

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.03.033

基于SWMM模拟结果的建筑小区海绵改造方案优化研究

王彬¹, 陶燕彬²

(1.武汉市城市建设投资开发集团有限公司,湖北武汉430050;2.武汉市市政工程设计研究院有限责任公司,湖北武汉430040)

摘要:在满足径流控制率等规划指标的条件下,建筑小区海绵改造时可以采用多种LID技术方案,对这些方案如何取舍,设计师往往具有很大的随意性。提出设计前先对小区进行现场观测,并对拟采用的SWMM模型参数进行率定,然后结合不同暴雨重现期的SWMM模拟结果。考虑规划地块水文特性改善、工程造价、环境效益等多因素,利用模糊综合评价方法对LID组合方案综合效益进行评价,最终找出最佳LID工程组合方案。该方法可以为低影响开发技术的应用提供借鉴。

关键词:低影响开发;SWMM;综合效益;模糊综合评价

中图分类号: TU984

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0137-04

0 引言

近年来,全国各地基本已经将海绵城市建设纳入了各项城建规划当中,占城市用地40%以上的建筑居住小区已成为海绵建设的重点区域。然而,小区又是功能最复杂,制约条件最多的城市空间,如何在保证小区的基本道路、停车场、公共活动空间等基础上,优化组合透水铺装、绿色屋顶、植物洼地、雨水花园等各类海绵设施(LID),设计出一个既可以满足径流控制率要求,又能满足小区各项功能,造价不太高的海绵小区,已经成为广大设计人员面临的新课题。

目前国内外一些学者已经对此进行了一些研究,如Jeon,D.J.^[1]运用SWMM对三种低影响开发设施(雨水桶,渗渠,和植被洼地)进行模拟,结果显示组合LID方案的洪峰延迟时间、峰值流量减少、SS削减与组合方案的顺序及暴雨峰值时间敏感相关。Song,J.Y.^[2],Lee,S^[3]以韩国的多个子流域为研究对象,制定了一个多标准决策分析(MCDA)框架,分别用德尔菲法和熵法对主观和客观权重进行量化,考虑两种LID类型和八个位置的十六种组合方案的优先级。贾海峰^[4]基于SUSTAIN系统,以年径流量削减比作为优化目标,对两种LID BMPs方案进行了优化,给出了最具成本-效益的设计方案。李思^[5]使用排水模型结合实测降雨数据,对11种暴雨重现期下

的运行状况进行模拟,确定出了适用于研究区下垫面的4个LID设施方案,并通过效能分析比选出最优方案。王惠^[6]提出了山地城市LID雨洪管理技术综合效能评价的目标、思路和原则,通过模糊综合评价法对各类指标的综合效能进行评价。王婷^[7]、陈隐石^[8]基于SWMM对不同布设比例的LID措施的最优组合进行了相关研究。高佳玉^[9]以西安小寨区域为例,对选定的四项LID设施,分别进行单项及多项组合设计,得到共计125组情景模拟结果,并进行了多目标优化研究。但总的看来,这些方法还主要停留在学术研究上,工程应用还不多,模型使用随意性大,其合理性也仍有可改进之处。

1 SWMM模型及其参数率定

由于SWMM软件开源免费,易于上手,是目前开展城市排水研究的常用工具,很多设计人员都能较熟练的使用这一软件,该软件主要由径流模块、输送模块、扩展输送模块和贮存处理模块等组成,内含径流模型(包括产流和汇流)、管网汇流模型和水质模型。但由于模型参数的设置具有较大的主观性,会严重影响分析结果,因此,为了提高模型的准确性,应该先对拟开展海绵改造的小区进行现状观测,将模拟结果与实际排水观测数据进行对照,对模型参数反复调整率定,直到满足精度要求。

1.1 海绵改造的小区概况

该小区位于武汉市汉阳四新区,占地面积约2.3万m²,总建筑面积约3.1万m²,绿化率35%,是由8栋一梯

收稿日期:2022-04-29

作者简介:王彬(1971—),男,学士,工程师,从事工程建设管理工作。

两户的11层小高层组成的商业住宅小区,小区由一个独立的排水口接入市政排水管网。通过实地勘测划分区域汇水面积,共42个子汇水区。研究区包括49个节点、62段管段和1个排水口,研究区雨水系统的概化示意图见图1。



