

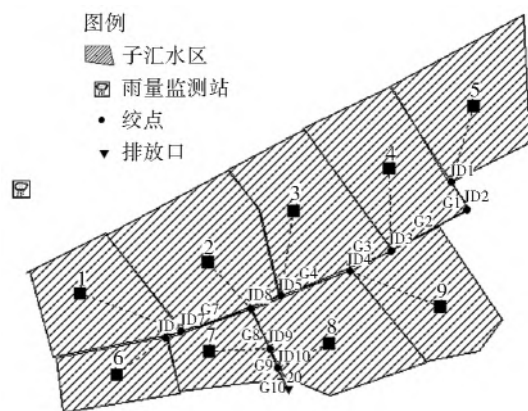


图 1 研究区概化

Fig. 1 Generalized map of study region

2.2 模型条件与参数选取

2.2.1 暴雨强度

芝加哥雨型是根据降雨强度-历时-频率关系得到的一种设计雨型,相较于其他雨型,对于降雨历时没有较大的依赖性。本文采用芝加哥雨型生成器和淮南市暴雨强度公式(1)生成重现期为 3、5、10 和 20 a 的降雨情景,并绘制不同重现期的降雨强度过程线,雨峰系数为 0.5,降雨历时 t 取 120 min,结果见图 2。

$$q = \frac{2.030(1+0.71\lg P)}{(t+6.29)^{0.71}} \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度,mm/min; t 表示降雨历时,min; P 表示重现期,a。

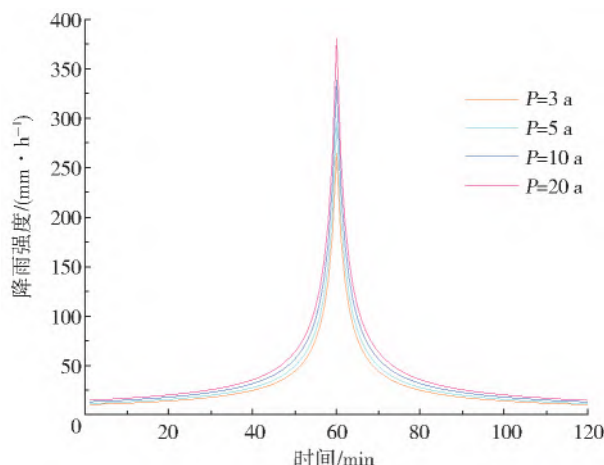


图 2 不同重现期的降雨过程线

Fig. 2 Rainfall process lines at different recurrence stages

2.2.2 模型参数选取

模型的参数设置主要分为两个模块:水文模块的参数设置和水质模块的参数设置。区域的面积、高程及不透水面积比例通过 ArcGIS 获取到相关参数^[15];宽度通过子汇水区面积与最长汇水长度的比值获得,管道的长度及管道形状、管径、节点埋深通过现场勘测及设计资料获得。

水文过程主要分为入渗和产流过程,采用 Horton 模型模拟地表入渗过程,产流过程通过调节透水区和不透水区的参数来实现,参数取值范围参考用户手册及相关文献^[16-18]。

选择 COD、TN 和 TP 作为研究区的主要污染物指标^[19]。污染物的累积和冲刷过程与下垫面性质有关,累积过程模拟采用饱和增长函数,冲刷过程模拟采用指数函数。参数的取值参考用户手册及相关文献^[20-21]。

2.3 参数率定与模型验证

分别采用 2020 年 8 月 3 日与 21 日的两场降雨实测资料进行参数率定和模型验证。利用排水口实测流量率定水文参数,利用污染物质量浓度率定水质参数,率定的水文、水质参数取值,见表 1 和表 2。同时,采用纳什效率系数 E_{NS} 作为水文模型率定的评价指标^[22]。一般来说,在下垫面特征较为复杂的城市区域,当 $E_{NS} > 0.6$ 时,模型被认为具有良好精度。排水口模拟流量与实测流量的拟合 E_{NS} 值为 0.897,各污染物的 E_{NS} 值均大于 0.800,见图 3,表明所构建的模型参数取值合理,拟合度高,所建模型适用于研究区。

表 1 水文相关参数取值

Tab. 1 Value of hydrologic related parameters

过程名称	参数名称	取值
入渗过程	最大入渗速率/(mm·h ⁻¹)	83.00
	最小入渗速率/(mm·h ⁻¹)	9.56
	衰减常数/d ⁻¹	2.00
产流过程	不透水区曼宁系数	0.01
	透水区曼宁系数	0.20
	不透水区洼地蓄水/mm	2.00
	透水区洼地蓄水/mm	6.00

