

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221010

城市既有小区雨洪模拟及 LID 组合方案综合效益分析

邹 涵,皮家凤,潘 红

(湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068)

摘要:为研究既有小区海绵化城市改造方案,以武汉市洪山区某既有小区为例,建立 SWMM 雨洪径流模型,根据场地条件、空间需求及下垫面特征的可行性分析确定不同 LID 组合方案,模拟了研究区域不同重现期下各组合方案径流控制和污染负荷情况,从生态、社会、经济三方面对各组合方案的模拟结果进行综合效益分析。结果表明,生物滞留设施的生态效益和社会效益较高;布设渗渠、植草沟和生物滞留设施的 LID 组合措施,对研究区域的径流控制、洪峰和污染物削减效果最好,社会效益和经济效益良好,为较优方案。

关键词:海绵城市; SWMM; LID; 既有小区; 综合效益

中图分类号: TV213.4; TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0065-05

1 引言

2015年,武汉市正式入选全国首批“海绵城市建设试点城市”,率先在全国开展海绵城市建设。根据《武汉市海绵城市建设设计指南》,武汉市属北亚热带季风性湿润气候区,雨量充沛,降雨强度大,年降雨量在 700~1 200 mm 之间波动,初夏梅雨季节雨量较集中,多年平均降雨量 1 260 mm。城镇老旧小区改造对推进城市更新和开发建设方式转型、促进经济高质量发展具有十分重要的意义。张仪等^[1]发现武汉市茶山刘分流制排水区域雨水径流污染负荷较高,降雨强度和前期干旱天数是影响初始冲刷效应的主要因素;杜颖恩等^[2]以雨水花园为例,提出雨水花园布置在下游时对径流总量控制率的提升及雨水径流污染负荷的净化效果最好;王路平等^[3]以内涝防治为目标进行了调蓄池设计研究,考虑了集中式和分散式两种调蓄池的雨水径流控制量。但上述研究多集中于径流污染特征及影响因素、LID 设施空间格局布置和已建区改造途径方面,而针对 LID 组合措施对既有小区的径流控制及污染削减情况模拟并通过综合效益分析必选方案的研究较少。为此,本文以武汉市洪山区某既有小区为例,建立 SWMM 雨洪径流模型,根据场地现状及空间条件的可行性分析确定不同 LID 组合方案,模拟了

研究区域不同重现期下各组合方案径流控制和污染负荷情况,从生态、社会、经济三方面对比各 LID 组合方案的效益,进而提出综合能力最优方案。

2 模型构建

2.1 研究区域概化

研究小区占地面积 13.69 hm²,建筑面积约 3.02 hm²,不透水面积约占 68%,道路及广场多为不透水铺装。研究区域地势较平坦,子汇水区平均坡度取值 0.2%,排水系统为雨污分流制。结合该地现状排水管网平面图,将研究区域划分为 13 个子汇水区、10 个管渠、10 个节点、1 个出水口,见图 1。其中,除 S3 广场区域无建筑、绿地较多、透水区域面积略大外,其他各子汇水区均存在建筑屋面、道路等不透水下垫面,透水区域分布较为均匀。

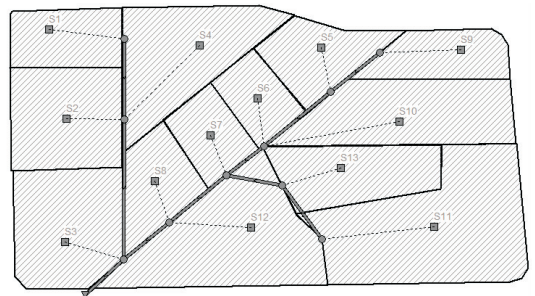


图 1 研究区域概化图

Fig. 1 Generalization of the study area

收稿日期: 2022-04-14, 修回日期: 2022-05-31

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(20YJC760145); 湖北工业大学绿色工业科技引领计划(XJKY2022002)

作者简介: 邹涵(1982-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为城市规划, E-mail: zouhangogo@qq.com

2.2 降雨参数

城市暴雨雨型采用芝加哥雨型,生成重现期分别为 2、3、5、10、20 年,雨峰系数为 0.39,降雨历时选定 120 min,时间间隔为 5 min,不同重现期降雨过程线见图 2。根据《武汉市暴雨强度公