图1 研究区管网汇水区概化示意图

1.2 模型参数率定

本研究采用人工率定方法,实际降雨采用了2019年9月10号和2019年9月19号武汉的两场实测数据,降雨过程分别见图2、图3。

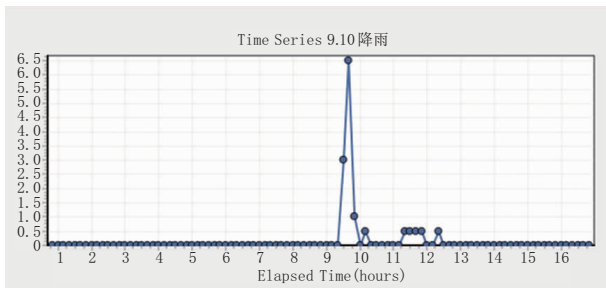


图2 2019年9月10日降雨过程

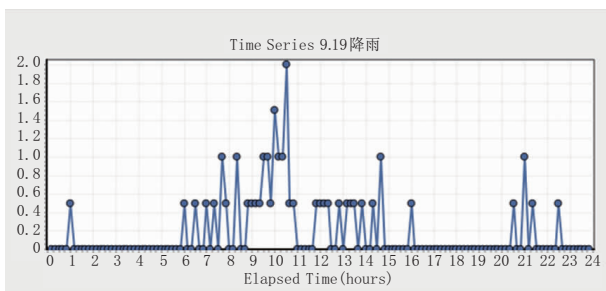


图3 2019年9月19日降雨过程

以小区排口的检查井为节点,在检查井内取样测量,根据水位和流速计算流量。通过实测节点水深、流量和SS浓度数据与模型在实测降雨条件下模拟出来的数据进行对比,利用控制变量法对模型系统中的参数进行多次调整之后,使得节点的实测数据与模拟数据的误差处于允许范围之内。模型参数调整情况见表1。调整参数后的模型在9月19日降雨下模拟得到小区排口的流量和SS值,与实测值对比分别见图4、图5。从图中看出调整参数后的模型可以较好的反映试验区的实际降雨情况。

表1 参数调整情况

编号	参数	原始值	调整值
1	最大增长	20	19
2	速率常数	0.5	0.5
3	冲刷系数	0.05	0.05
4	冲刷指数	1.5	1.2
5	管道曼宁系数	0.013	0.009
6	坡度	0.5%	2%
7	不渗透性	40%	40%
8	不渗透性粗糙系数	0.03	0.03
9	渗透性粗糙系数	0.2	0.2
10	不渗透性洼地蓄水	2 mm	1 mm
11	渗透性洼地蓄水	12 mm	12 mm
12	无洼地蓄水不渗透性	40%	40%

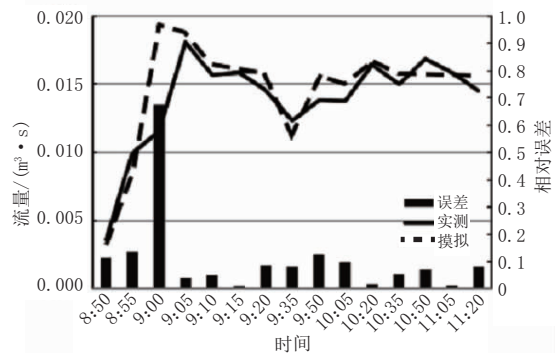


图4 试验小区排水口流量实测值与模拟值对比图(单位:m³/s)