表 2 水质相关参数取值

Tab. 2 Value of quality related parameters

下垫面类型	污染物类型	最大可能累积量/(kg·hm ⁻²)	冲刷系数	冲刷指数
屋面	TP	0.2	0.002	1.7
	TN	3.0	0.003	1.6
	COD	60.0	0.005	1.6
路面	TP	0.3	0.002	1.7
	TN	4.0	0.004	1.7
	COD	110.0	0.006	1.7
草地	TP	0.4	0.001	1.2
	TN	7.0	0.002	1.2
	COD	40.0	0.003	1.2

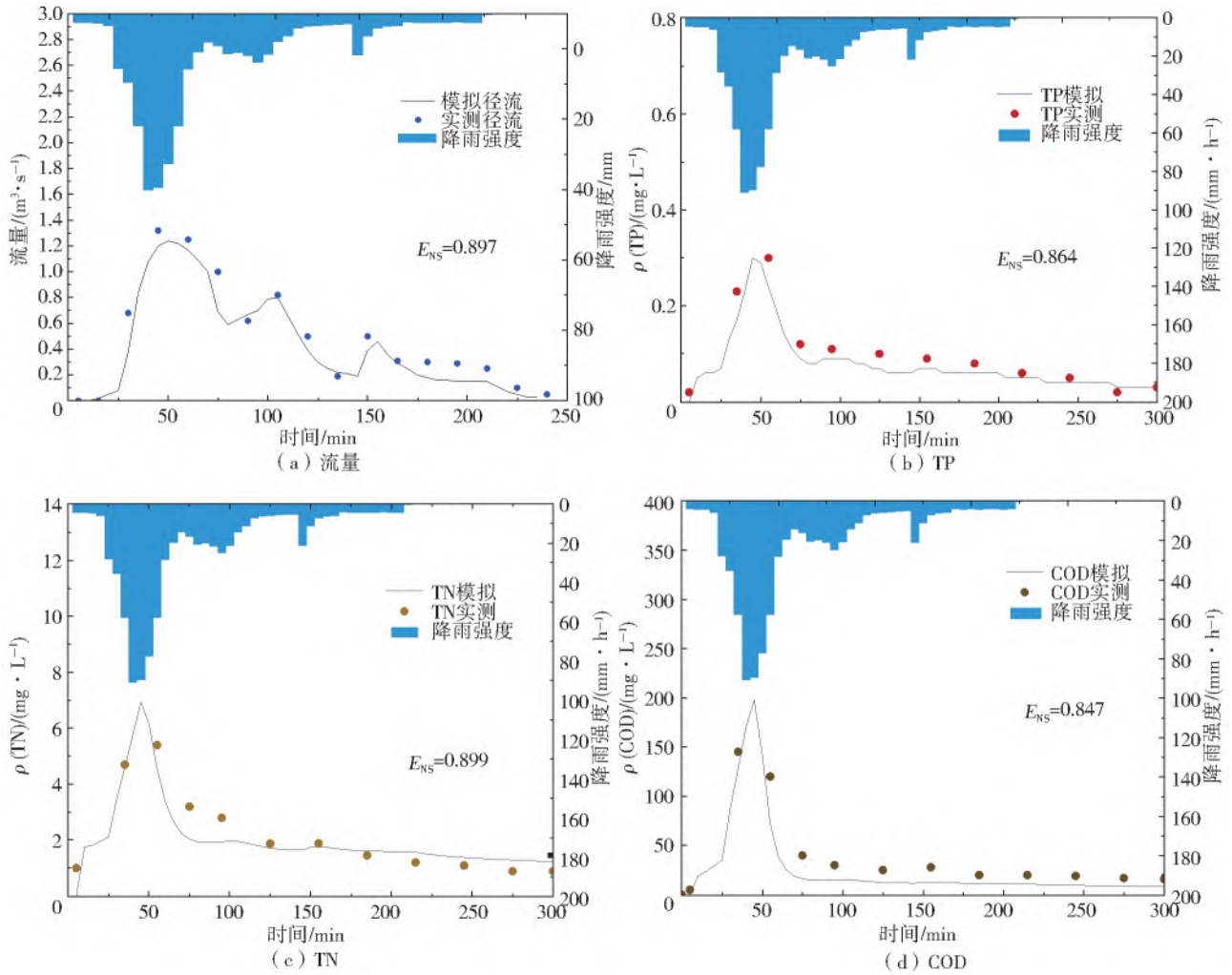


图 3 排放口流量与污染物质量浓度的率定结果

Fig. 3 Calibration results of discharge and pollutant mass concentration of discharge