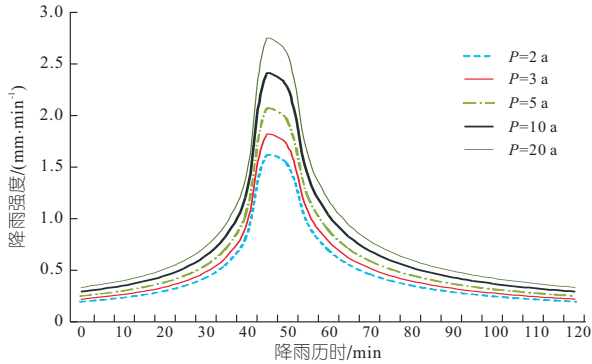


图 2 不同重现期下降雨强度

Fig. 2 Rainfall intensity with different recurrence periods

式及暴雨雨型》^[4],短历时降雨公式为:

$$i = 9.686(1 + 0.887 \lg P) / (t + 11.23)^{0.658} \quad (1)$$

式中, i 为设计暴雨强度; P 为重现期; t 为降雨历时。

2.3 模型的参数取值

由于研究区域属城市地区,且范围较小,因此地表汇流的计算采用非线性水库法,入渗模型采用霍顿(Horton)模型,管流的复杂运算选用动力波法^[5]。研究区域下垫面包括绿地、屋面、道路、停车场及广场用地。根据研究区域特点,下垫面土地利用类型划分为建筑屋面、道路、绿地 3 种,各子汇水区根据场地实际情况,推算各土地利用类型面积占比^[6]。

当前的 SWMM 模型已经更新至 SWMM5.2 版本,支持的低影响开发措施包括雨水花园、绿色屋顶、渗渠、生物滞留系统、透水铺装系统、雨水桶、屋面雨水断接、植草沟 8 种措施。参考 SWMM 用户手册、场地现状及查阅相关资料^[2,7],选取水力模型参数见表 1。研究区域水质指标涉及 TSS、TN、TP 等,为便于比较,本文仅

表 1 SWMM 模型水力参数取值范围

Tab. 1 SWMM model hydraulic parameter value range

| 参数类型 | 参数名称 | 取值范围 | 研究区域取值 |
|--------|------------------------------------|-------------|--------|
| 曼宁系数参数 | 不透水区曼宁系数 | 0.001~0.015 | 0.015 |
| | 透水区曼宁系数 | 0.01~0.80 | 0.300 |
| | 管道曼宁系数 | 0.001~0.400 | 0.011 |
| 注蓄量参数 | 不透水注蓄量/mm | 0~3 | 3 |
| | 透水注蓄量/mm | 1~10 | 6.54 |
| | 无注不透水百分比/% | 0~100 | 25 |
| 渗透参数 | Horton 最大入渗率/(mm·h ⁻¹) | 72.10~78.10 | 76.2 |
| | Horton 最小入渗率/(mm·h ⁻¹) | 0~10 | 3.302 |
| | Horton 衰减系数/h ⁻¹ | 2~7 | 2 |
| | 干燥天数/d | 1~7 | 7 |

选取 TSS 为典型污染物研究 LID 方案对径流污染控制效果,污染物的累积模拟选用饱和函数,冲刷模拟选用指数函数,参考文献^[2,8],相关参数见表 2。

表 2 污染物累积与冲刷参数取值

Tab. 2 Values for pollutant accumulation and scouring parameters

| 污染物 | 下垫面 | 最大可能累积量/(kg·hm ⁻²) | 饱和常数/d | 冲刷系数 | 冲刷指数 | 清扫去除率/% |
|-----|-----|--------------------------------|--------|-------|------|---------|
| TSS | 屋面 | 140 | 10 | 0.008 | 1.75 | 0 |
| | 道路 | 270 | 10 | 0.009 | 1.80 | 50 |
| | 绿地 | 60 | 10 | 0.004 | 1.20 | 0 |

2.4 参数率定

采用基于径流系数的模型校准方法^[9],参照实际下垫面情况,依据《室外排水设计规范》^[10]对不同下垫面参数进行取值,计算各下垫面占总面积权重,得到研究区域实际综合径流系数,对比模型模拟的径流系数,检验模型误差^[7]。