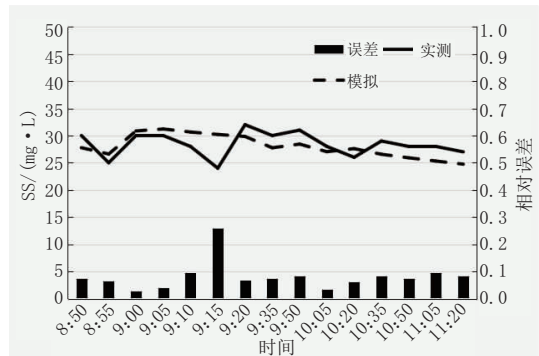


图5 试验小区排水口SS浓度实测值与模拟值对比图

2 改造小区的不同LID方案模拟

根据海绵改造建设需要,设计提出应用不同功能LID改造方案对拟开发小区进行改造。采用芝加哥暴雨过程线模型合成降雨情景,根据《武汉市排水防涝系统规划设计标准》,武汉市短历时暴雨强度采用以下公式计算:

$$P = 0.5 \sim 10 \text{ a}$$

$$q = \frac{885[1+1.58 \lg(P+0.66)]}{(t+2.26)^{0.604}} \quad (1)$$

$$P = 10 \sim 50 \text{ a}$$

$$q = \frac{577(1+0.96 \lg P)}{(t+2.26)^{0.432}} \quad (2)$$

$$P = 100 \text{ a}$$

$$q = \frac{1.057}{(t-0.57)^{0.317}} \quad (3)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$; P 为重现期, a; t 为降雨历时, min。

总降雨历时 t 取 2 h, 根据上式合成 $P=1$ a、5 a、10 a、50 a、100 a 不同重现期下的降雨, 图 6 为 $P=5$ a 时的设计降雨过程线, 模拟时长取 4.5 h。

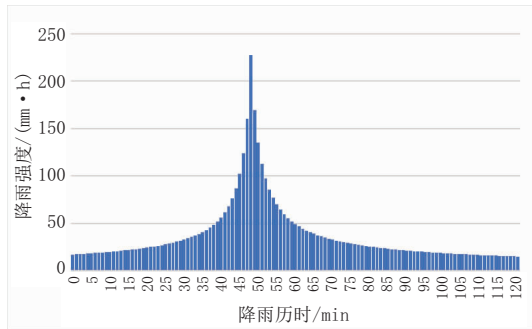


图 6 $P=5$ 设计降雨过程线(单位: mm/h)

2.1 改造小区 LID 方案设计

经考察分析, 本建筑小区内可用于 LID 设施改造的区域主要包括建筑物屋顶、不透水路面、下凹绿地。根据《海绵低城市建设技术指南》, 综合考虑各种 LID 设施的使用特点, 结合地块特征, 确定拟使用的 LID 改造措施有生物滞留池、绿色屋顶、雨水花园、植草沟、植草类透水砖、非植草类透水砖。对此分别设计了三种 LID 改造方案。