3 LID 布设方案

在不同 LID 模式布设方案中, LID 设施的相关参数^[23-25]见表 3。目前较为常见的 LID 设施主要包括绿色屋顶、雨水罐、雨水花园、渗渠、植被浅沟和透水铺装等。根据研究区的地形以及不同下垫面的分布情况, 采用不同的 LID 设施进行组合, 设计了 5 种不同的布设方案。

方案一: 雨水罐+植被浅沟。该方案对研究区原建筑改变最小、成本也最低; 雨水罐主要收集屋顶雨水, 布设面积约 513.47 m²。在原有绿化的基础上, 将一部分绿化面积改造成植被浅沟, 植被浅沟面积约为 16 413.12 m²。

方案二: 雨水罐+植被浅沟+透水铺装。将研究区的一部分不透水路、不透水停车场设置为透水铺装, 透水铺装面积约为 38 632.80 m², 其他布设

与方案一相同,雨水罐面积约 513.47 m²,植被浅沟面积约为 16 413.12 m²。

表 3 LID 设施相关参数取值

Tab. 3 Value of relevant paraments of low impact development

参数名称	雨水罐	植被浅沟	透水铺装	雨水花园	绿色屋顶
护堤高度/mm	600	150	0	250	60
植被容积/%	—	85	0	20	60
表面粗糙系数	—	0.300	0.011	0.100	0.100
表面坡度/%	—	2.5	1.5	1.0	1.0
厚度/mm	—	—	100	650	200
空隙率/%	—	—	43.7	50.0	30.0
田间持水率/%	—	—	2	25	20
导水性/(mm·h ⁻¹)	—	—	125	30	30
导水坡度	—	—	35	10	35
吸上水头/mm	—	—	35	60	30
厚度/mm	—	—	500	—	—
孔隙比	—	—	0.75	—	—
渗水速率/(mm·h ⁻¹)	—	—	60	—	—

方案三:雨水罐+雨水花园+透水铺装。在方

案二的基础上,屋顶雨水依旧采用雨水罐收集。雨水罐面积约 513.47 m²,将植被浅沟改为雨水花园,雨水花园的面积约为 6 238.72 m²,布设相同面积透水铺装,面积 38 632.80 m²。

方案四:绿色屋顶+雨水罐+雨水花园+透水铺装。在方案三的基础上,增加绿色屋顶。雨水罐面积约 116.29 m²,绿色屋顶面积约 23 831.04 m²,雨水花园的面积约为 6 238.72 m²,透水铺装面积约 38 632.80 m²。

方案五:绿色屋顶+雨水罐+植被浅沟+透水铺装。雨水罐面积约 116.29 m²,绿色屋顶面积约 23 831.04 m²,植被浅沟面积约为 16 413.12 m²,透水铺装面积约 38 632.80 m²。

4 模拟结果与分析

4.1 水量模拟结果及分析

针对上述 5 种不同的 LID 布设方案,在不同重现期(P=3 a、5 a、10 a、20 a)下,对研究区进行水量模拟,对比分析径流量、径流系数及洪峰流量的控制效果,以及对应的削减率,结果见表 4、图 4。

表 4 不同 LID 组合方案在不同降雨重现期下的径流及洪峰模拟结果

Tab. 4 Runoff and peak flow simulation results of different LID combination in different rainfall recurrence periods

方案	径流量/mm				径流系数				洪峰流量/(mm·h ⁻¹)			
	P=3 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=3 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=3 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a
现状	57.64	65.59	76.50	87.47	0.827	0.842	0.859	0.873	9.07	10.36	12.17	14.01
方案一	51.09	58.25	67.93	77.52	0.767	0.747	0.762	0.773	6.27	7.18	8.53	9.88
方案二	25.97	31.57	39.37	47.30	0.372	0.405	0.442	0.472	3.14	3.66	4.50	5.34
方案三	21.31	26.17	32.93	39.81	0.305	0.336	0.369	0.397	3.29	3.83	4.66	5.58
方案四	15.45	23.55	30.04	39.42	0.264	0.302	0.348	0.393	2.82	4.15	6.22	8.64
方案五	22.24	27.97	35.94	44.09	0.319	0.359	0.403	0.440	1.71	2.19	3.01	3.89

