

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.001

基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价

陈 垚^{1,2}, 何智伟², 张 琦², 段玲红², 秦 宇^{1,2}, 熊 毅³

(1. 重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 重庆西恒工程咨询有限公司, 重庆 401120)

摘要:为正确评价中小尺度低影响开发(LID)措施改造方案的水文控制效能,以重庆市秀山县海绵城市建设试点为例,将LID措施的生态、经济和社会效应具体量化为径流量控制、径流污染控制、建设成本、维护管理成本和径流利用效益等5个指标,构建了基于水文控制目标的LID措施评价体系,并利用暴雨管理模型(SWMM)对不同LID设施改造方案的暴雨径流水文过程进行了验证模拟。研究表明:现有LID措施因其规模占比过小且组合方式不合理而对暴雨径流的水文控制效果不佳,不满足75%年径流总量控制率目标,需进行扩容和组合优化;LID设施改造方案综合评价结果显示综合评分与径流总量控制率、峰值流量削减率等水文控制指标呈显著正相关,可直接作为中小尺度海绵城市改造方案评价。

关键词:海绵城市;水文控制;暴雨管理模型;低影响开发;改造方案;承载能力

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0001-08

Evaluation of reconstruction schemes for small- and medium-scale sponge city based on hydrological control target
//CHEN Yao^{1,2}, HE Zhiwei², ZHANG Qi², DUAN Linghong², QIN Yu^{1,2}, XIONG Yi³ (1. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chongqing Xiheng Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to correctly evaluate the hydrological control effectiveness of small- and medium-scale low impact development (LID) reconstruction schemes, taking the construction pilot of Xiushan sponge city in Chongqing as an example, the ecological, economic and social effects of LID measures are specifically quantified into five indicators, i. e. runoff control, runoff pollution load control, construction cost, maintenance and management cost and utilization efficiency of rainwater, and an evaluation system of LID measures based on hydrological control target was constructed, and the rainstorm runoff hydrological processes in different LID retrofitting scenarios were simulated and verified by stormwater management model (SWMM). The results show that the existing LID measures have poor hydrological control effect on Rainstorm Runoff because of their small scale and unreasonable combination. They do not meet the target of 75% annual total runoff control rate and need to be expanded and optimized. The comprehensive evaluation results of LID facilities renovation scheme show that the comprehensive score is significantly positively correlated with hydrological control indexes such as total runoff control rate and peak flow reduction rate, which can be directly used as the evaluation of small- and medium-scale sponge city renovation scheme.

Key words: sponge city; hydrological control; SWMM; LID; reconstruction scheme; carrying capacity

近年来,传统城市开发模式显著改变了局部地区的自然水文循环过程,导致地面径流量增加,峰值提前,河流地貌及其水文情势改变,并最终造成水生栖息地退化、水体水质恶化和生物多样性丧失等一

系列生态环境问题^[1-3]。为提高城市可持续性和宜居性,改善雨水排放系统的生态完整性,我国提出了海绵城市这一新型城市雨洪管理理念,其核心途径为低影响开发(LID)^[4-5],旨在从源头上通过雨水滞

基金项目:重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0292);国家自然科学基金(51709024);重庆市研究生科研创新项目(CYS17200,CYS18219);重庆市留创计划(cx2017065)