方案 A 采用雨水花园、非植草类透水砖、植草类透水砖、植草沟四种 LID 设施, 各种设施在子汇水区的面积占比见表 2。

方案 B 在方案 A 的基础上, 将雨水花园改成等面积的生物滞留池, 两类透水砖均改为等面积渗透铺装。

方案 C 采用绿色屋顶、渗透铺装、生物滞留池, 其中绿色屋顶与方案 A 中雨水花园的面积相同, 渗透铺装与两类透水砖面积相同, 生物滞留池与植草沟面积相同。

2.2 设计方案水文模拟分析

利用 SWMM 模拟, 对三个设计方案在径流量削减、峰值延迟和污染物削减三个方面的控制效果进行分析。以方案 A 为例, 其模拟结果见表 3。

从方案 A 的模拟结果可以反映, 应用后试验区的水文水质特征都得到一定的改善。但随着暴雨重现期的增大, 径流量、峰流量以及污染物的削减率均在减小。

其他各方案在进行改造后其削减率均发生了较大变化, 表 4 给出了其相应的变化情况。

表 2 方案 A 中 LID 占比

子汇水区	LID 设施	占比 / %	子汇水区	LID 设施	占比 / %
S3	雨水花园	2.60	S83	植草沟	4.44
S4	雨水花园	5.20	S84	植草沟	4.90
S63	雨水花园	6.32		植草沟	3.57
S64	雨水花园	2.51	S85	植草类透水砖	1.49
S65	非植草类透水砖	42.29	S86	雨水花园	12.03
S66	非植草类透水砖	18.40	S87	雨水花园	11.43
S67	植草沟	3.64	S88	植草沟	5.44
S68	植草沟	10.45	S89	植草类透水砖	53.60
S69	植草沟	2.60	S90	植草类透水砖	17.31
S70	植草沟	11.58	S91	植草类透水砖	20.13
S71	雨水花园	24.41		雨水花园	33.59
S72	雨水花园	18.80	S92	植草类透水砖	23.44
S75	植草沟	11.34	S93	植草类透水砖	6.45
S76	植草类透水砖	17.18	S94	植草类透水砖	13.99
S77	植草沟	12.11	S95	植草类透水砖	26.58
S78	植草类透水砖	12.81	S96	雨水花园	29.36
S79	植草沟	5.70	S98	雨水花园	25.67
	植草沟	3.75	S99	植草类透水砖	12.24
S80	植草类透水砖	1.49	S100	雨水花园	13.29
—	—	—	S101	植草类透水砖	13.77

表 3 方案 A 模拟结果

重现期 P	改造状态	径流量 / mm	峰流量 / $(m^3 \cdot s^{-1})$	峰现时 间 / min	溢流节 点数	SS/kg
1	改造前	17.233	0.285	50	0	11.302
	改造后	12.479	0.162	51	0	6.651
	削减率	27.59%	43.16%	1	—	41.15%
5	改造前	28.377	0.442	50	3	15.215
	改造后	23.566	0.305	51	3	10.482
	削减率	16.95%	31%	1	—	31.11%
10	改造前	35.167	0.52	50	4	17.504
	改造后	30.58	0.404	50	4	12.563
	削减率	13.04%	22.12%	0	—	28.23%
50	改造前	60.449	0.745	50	5	24.078
	改造后	56.355	0.728	50	5	22.41
	削减率	6.77%	2.28%	0	—	19.89%
100	改造前	79.255	0.875	50	9	28.836
	改造后	75.154	0.871	50	11	23.966
	削减率	5.17%	0.46%	0	—	16.89%

表 4 各方案水文效益一览表

方案	污染物 去除率 / %	径流总量 减少率 / %	洪峰 削减率 / %	洪峰推迟 时间 / min
A	41.15	27.59	43.16	1
B	71.45	64.64	75.09	1
C	53.26	45.78	38.6	0

3 不同设计方案的综合效益评价

3.1 LID 组合方案评价体系建立

不同 LID 设施对径流总量、峰值流量和污染物负荷的控制效果不同,技术难度、建设及后期维护的费用也存在差异,同时在选用方案时,在满足控制目标的前提下,还需考虑 LID 组合方案的环境和社会效益。综合考虑 LID 组合方案的评价因素,影响方案综合效益的评价指标包括经济效益(建造成本、维护成本)、社会效益(雨水补充地下水效果、景观价值、工程可行性)和水文效益(径流总量减少率、排放口污染物负荷控制率、洪峰延迟效果)。图 7 为 LID 综合效益评价指标体系,本文确定综合效益评价指标体系权重需要利用层次分析法(AHP)作为工具,进而建立模糊综合评价模型。

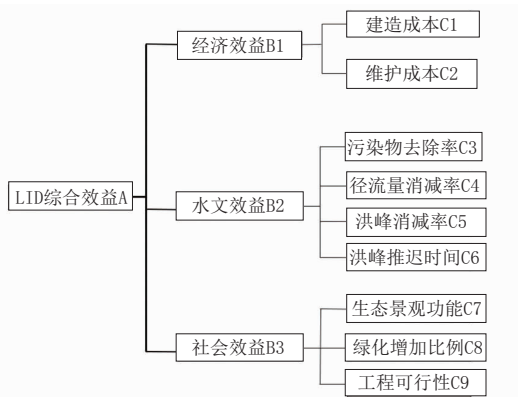


图 7 LID 综合效益评价指标体系

3.2 权重指标的确立

在 LID 综合效益的各项影响因子中,有的是定量指标,有的是定性指标,由于各指标量纲不同,在分析之前,先对数据进行处理,将定性指标转化为定量指标。参照现有国家及行业规范和技术导则,结合实际调研和专家意见,确定了 9 个指标评判准则,并将社会效益评价分为 5 个等级,将上述计算各方案的指标数值汇总,得到 LID 综合效益评价各项指标总表,见表 5。