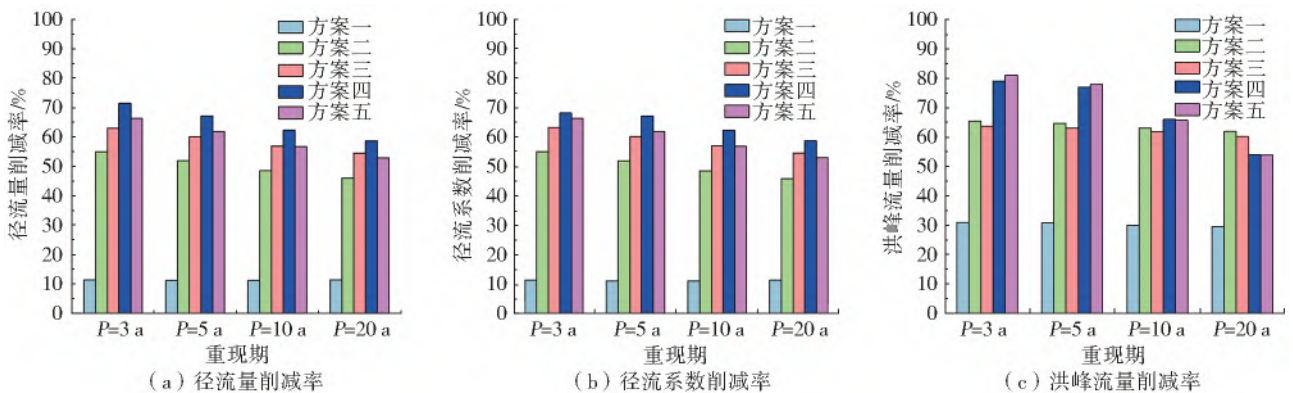


图 4 不同 LID 组合方案在不同降雨重现期下的径流及洪峰削减率

Fig. 4 Runoff and peak flow reduction rate of different LID combination in different rainfall recurrence periods

由表 4 和图 4 可知,增加 LID 设施对研究区的径流和洪峰都有一定的削减效果。其中:方案四(绿色屋顶+雨水罐+雨水花园+透水铺装)对径流量的削减率最高,在重现期为 3 a 时,削减率可达 71.43%;

方案五(绿色屋顶+雨水罐+植被浅沟+透水铺装)对洪峰流量的削减率最高,在重现期为 3 a 时,削减率可达 81.15%。但随着降雨重现期的增大,削减率有所减小,因此需要增加更多的 LID 设施。