因研究区域属建筑密度较密区域,且属既有小区,故其综合径流系数取值范围为 0.45~0.70,参考《武汉市海绵城市建设设计指南》,结合不同下垫面径流系数,加权计算其实际综合径流系数为 0.660 1,位于取值范围内。SWMM 模型模拟 $P=2,3$ 年重现期下降降雨径流,确定径流系数分别为 0.667、0.689,对比实际综合径流系数,变异性小,低于 5%,故模型模拟效果较好,可准确模拟该研究区域降雨径流,适用于后续场景模拟。

3 模拟 LID 方案设计

相比于非既有小区可在最初设计规划时即对小区建筑、海绵设施等基础设施进行统一化布置,既有小区的海绵化改造存在绿地率低、积水、内涝、空间局限大等场地限制。在研究区域现有条件下,根据场地坡度、竖向、空间大小等地理特征进行可行性分析,结合各单项 LID 设施特征,从而合理布置 LID 组合设施。从生态、经济、社会三方面综合分析组合设施效益,见图 3^[11]。选择适宜研究区域的 4 项 SWMM 支持的 LID 设施—透水铺装、生物滞留设施、渗渠、植草沟。

设计调蓄容积 V 计算公式为:

$$V = 10H\varphi F \quad (2)$$

式中, H 为设计降雨量; φ 为综合径流雨量系数; F 为汇水面积。

根据《武汉市海绵城市专项规划》,研究区域年径流量控制率设计为 65%,对应的设计降雨量为 20.8 mm,计算得调蓄总容积为 1 794.3 m³。

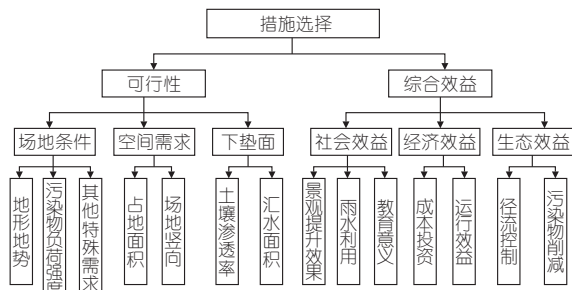


图 3 LID 措施选择条件

Fig. 3 LID measure selection criteria

参考相关研究成果^[7,12], LID 方案设置如下: ①方案 1. 无 LID; ②方案 2. 透水铺装+渗渠+植草沟, 透水铺装、渗渠、植草沟布设面积分别为 7 500、1 500、3 000 m²; ③方案 3. 透水铺装+渗渠+生物滞留设施, 透水铺装、渗渠、生物滞留设施布设面积分别为 6 600、1 800、1 850 m²; ④方案 4. 渗渠+植草沟+生物滞留设施, 渗渠、植草沟、生物滞留设施布设面积分别为 1 800、3 600、2 250 m²。

4 模拟结果与分析

4.1 生态效益

4.1.1 水文控制

图 4 为各重现期不同方案下的研究区域排放口流量过程线。模型设置降雨历时 120 min, 到

达 2 h 降雨停止, 其后几分钟内会出现明显拐点。

由图 4 可知: ①洪峰时间。P=2、3、5 a 时, 与方案 1 的洪峰时间相比, 方案 2~4 分别推迟了 2、3、4 min; P=10 a 时, 与方案 1 的洪峰时间相比, 方案 2~4 分别推迟了 1、2、3 min; P=20 a 时, 与方案 1 的洪峰时间相比, 方案 2、3 与方案 1 相比其洪峰时间无变化, 方案 4 与方案 1 相比其洪峰时间推迟了 1 min, 说明当降雨强度达到 10 年一遇或以上时, LID 组合措施对洪峰时间的推迟效果逐渐变小, 方案 4 对洪峰流量的控制效果高于方案 3, 而方案 3 又高于方案 2。②洪峰削减率。P=2 a 时, 方案 2~4 对应的洪峰削减率分别为 19.5%、20.0%、21.3%; P=3 a 时, 方案 2~4 对应的洪峰削减率分别为 16.7%、18.9%、20.5%; P=5 a 时, 方案 2~4 对应的洪峰削减率分别为 13.6%、16.9%、19.6%; P=10 a 时, 方案 2~4 对应的洪峰削减率分别为 11.3%、12.7%、15.2%; P=20 a 时, 方案 2~4 对应的洪峰削减率分别为 6.3%、8.4%、10.6%, 说明洪峰削减率随降雨强度的增加逐渐减小, 这一规律与文献[7]的研究相吻合, 其中, 方案 4 的洪峰削减率最高。综上可知, LID 组合设施对该研究区域降雨径流的控制和洪峰的削减有明显作用。