作者简介:陈垚(1983—),男,教授,博士,主要从事水污染防治与城市雨洪管理研究。E-mail:chenyao@cqjtu.edu.cn。

留、渗透、蒸发和回用等循环过程模拟自然水文功能,实现控制地表径流和削减峰值流量、延缓产流时间、改善下渗特性、增加生态基流和净化污染物的目的^[1,3,4,6-7],以期恢复城市水文过程和河流径流情势至近自然状态^[3,8]。LID 措施包括透水路面、雨水花园、植草沟、绿色屋顶、雨水塘等分散式雨水控制措施。LID 措施作为径流控制措施,从源头上削减雨水径流,是一种适用于城市区域的小规模、分散式的雨水管理措施。作为目前城市雨洪管理的技术措施,LID 能否真正实现我国海绵城市建设目标,是目前最为关心的问题,而解决这一问题的途径在于构建一种用于评价中小尺度海绵城市改造方案中 LID 措施效益和性能的方法^[9]。国外学者对 LID 措施的评价方法主要基于水文模型方法,并以此开发了 SUSTAIN、BMPDSS 等评价模型^[10-11]。这些模型虽可用于不同尺度下 LID 措施的评价分析,提出单位径流控制成本最低的 LID 布设方案,但仅考虑建设成本,并未考虑雨水资源利用价值、景观价值和生态功能价值等社会效益,以及 LID 措施的综合水文性能^[12]。国内鲜见 LID 技术措施的性能评价方法研究,且主要集中在利用 SUSTAIN、BMPDSS 等模型在国内案例中的应用评价^[9,11]。

虽然众多学者针对 LID 措施性能方案评价提出了一套相应的指标体系,但大多集中在 LID 措施的成本效益评价研究上,缺少针对中小尺度下 LID 布设方案与经济成本、水文控制性能、社会效益等目标的耦合评价研究,鲜有研究直接以 LID 设施水文调控性能为目标,通过构建 LID 布设方案的评价体系提出 LID 措施优化组合方案。我国海绵城市建设刚起步,缺乏对 LID 设施水文控制效果监测的系统研究,同时,受气候特征和地域条件等基本国情的影响,难以直接照搬相关研究结论和技术标准。海绵城市建设时间紧且考核任务重,往往要求实施 LID 措施后便能满足相应的考核目标,因此,亟须建立一套适合于中小尺度 LID 改造方案的综合性能评价体系。为确保海绵城市建设实施措施的有效性,并及时调整实施方案,本文通过布点实测和利用 SWMM 模型分析秀山县海绵城市改造区域的实施效果,构建基于水文调控目标的 LID 措施综合性能评价体系,并对 LID 设施的实施方案进行扩容与组合优化评价,以期为我国海绵城市建设提供参考。

1 研究区域概况

秀山县为重庆市 3 个市级试点海绵城市之一,实施的试点区域位于秀山城区南部新城,由 16 个相对独立的排水片区组成,分 3 期建设,总面积为

8.08 km²。秀山地处武陵山区腹地,为典型的亚热带湿润气候区,降雨充沛集中,伏旱明显。根据秀山气象站 55 年(1960—2014 年)的逐月降水量数据统计,城区多年平均降水量约 1350 mm,降雨主要集中在 6—9 月,降水量占全年的 55%,且夏季降雨多以暴雨形式出现,发生暴雨的主雨峰靠前,降雨历时短,易发生内涝灾害。本文研究区域为传统开发模式的建成区,位于梅江河以西,建有渝秀大道(东西)和学府大道(南北)两条交通主干道,以及政府大楼、中学、体育公园和居住小区,占地 61 hm²。建成区内建有完善的雨污分流排水设施,雨水管管径为 1000~2000 mm,管道总长约 4.5 km。为获得 SWMM 模型所需的水文气象数据,在城建大楼楼顶和渝秀大道 2 处雨水排口位置分别安装有 1 处雨量站和 2 套流量监测仪器,自 2016 年 12 月 1 日起开始为期 1 年的降水量与径流量实时监测。研究区域位置见图 1。



图 1 研究区域位置

2 模型构建

根据管网数据资料和水文气象数据(降雨和径流量实测数据),结合研究区域地形和土地利用类型图,构建 SWMM 模型,将研究区域概化为 27 个子汇水区、36 个节点、33 个管段和 2 个总排水口(图 2)。模型构建时,LID 设施的结构参数主要根据模型手册典型值^[13]和实际设计参数设定(表 1),而模型的水文参数则根据实际资料、模型手册典型值范围^[13]和相关文献设定^[14-15]。首先利用摩尔斯分类筛选法^[16]对模型的不确定参数进行局部灵敏性分析。在确定敏感水文参数后,采用人工试错法对敏感参数值进行调整,并利用 2017 年 7 月 8 日实测降雨径流数据(中雨)率定模型参数,经过 6 次参数调整后,模型的 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS 值)为 0.772,表明模拟结果与实测值相吻合(图 3)。为进一步提高模型应用的准确性和可信性,采用 2017 年