4.2 水质模拟结果及分析

以 TP、TN 和 COD 为污染物指标,根据排放口

污染物累积总量,分析不同降雨重现期下的不同 LID 组合对污染物的削减效果,具体结果见图 5 和表 5。

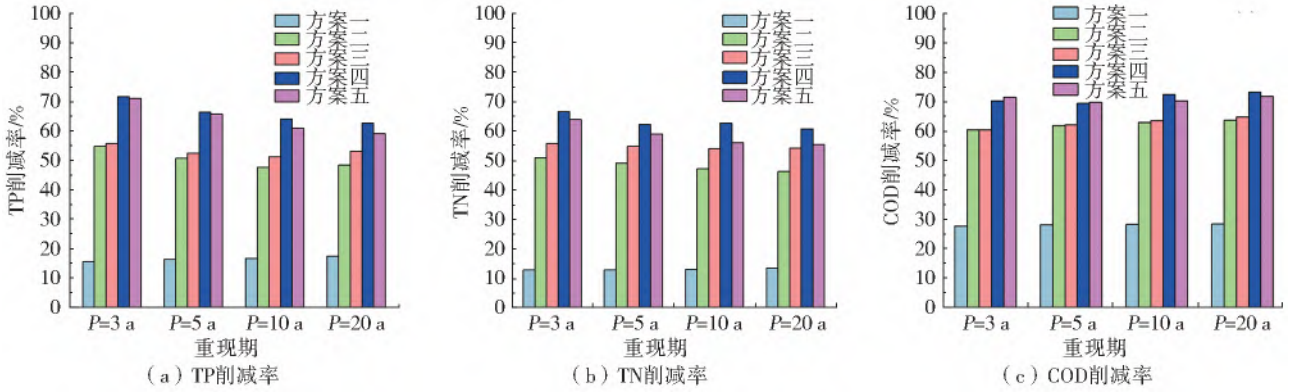


图 5 不同重现期下污染物的削减率

Fig. 5 Pollutant reduction rates at different recurrence stages

表 5 排放口不同污染物的累积量与削减率

Tab. 5 Accumulation of different pollutants and reduction results

污染物	现状与方案	污染物累积量/kg				污染物削减率/%			
		P=3 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=3 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a
TP	现状	0.697	0.718	0.745	0.779				
	方案一	0.589	0.601	0.622	0.644	15.49	16.30	16.51	17.33
	方案二	0.314	0.353	0.389	0.401	54.95	50.84	47.79	48.52
	方案三	0.308	0.341	0.363	0.365	55.81	52.51	51.28	53.15
	方案四	0.196	0.240	0.267	0.290	71.88	66.57	64.16	62.77
	方案五	0.200	0.245	0.290	0.318	71.31	65.88	61.07	59.18
TN	现状	15.996	16.784	17.866	18.935				
	方案一	13.974	14.659	15.589	16.434	12.64	12.66	12.74	13.21
	方案二	7.859	8.553	9.461	10.196	50.87	49.04	47.04	46.15
	方案三	7.085	7.596	8.233	8.696	55.71	54.74	53.92	54.07
	方案四	5.352	6.348	6.671	7.442	66.54	62.18	62.66	60.70
	方案五	5.772	6.893	7.873	8.460	63.92	58.93	55.93	55.32
COD	现状	292.097	305.151	322.340	339.403				
	方案一	211.980	219.856	231.963	243.669	27.43	27.95	28.04	28.21
	方案二	116.023	116.834	119.851	123.542	60.28	61.71	62.82	63.60
	方案三	116.050	115.778	117.696	120.022	60.27	62.06	63.49	64.64
	方案四	86.804	93.440	88.855	90.780	70.28	69.38	72.43	73.25
	方案五	83.541	92.392	96.162	95.884	71.40	69.72	70.17	71.75

由图 5 和表 5 可知,5 种 LID 组合均对污染物有一定的削减作用。其中方案四的削减效果最好,可达到 70%左右,但随着降雨重现期的增大,对 TP 和 TN 的削减率减低,COD 的削减效果虽然呈上升趋势,但削减率增幅逐渐减小。

5 不同 LID 组合的成本效益比选

5 种 LID 组合对该研究区雨水径流与水质均有一定的削减效果,除了最简单的第一种组合方案削

减效果比较小外,其他方案的削减效果均能达到 60%以上,具有较好的处理效果。但是在考虑到削减率的同时,也应考虑设施的生命周期成本以及产生的生态效益^[26],选出更适合的 LID 组合方案。

5.1 基于生命周期的成本分析

根据表 6 中的不同 LID 设施的建设成本与维护成本,利用生命周期成本分析,计算不同方案在 30 年生命周期内的成本,结果见表 7。计算公式见式(2)^[27]。

$$L_{CC} = I_0 + M_0 \times P_{V-sum} - S \times P_V \quad (2)$$

其中, $P_{V-sum} = \frac{(1+i)^t - 1}{i(1+i)^t}$, $P_V = \frac{1}{(1+i)^t}$ 。

式中: L_{CC} 表示生命周期成本, 元或万元; I_0 表示 LID

设施基础建设成本, 元或万元; M_0 表示运营维护成本, 元或万元; P_{V-sum} 表示 LID 现值和; i 表示折现率, 取 5%; S 表示残值; t 表示运营时间, 取 30 年; P_V 表示折现系数。

表 6 不同 LID 设施建设成本与维护成本^[28]

Tab. 6 Construction and maintenance costs of different LID facility

成本	雨水罐	植被浅沟	雨水花园	绿色屋顶	透水铺装
建设成本/(元·m ⁻²)	300	120	350	260	200
维护成本/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)	2.0	5.0	3.5	3.0	1.5

表 7 不同方案的生命周期成本

Tab. 7 Lifecycle costs for different scenarios

成本	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
建设成本/万元	146.709	919.365	1 006.415	1 614.107	1 527.057
维护成本/万元	8.309	14.104	8.081	15.151	21.174
生命周期成本/万元	274.443	1 136.181	1 130.643	1 847.016	1 852.554