4.1.2 水质控制

利用 SWMM 模型模拟 P=2、3、5、10、20 a 重现期下不同 LID 组合措施对污染物 TSS 的削减效果, 根据排放口污染物负荷计算污染物削减率, 见图 5, 其中方案 1 为无 LID 措施, 无污染物削减。由图 5 可知, 方案 2 各重现期污染物削减率分别为 21.9%、18.5%、15.1%、12.3%、10.1%; 方案 3 各重现期污染物削减率分别为 27.1%、21.8%、21.0%、18.4%、16.4%; 方案 4 各重现期污染物削减率分别为 28.9%、23.9%、21.4%、19.7%、17.4%。同一 LID 组合方案不同重现期下, 污染物的削减率均表现为随重现期的增大而逐渐减小, 但其减弱波幅很小, 说明 LID 组合措施对污染物的累积排放量有稳定的削减作用, 对该研究区域水质有很好的控制效果^[12]。在同一重现期下, 方案 4 对污染物的削减率略明显高于方案 3, 而方案 3 的削减率又高于方案 2。

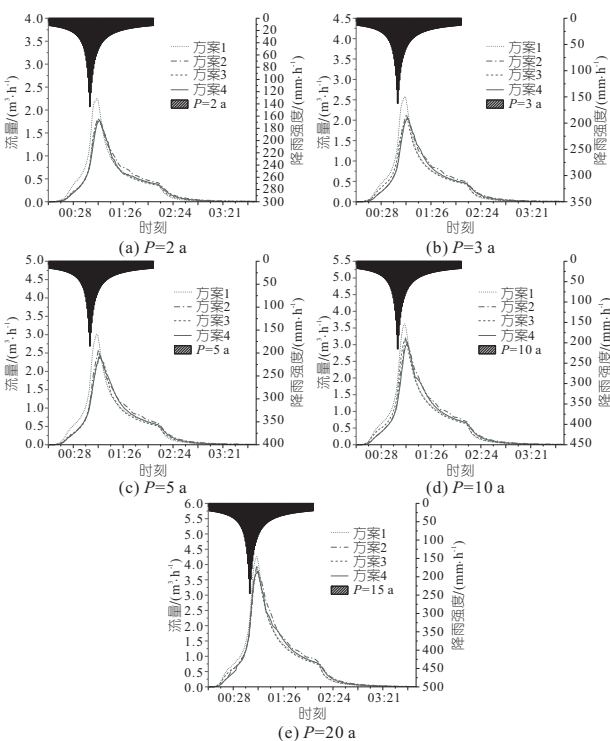


图 4 不同方案下各重现期排放口流量过程线

Fig. 4 Discharge port flow process lines for each reproduction period under different schemes

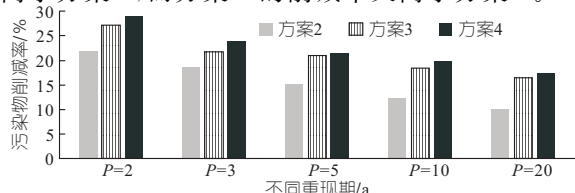


图 5 各组合措施不同重现期下污染物削减率

Fig. 5 Pollutant reduction rates under different recurrence periods of each combination of measures

对比方案 2~4, 方案 3、4 对洪峰推迟时间、洪峰削减率和污染物的削减率均高于方案 2, 说明生物滞留设施有较高的生态效益, 可储蓄雨水、削减污染物, 有利于缓解城市内涝。

4.2 社会效益

各单项 LID 措施的社会效益难以被直接衡量或定价, 参考文献[13], 选取“低、较低、中等、较高、高”5 个等级对景观提升效果、雨水利用和公众教育宣传三项指标进行定性评价, 见表 3。

表 3 LID 单项措施社会效益评价

Tab. 3 Evaluation of the social benefits of LID individual measures

| LID 措施 | 景观提升效果 | 雨水利用 | 公众教育宣传 |
|--------|--------|------|--------|
| 透水铺装 | 较低 | 较低 | 较低 |
| 渗渠 | 较低 | 低 | 低 |
| 植草沟 | 低 | 较低 | 较低 |
| 生物滞留设施 | 较高 | 较高 | 较高 |