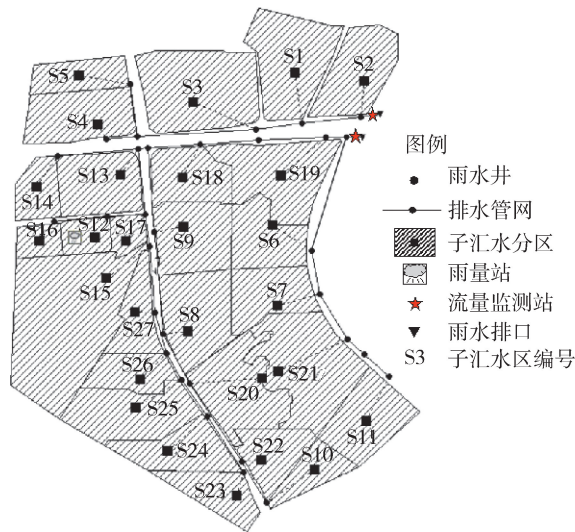
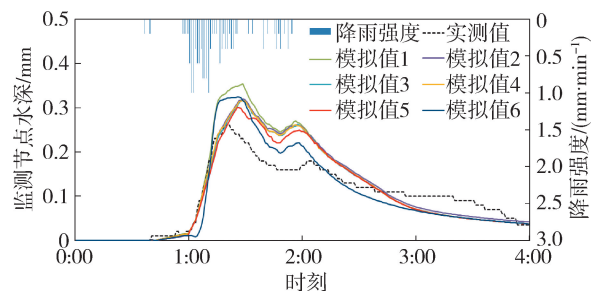


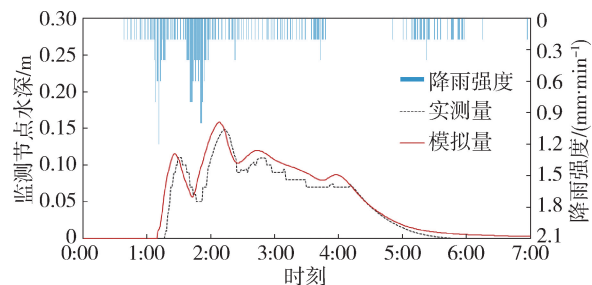
图2 模型概化

表1 LID措施参数设置

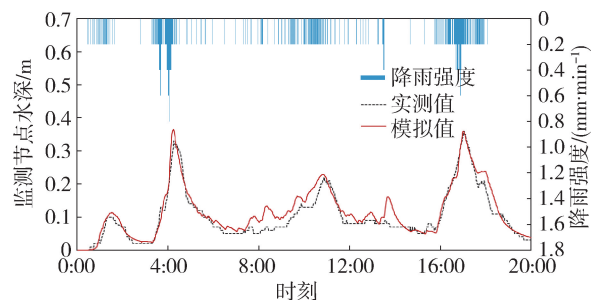
LID 措施	过程层	参数	参数值
雨水花园	表 层	蓄水深度	400 mm
		植被覆盖	0.8
		表面粗糙系数	0.28
		表面坡度	0
	土壤层	厚 度	600 mm
		孔隙率	0.6
		产水能力	0.2
		导水率	180 mm/h
	蓄水层	厚 度	300 mm
		孔隙率	0.55
		导水率	18 mm/h
	暗 渠	排水系数	3.5
排水指数		10	
偏移高度		2 mm	
植草沟	表 层	蓄水深度	200 mm
		植被覆盖	0.75
		表面粗糙系数	0.25
		表面坡度	1.0%
透水铺装	表 层	蓄水深度	15 mm
		表面粗糙系数	0.22
		表面坡度	2%
	路面层	厚 度	100 mm
		孔隙率	0.25
		渗透性	30 mm/h
	找平层	厚 度	30 mm
		孔隙率	0.5
		导水率	20 mm/h
		吸水头	3.5
蓄水层	厚 度	430 mm	
	孔隙率	0.35	
	导水率	15 mm/h	
暗 渠	排水系数	3.3	
	排水指数	0.6	
	偏移高度	2 mm	