5.2 效益分析

将效益货币化, 分为水质和水量两方面研究该区域增加不同 LID 组合方案后产生的年效益。年效益计算公式见式(3), 详细效益见表 8。

$$\begin{aligned} A_1 &= M_1 V \\ A_2 &= M_2 V \\ B &= q Q_c P_c \\ V &= 10(F\varphi_1 H - F\varphi_2 H) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_1 表示减缓市政排水压力产生的年效益, 元; A_2 表示节水产生的年效益, 元; V 表示增加 LID 后

减少的外排雨水量, m³; M_1 、 M_2 分别为管网运行费用和造成的经济损失, 元/m³, 分别取 0.08 和 5.48; B 表示削减污染物产生的年效益, 元; q 表示污染物的削减量, kg; Q_c 表示污染物的当量值, TP、TN 和 COD 的当量值分别为 0.25, 0.80 和 1.00; P_c 为当量征收标准, 根据《排污量征收使用管理条例》取 0.6 元; φ_1 表示增加 LID 组合设施前研究区的综合径流系数; φ_2 表示增加 LID 组合设施后研究区的综合径流系数; F 表示研究区面积, hm²; H 表示年平均降雨量, mm。

表 8 不同方案产生的年效益及其投资回报率

Tab. 8 Annual benefits and rates of return on investment of the different schemes

年效益或投资回报率	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
A_1 /万元	1.059	4.871	5.641	6.298	5.797
A_2 /万元	7.254	33.369	38.638	43.143	39.707
B /万元	0.070	0.157	0.158	0.177	0.178
合计/万元	8.383	38.397	44.437	49.619	45.681
投资回报率%	3.055	3.380	3.930	2.686	2.466

采用式(4)计算不同方案的投资回报率, 计算结果见表 8。

$$R_{OI} = L/T \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_{OI} 表示投资回报率; L 表示添加 LID 组合设施后产生的年利润或年均利润, 万元, $L = A_1 + A_2 + B$; T 表示总投资额, 万元, 这里 T 采用生命周期成本 L_{CC} 。

比较不同方案的投资回报率可知, 5 种方案的投资回报率均大于 2.4%; 方案三投资回报率最高, 达到了 3.93%, 是由于雨水花园相比其他设施面积偏小, 生命周期成本偏低, 却能得到很好的水量水质削减效益, 提高了总体方案的投资回报率; 方案四和

方案五的投资回报率相比其他方案偏低, 主要是由于增加绿色屋顶提高了 LID 设施的生命周期成本, 相比其他设施, 得到的水量水质削减效益偏低, 所以总体方案的投资回报率偏低。

6 结论

本文基于 SWMM 模型构建了 5 种 LID 组合方案, 研究不同 LID 设施组合对水质水量的影响, 并利用生命周期成本分析和效益货币化分析对 5 种方案进行比选, 选出最合适的 LID 方案, 为类似区域的 LID 方案选择提供参考。

增加 LID 设施对研究区的径流和洪峰有明显的削减效果,即使增加最简单的雨水罐和植被浅沟,径流量削减率也能达到 11%、洪峰流量削减率达到 30%。但随着降雨重现期的增大,削减率减小,就需要增加更多的 LID 设施。

植被浅沟对削减洪峰流量有更好的效果,雨水花园对径流量削减效果更加显著;虽然增加绿色屋顶可以削减更多的径流量和洪峰流量,但是受降雨重现期的影响较为明显,降雨重现期增大时,洪峰流量削减率有所降低。

通过生命周期成本分析和效益货币化分析得出,在 LID 组合设施建设中,雨水花园可以很好地提高组合方案的投资回报率。绿色屋顶对径流和污染物的削减具有一定的效果,但由于绿色屋顶较高的投资成本和维护成本,投资回报率偏低。

雨水罐、雨水花园和透水铺装组合方案的综合效益最高,更适合在工业园区规划和建设中采用。

参考文献(References):