本文对 15 位专家进行问卷,并采用聚类分析法计算专家自身权重系数,聚类原理是通过分析不同专家对同一变量打分的差异^[10],得到指标体系各个层级的权向量:

$$W_1=(0.574\ 2, 0.425\ 8)$$

$$W_2=(0.719\ 1, 0.379\ 3, 0.425\ 8)$$

$$W_3=(0.305\ 4, 0.212\ 4, 0.482\ 2)$$

根据合成方法, W 为第 i 个指标下各因素对于它的权重, R 为模糊矩阵,将指标层向量转化为精确的

表 5 LID 综合效益各指标数值总表

指标	方案			
	A	B	C	
经济效益 (W_1)	1 建造成本 I (元· m^2)	584.35	468.74	422.04
	2 维护成本 I (元· m^2)	27.81	21.80	16.57
水文效益 (W_2)	3 污染物去除率 I %	41.15	71.45	53.26
	4 径流总量减少率 I %	27.59	64.64	45.78
	5 洪峰削减率 I %	43.16	75.09	38.60
	6 洪峰推迟时间 I /min	1	1	0
社会效益 (W_3)	7 生态景观功能	4.25	3.99	3.69
	8 绿化增加比例	3.96	4.13	4
	9 工程可行性	3.75	4.01	3.88

数学评分,得到该方案的模糊综合评价结果向量 B 。

对 A 方案:

$$B_1=(0.198\ 5, 0.423\ 2, 0.287\ 3, 0, 0.008\ 1)$$

对 B 方案:

$$B_2=(0.428\ 9, 0.474\ 4, 0.015\ 7, 0, 0.081)$$

对 C 方案:

$$B_3=(0.386\ 8, 0.494\ 7, 0.037\ 5, 0, 0.081)$$

根据最大隶属度原则,方案 A、方案 B 与方案 C 的 LID 应用综合效益均处于较高水平。利用和积法,将 B_1 、 B_2 、 B_3 转化为精确的数学评分,由此得到三种方案的综合效益分值分别为 0.731 6、0.843 0 和 0.821 3,说明综合效益排序:方案 B>方案 C>方案 A,方案 B 的综合效益最佳,因此,最终规划设计时采用了方案 B。

4 结 语

随着我国城市更新运动的开展,海绵改造也基本呈常态化发展,建筑小区作为城市用地的主体,自然是海绵城市建设的重点,为了实现径流控制目标,设计人员可以采取多种 LID 措施,但选择何种 LID 设施目前还存在比较大的随意性。

采用 SWMM 模型分析不同海绵改造方案的径流变化特征,通过模糊综合评价方法,综合考虑海绵改造小区的水文条件改善、工程造价和维护成本以及社会效益多种因素,构建了试验小区 LID 综合效益评价体系,通过层次分析法获得指标权重,并得到每一指标层的得分,最终可以对不同 LID 改造方案进行排序,从而获得最优 LID 设计改造方案,这一方法可以为广大规划设计单位提供重要参考。

参考文献:

[1] Jeon,D.J.,et al.Assessing the efficiency of aggregate low impact development (LID) at a small urbanized sub-catchment under different

(下转第 153 页)

子,顶推千斤顶回缩活塞,带动一体化顶推装置向前移动。活塞回缩到位后,利用自动锚固装置控制销子将一体化顶推装置固定在下滑道,即可再次对钢梁进行顶推,如此往复。

5.2 智能泵站

新型千斤顶采用 BZ50 超高压智能泵站,系统压力为 50 MPa,泵站流量为 72 L/min,油缸内径 $D=36$ cm。通过智能泵站,可以自动控制左右 2 台千斤顶的顶推力,消除了常规泵站左右压力控制需要人为控制,导致顶推力不平衡的问题,消除了钢桁梁顶推过程中横向偏移的问题。