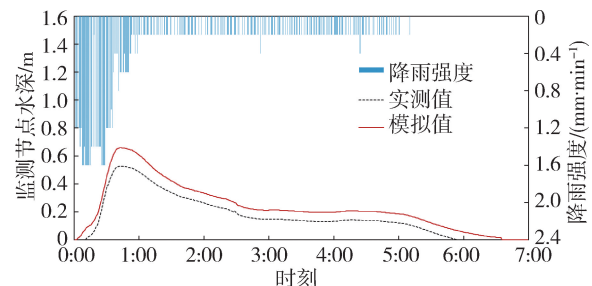
(a)2017年7月8日(中雨,NS₆值为0.772)



(b)2017年6月5日(大雨,NS值为0.891)



(c)2017年6月22日(暴雨,NS值为0.881)



(d)2017年9月27日(暴雨,NS值为0.760)

图3 参数率定与降雨径流过程验证计算结果

终得到适用于研究区域的各参数值(表2)。

表2 模型水文参数灵敏性与率定结果

参数	灵敏性				初始值	率定值
	小雨	中雨	大雨	暴雨		
不渗透性粗糙系数	#,&				0.01	0.02
渗透性粗糙系数			#	#	0.01	0.024
不渗透性洼地蓄水量	#,&	#,&			2.0 mm	3.5 mm
渗透性洼地蓄水量				&	5.0 mm	15 mm
无洼地蓄水不渗透性					25%	20%
最大渗入速率			#		30 mm/h	76 mm/h
最小渗入速率					0.5 mm/h	10 mm/h
渗入衰减系数			#	#	4.0 h ⁻¹	4.0 h ⁻¹
管道粗糙系数					0.014	0.014

注:“#”表示水文参数对峰值流量具有灵敏性;“&”表示水文参数对径流总量具有灵敏性。

6月5日、6月22日和9月27日3场实测降雨径流数据(大雨和暴雨)进行模型验证,模型的NS值均大于0.75,模型预测的降雨径流过程曲线基本与实测值相重合(图3),满足模型应用的精度要求。最

相关研究指出,降雨场次控制率较年径流总量控制率更有实用意义,一般而言 90% ~ 95% 降雨场次控制率大致对应 80% ~ 85% 年径流总量控制率^[17-20]。根据当地气象站 1962—2017 年日降雨数据,扣除降水量小于 2 mm 的日降雨事件后^[19],共计 5 630 场次降雨事件,统计分析后可得设计降水量与场次控制率的对应曲线如图 4 所示。

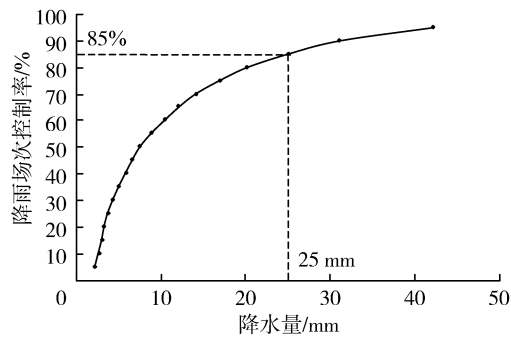


图 4 降雨场次控制率-设计降水量曲线

秀海绵城市建设径流总量控制目标为 75%，其所对应降雨场次控制率约为 85%，即有效控制降水量不超过 25 mm 的场次降雨,使中、小雨等级的降雨不产生积水内涝。由于在利用 IBM SPSS Statistics 软件的多元线性逐步回归法分析不同降雨事件中降水量、降雨峰值、平均降雨峰值和降雨历时等因素对径流的影响时,发现降水量、降雨峰值和降雨历时 3 个参数对降雨径流影响显著,因此,在控制降水量不超过 25 mm 的中、小雨时,应根据降雨历时和降雨峰值分析不同降雨强度的场次降雨事件。