采用层次分析法量化景观提升效果、雨水利用和公众教育宣传三项指标的权重, 进而量化各单项 LID 设施社会效益力度, 按各方案中各项 LID 措施面积占比进行分配, 求和推算出各组合方案社会效益的量化值见表 4。

表 4 LID 组合方案社会效益量化值

Tab. 4 Quantitative value of social benefits of LID combination scheme

| 方案 | 景观提升效果 | 雨水利用 | 公众教育宣传 |
|----|---------|---------|---------|
| 2 | 0.280 5 | 0.991 8 | 0.581 6 |
| 3 | 0.379 9 | 1.116 1 | 0.654 1 |
| 4 | 0.340 8 | 1.244 7 | 0.729 4 |

由表 4 可知, 方案 2 设置多为景观提升效果较低的设施, 故景观提升效果最低, 方案 4 因设置有植草沟, 故景观提升效果较方案 3 略低; 方案 2、3 布设了雨水利用力度和公众教育宣传力度均低的渗渠, 因此在这两项指标上均低于方案 4; 方案 3、4 均选用了生物滞留设施, 因此在这三项指标中均高于方案 2。故 3 种方案中, 方案 4 为社会效益最高的方案, 在本文研究范围内, 生物滞留设施为社会效益最高的 LID 设施。

4.3 经济效益

生命周期成本(L_{LCC})是指产品经济有效使用期间所产生的一切成本。对于 LID 措施, 生命周期成本包括基础建设成本、后期运营成本及残值(残值是指设施运行到最后能回收的价值)。本文运行年数按 30 年计, 残值取 0。生命周期成本工程法计算公式^[14]为:

$$L_{LCC} = I_0 + M_0 + P_{V_{SUM}} - SP_{V} \quad (3)$$

其中 $P_{V_{SUM}} = [(1+i)^t - 1]/[i(1+i)^t]$ (4)

$$P_V = (1+i)^{-t} \quad (5)$$

式中, I_0 为 LID 措施基础建设成本; M_0 为 LID 措施运营维护成本; S 为 LID 措施残值; $P_{V_{SUM}}$ 为 LID 措施现值和; t 为 LID 措施运行年数; i 为折现率, 参照市政建设项目的经济评价法取 5%; P_V 为折现系数。

结合各组合措施方案中各单项 LID 措施面积, 得到各组合方案的建设成本和运营维护成本见表 5。

表 5 组合方案生命周期成本分析表

Tab. 5 Combined scenario lifecycle cost analysis table

| 方案 | 建造成本 /万元 | 运营维护成本 / (万元 · a ⁻¹) | 总成本 /万元 |
|----|----------|----------------------------------|---------|
| 2 | 274.5 | 3.00 | 277.50 |
| 3 | 320.4 | 2.79 | 323.19 |
| 4 | 284.4 | 2.88 | 287.28 |

由表 5 可看出, 组合方案生命周期成本分别为建造成本中方案 2 < 方案 4 < 方案 3; 运营维护成本中方案 3 < 方案 4 < 方案 2; 总成本中方案 2 < 方案 4 < 方案 3。方案 4 的总成本比方案 2 高 3.5%, 方案 3 的总成本比方案 2 高 16.5%。

综上所述, 生态效益方面, 方案 4 对研究区域的径流控制和污染物削减效果最好。社会效益方面, 方案 4 的景观提升略次于方案 3, 但雨水利用效益与公众教育宣传效益均为最高。经济效益方面, 方案 3 的总成本最高, 方案 4 次之, 方案 2 最低, 方案 4 总成本比方案 2 高 3.5%, 差值较小, 方案 4 经济效益良好。

5 结论

a. LID 组合方案对雨水径流和污染物削减均有较好的控制和削减作用。基于生态效益、社会效益和经济效益分析结果, 对于该研究区域, 方案 4(渗渠 + 植草沟 + 生物滞留设施)为较优方案。其中, 生物滞留设施的生态效益和社会效益较好, 对于径流削减需求较高的既有小区建议优先选择生物滞留设施。

b. 本文未考虑相同面积不同 LID 设施和相同 LID 设施不同面积占比的研究情况, 也未计算各组合方案的地下补水效益和节水效益等, 未来还有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 张仪, 姜应和, 程静, 等. 基于水质水量监测的武汉市雨水径流污染特征分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 52-55.
 [2] 杜颖恩, 侯精明, 马红丽, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施空间格局优化模拟研究[J]. 中国给水排水, 2021,