5.3 改进效果

一台泵站控制两台千斤顶,每次顶升 2 m 行程需要时间为:

$$S_1 = (2 \times \pi D^2/4 \times h)/Q = 4.8 \text{ min}, \text{按 } 5 \text{ min 计。}$$

回缩每个行程需要时间为: $S_2 = \{2 \times [\pi (D^2-d^2)]/4 \times h\}/Q = 3 \text{ min}。$

170 t 千斤顶一个行程顶升回缩需要 8 min,即钢桁梁每向前推进 2 m,总共需要 8 min。

第一次顶推距离为 54 m,使导梁到达前方 45# 桥墩的水中钢支架,形成简支状态,总共时间 $S=54 \text{ m}/2 \text{ m} \times 8 \text{ min}=216 \text{ min}$ 。第二次顶推距离为 49 m,钢桁梁到达设计位置,总共时间 $S=49 \text{ m}/2 \text{ m} \times 10 \text{ min}=196 \text{ min}$,总共顶推时间约 7 h。

跨青阳港航道 80 m 钢桁梁完成顶推作业总用时为 7 h,总行程 103 m,综合顶推速度为 14.7 m/h,较本工程另一 64 m 跨径钢桁梁采用的常规方法的顶推速度 10.2 m/h,顶推速率提高了 44%。通过实践证明,顶推装置改进是成功、有效的,验证了该顶推系统具有安装方便、顶推速度快等绝对优势,具有广泛推广的价值。图 9 为钢桁梁顶推到位后的现场照片。



图 9 新型千斤顶

6 结语

本文以青阳港特大桥 80 m 下承式钢桁梁跨青阳港航道顶推施工为工程背景,介绍了顶推施工技术的改进。该工程采用钢桁梁顶推方法施工,通过将钢桁梁拼装支架与桥梁下部结构相结合形成顶推施工平台。根据长行程千斤顶的工作原理,将一体化自锚式顶推装置与滑道相结合,形成自锚式的动力系统。顶推装置将千斤顶与反力架合成整体,达到千斤顶与反力架同步前进的效果,顶推过程中大大减少了作业人员数量。利用钢桁梁自身结构特点与配套设备的优点,在一个白天完成钢桁梁跨越青阳港,最大限度减少对既有航道的影响。该施工方法具备一定的普适性,可为类似工程提供一定的借鉴^[5]。

参考文献:

- [1] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016,29(2):32-43.
- [2] 张奉春.双线铁路超大跨度连续钢桁梁多点同步顶推施工技术研究[J].铁道建筑技术,2016(4):10-14.
- [3] 李志伟.连续钢箱梁拖拉系统设计及施工[J].铁道建筑技术,2016(4):28-31,52.
- [4] 王国委.重物移运器在架设跨铁路连续钢箱梁中的应用[J].科技创新与应用,2017(6):241-242.
- [5] 李学超.繁忙干道改造上跨铁路咽喉区桥梁顶推施工技术[J].城市道桥与防洪,2021(6):199-203.

(上接第 140 页)

- storm scenarios[J].Desalination and Water Treatment,2017(86):1-8.
- [2] Lee,S.B.,et al.Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM [J].Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research,2010,62(6):1401-1409.
 - [3] Song,J.Y.,E. Chung.A Multi-Criteria Decision Analysis System for Prioritizing Sites and Types of Low Impact Development Practices: Case of Korea[J].WATER,2017(9):2914.
 - [4] 贾海峰,姚海蓉,唐颖,等.城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J].水科学进展,2014(2):260-267.
 - [5] 李思.排水模型和 LID 技术在海绵城市中的应用[D].北京:清华大学,

- 学,2015.
- [6] 王惠.山地城市 LID 雨洪管理技术综合效能的模糊综合评价法的研究及应用[D].重庆:重庆大学,2016.
 - [7] 王婷,刁秀媚,刘俊,等.基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):39-43,128.
 - [8] 陈隐石.城市降雨径流控制 LID-BMPS 实证研究[D].苏州:苏州科技学院,2014.
 - [9] 高佳玉.老城区海绵设施多目标布局优化研究[D].西安:西安理工大学,2014.
 - [10] 王渲.城市降雨径流污染特征及预测模型研究[D].武汉:武汉大学,2018.