- [1] SUN Y, DENG L, PAN S Y, et al. Integration of green and gray infrastructures for sponge city; Water and energy nexus [J]. Water-Energy Nexus, 2020, 3: 29-40. DOI:10.1016/J.WEN.2020.03.003.
- [2] KOURTIS I M, TSIHRINTZIS V A, BALTAS E. A robust approach for comparing conventional and sustainable flood mitigation measures in urban basins [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110822. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110822.
- [3] 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. DOI: 10.1016/J.J.CLEPRO.2020.124963.
- [4] 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 G W, SHEN Q T, DAI H C, et al. Discussion on source control technology of roof rain water based on sponge city concept [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (8): 1002-1008. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20170167.
- [5] GAO J, LI J, LI Y, et al. A distribution optimization method of typical lid facilities for sponge city construction [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2021, 21(1): 13-22. DOI:10.1016/J.ECOHYD.2020.09.003.
- [6] 刘洁,李玉琼,张翔,等.基于 SWMM 的不同 LID 措施城市雨洪控制效果模拟研究[J].中国农村水利水电,2020(7):6-11.(LIU J, LI Y Q, ZHANG X, et al. Research on the urban storm control effect of different LID measures based on SWMM [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(7): 6-11. (in Chinese))
- [7] 马萌华,李家科,邓陈宁.基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J].水力发电学报,2017,36(11):62-72.(MA M H, LI J K, DENG C N. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (11): 62-72. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20171107.
- [8] 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):26-31,73.(ZHOU X, GAO Y Q, WU D. Simulation study on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 26-31, 73. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.005.
- [9] BAEK S, CHOI D, JUNG J, et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea; Experimental and modeling approach [J]. Water Research, 2015, 86: 122-131. DOI: 10.1016/j.watres.2015.08.038.
- [10] RONG G, HU L, WANG X, 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. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2021.126232.
- [11] 韩媛雯,鲍学英.基于暴雨洪水管理模型的铁路车站片区雨洪模拟及低影响开发效果评价[J].水土保持通报,2020,40(1):123-129.(HAN Y W, BAO X Y. Rainfall flood simulation and low impact development effect evaluation of railway station area based on stormwater management model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (1): 123-129. (in Chinese)) DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.018.
- [12] 傅春,付耀宗,肖存艳.昌北工业园区不同暴雨强度下不同 LID 布置方式的排水防涝控制效果[J].水电能源科学,2020,38(8):69-73.(FU C, FU Y Z, XIAO C Y. Effect of different drainage and waterlogging control modes under different rainstorm intensity LID Changbei Industrial Park [J]. Water Resource and Power, 2020, 38(8): 69-73. (in Chinese))
- [13] 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 H S, DONG Z C, QU Z S, 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)) DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.005.
- [14] 吴晓瑜,黄维,周密. 基于 SWMM 的某工业园区 LID 方案及模拟评估[J]. 中国给水排水, 2017, 33(11): 139-142. (WU X Y, HUANG W, ZHOU M. Low impact development planning and evaluation in an industrial park based on SWMM simulation [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 139-142. (in Chinese)) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2017.11.028.
- [15] 郭军,杨涛,陈宝玉,等. 基于 GIS 预处理的市政雨水管网系统 SWMM 快速构建方法[J]. 给水排水, 2019, 55(11): 131-134. (GUO J, YANG T, CHEN B Y, et al. Rapid construction of SWMM model for municipal rainwater pipe network based on GIS preprocessing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(11): 131-134. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwel964.2019.11.028.
- [16] 王琳,王浩程,卫宝立. 小城镇低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 99-106. (WANG L, WANG H C, WEI B L, Simulation of control effect of rainfall and flood in low impact development of small towns[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 99-106. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0032.
- [17] TIRPAK R A, WINSTON R J, SIMPSON I M, et al. Hydrologic impacts of retrofitted low impact development in a commercial parking lot [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125773. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2020.125773.
- [18] 李怀民,常晓栋,徐宗学,等. 基于 SWMM 模型的坡地小区海绵城市改造效果评估[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 43-49, 82. (LI H M, CHANG X D, XU Z X, et al. Assessment of sponge city scheme in a hillside area based on SWMM model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 43-49, 82. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0004.
- [19] 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 T T, YU Z Z, YU H, et al. Analysis of initial stormwater runoff pollution characteristics and LID controls based on different land uses [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(3): 8-14. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.03.02.
- [20] LEWIS A R. Storm water management model user's manual version 5. 1 [M]. Washington D C: The United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2015:75-77.
- [21] YANG T, DONG Z. The effect of sponge city construction on non-point source load reduction: A case study in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2020 (prepublish). DOI: 10.1016/J.ECOHYD.2020.12.002.
- [22] 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 J M, LI D L, WANG X J, 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)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.005.
- [23] 崇佳文,徐乐中,李翠梅,等. 渗透铺装对降雨径流水文水质调控效果分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 115-121. (CHONG J W, XU L Z, LI C M, et al. Simulation of regulation effect of permeable pavement on hydrology and water quality of rainfall runoff[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 115-121. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0047.
- [24] 孙会航,李俐频,田禹,等. 基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3605-3614. (SUN H H, LI L P, TIAN Y, et al. Sponge city planning and design based on multi-objective optimization and comprehensive evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3605-3614. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0386.
- [25] LEIMFRUBER J, KREB G, CAMHY D, et al. Model-based selection of cost-effective low impact development strategies to control water balance [J]. Sustainability, 2019, 11: 2440. DOI: 10.3390/su11082440.
- [26] 康宏志,郭祺忠,练继建,等. 海绵城市建设全生命周期效果模拟模型研究进展[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 82-93. (KANG H Z, GUO Q Z, LIAN J J, et al. Advances in simulation models for whole-life-cycle effectiveness of sponge city construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11): 82-93. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20171109.
- [27] 刘小壮. 基于 SWMM 建筑小区 LID 方案比选及水量水质的模拟评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. (LIU X Z. Simulation evaluation of building district LID scheme comparison and water quality based on SWMM [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese))