3 现有 LID 措施布局方案及水文调控效果

3.1 现有 LID 措施布局方案

研究区域现存 LID 设施雨水花园、植草沟和透水铺装 3 种,具体空间布局见表 3。研究区域经 LID 改造后,将下垫面划分为绿地、雨水花园、植草沟、透

水铺装、硬地路面和房屋建筑等 6 种土地利用类型。其中,透水铺装面积 79 770 m²,占 13.1%;雨水花园 4 742 m²,占 0.8%;植草沟 3 036 m²,占 0.5%;绿地 191 549 m²,占 31.4%;硬地路面 206 901 m²,占 33.9%;房屋建筑 124 002 m²,占 20.3%。

3.2 现有 LID 措施对降雨径流的水文调控效果

通过对 2016 年 12 月至 2017 年 12 月为期 1 年的径流量监测数据统计分析,发现研究区域进行 LID 措施改造后,径流总量控制率和峰值流量削减率分别为 67.4% 和 59.7%,并未达到 75% 年径流总量控制率目标。为验证这一结论,将 25 mm 设计降水量(对应 85% 降雨场次控制率和 75% 年径流总量控制率目标)按 24 h、6 h 和 2 h 3 种降雨历时进行降雨过程设计,并运用 SWMM 模型分析现有 LID 设施改造后对降雨径流的水文调控效果,结果见图 5。

研究结果表明,现有 LID 措施改造后研究区域在不同降雨情形下均无法满足降雨场次控制率要求,即无法达到 75% 的年径流总量控制目标。通过对各子汇水区域降水量、下渗量、径流量与峰值流量等雨洪参数的分析,认为现有 LID 设施布局方案存在如下不足:① LID 设施占比规模过小,仅为 14.4%,特别是有些不透水率较大的区域尚未进行 LID 改造;② LID 设施组合不合理,雨水花园和植草沟等生物滞留设施占比仅为 1.3%,仅为透水铺装设施占比的 10%,而单项 LID 措施的实测与模拟数据均表明透水铺装仅对峰值流量起削减作用,而生物滞留设施对径流总量的削减效果更佳。因此,需对现有 LID 措施进行扩容与组合优化,同时 2 h 历时的降雨径流模拟更能反映当地短历时雨型的降雨特征,根据该降雨条件下各子汇水区域产流情况,需重点对 S1、S2、S3、S8、S9、S11、S13 和 S21 等子汇水区域进行 LID 措施的扩容与重新组合。

表 3 现有 LID 措施布局

分区 编号	透水铺装面积/ m ²	雨水花园面积/ m ²	植草沟面积/ m ²	不透水率/ %	分区 编号	透水铺装面积/ m ²	雨水花园面积/ m ²	植草沟面积/ m ²	不透水率/ %
S1	715		100	77.8	S18	4744	274	479	18.5
S2	715		177	72.3	S19	12316	1682	450	29.5
S3	2049		260	75.0	S20	1791	289	400	44.4
S4	2050		67	30.6	S21	3120	469	200	54.9
S6	6444	200	69	46.6	S22	1104	168	343	59.7
S7	6444	200	100	48.5	S23	2334	163		41.8
S8	7183			47.0	S24	3372	254		53.4
S9	7183			41.3	S25	3667	367		59.2
S11			71	63.1	S26	3095	168		43.5
S12	1653	130		62.4	S27	2044	68		39.0
S13	5824	10	320	59.4	S18	4744	274	479	18.5
S17	1922	100		42.1	S19	12316	1682	450	29.5