[28] 来凤涛.“海绵城市”理念在城市公园绿地规划设计中的应用[J]. 中国市政工程, 2016(5): 25-27. (LAI F T. Application of "Sponge City" in planning and de-

sign of green space in urban parks [J]. China Municipal Engineering, 2016(5): 25-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4655.2016.05.008.

Impact of different low impact developmental combinations on water quality and quantity and cost-benefit analysis

RONG Guiwen^{1,2}, LI Shanshan¹, GAN Dannil¹, SUN Haomiao¹, WANG Lili¹, HU Liangyu¹

(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 210098, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization, the impervious surface of cities and towns significantly increases, which causes the change of hydrological process and the increase of flood events. Due to the special construction properties of industrial parks, the impervious area is much larger than previous area, so it is easy to cause waterlogging disasters and runoff pollution in the industrial zone. Low impact development (LID) facilities can effectively alleviate urban waterlogging and improve the urban water ecological environment.

Impact of different LID combinations on rainwater source control and pollution load reduction, taking an industrial park in Huainan City as the research object. Five LID combination schemes were constructed by the SWMM model. In different return periods, the water quantity and quality of five schemes were simulated, and the reduction effects of different schemes on runoff volume, runoff coefficient, peak discharge, and pollutant concentration were analyzed. Methods of the life cycle cost and the benefit monetization were used to calculate and monetize the economic benefits of every kind of LID combination scheme, and the return on investment also was compared to the five different schemes to select the most appropriate LID combination scheme.

The results show that the combination of green roofs, rainwater tanks, rainwater gardens, and permeable pavements has the best reduction effect on runoff and pollutants concentration, and the combination of green roofs, rainwater tanks, vegetative swales, and permeable pavements has the best reduction effect on peak flow. The combination of rainwater tanks, rainwater gardens, and permeable pavements has the highest investment return based on cost-benefit analysis. Different LID schemes have a certain reduction effect on water quality and quantity, however, the reduction effect decreases to different degrees with rainfall return period increase. Different LID schemes all have a considerable return on investment, but the addition of green roofs reduces the return on investment of the combination, resulting in the low return on investment for the combination with green roofs.

Adding LID facilities has a significant reduction effect on runoff and flood peaks in the study area. Even if the simplest rainwater tanks and vegetative swales are added, the reduction rate of runoff can reach about 11% and one of flood peak discharge can reach about 30%. However, with the increase of rainfall return period, the reduction rate decreases, so more LID facilities need to be added. Vegetative swales have a better effect on reducing peak discharge, and rainwater gardens have a more obvious effect on runoff reduction. Although the addition of green roofs can reduce more runoff and peak flow, the effect of the rainfall return period is more obvious. While the rainfall return period increases, the reduction rate of peak flow decreases to a certain extent. Life cycle cost analysis and benefit monetization analysis show that rainwater gardens can well improve the rate of return on investment, and green roofs have a certain effect on the reduction of runoff and pollutants, but the high investment cost and maintenance cost of green roofs lead to a low rate of return on investment. The combination scheme of green roofs, rainwater tanks, rainwater gardens, and permeable pavements has the highest comprehensive benefit and is more suitable for the planning and construction of industrial parks.

Key words: low impact development(LID); SWMM; water quality and quantity; peak discharge; pollutant; cost-benefit