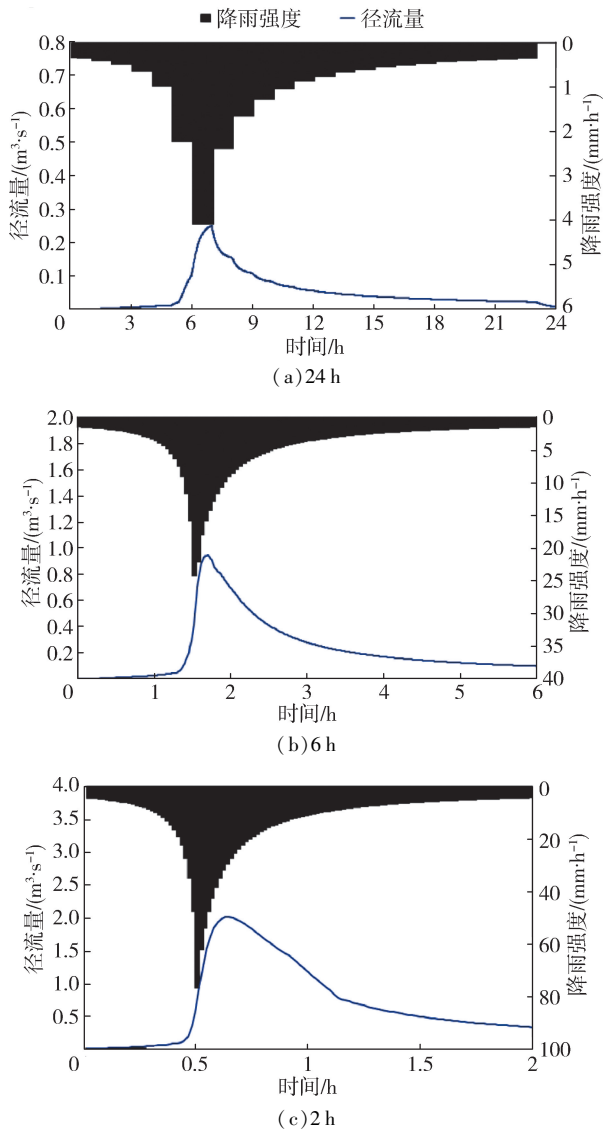


图5 现有LID措施改造后的降雨-径流关系

4 LID措施改造方案

城市化后地表产流能力显著增强,产流过程显著加快,容易产生内涝等问题,因此需要对其进行LID改造。为满足研究区域LID改造后区域年径流控制率不低于75%的要求,应尽可能对传统硬地路面和绿地在满足其功能用途的条件下增加LID改造比例,主要通过控制雨水花园比例、植草沟比例、透水铺装比例及其组合方式得出各类设施的控制指标值,并根据实际方案布置各类设施的控制比例。LID措施的扩容布置方案见图6。①方案1:人行道和市政广场全部改造为透水铺装;将雨水花园(2%) + 植草沟(3%)组合形式布置于低洼、径流终端、建筑物附近等区域的传统绿地上。②方案2:人行道以透水铺装(96%) + 植草沟(4%)组合形式进行改造;市政广场以透水铺装(97%) + 植草沟(3%)组合形式进行改造,植草沟布置于道路两侧或建筑物附近;传统绿地以雨水花园(3%) + 植草

沟(2%)组合形式改造。③方案3:人行道以透水铺装(94%) + 植草沟(6%)组合形式改造;市政广场以雨水花园(2%) + 植草沟(1%) + 透水铺装(97%)组合形式改造,雨水花园主要布设于建筑物四周;传统绿地以雨水花园(4%) + 植草沟(1%)组合形式改造。④方案4:人行道以透水铺装(92%) + 植草沟(8%)组合形式改造;市政广场以雨水花园(3%) + 透水铺装(97%)组合形式改造;传统绿地仅采用雨水花园改造。

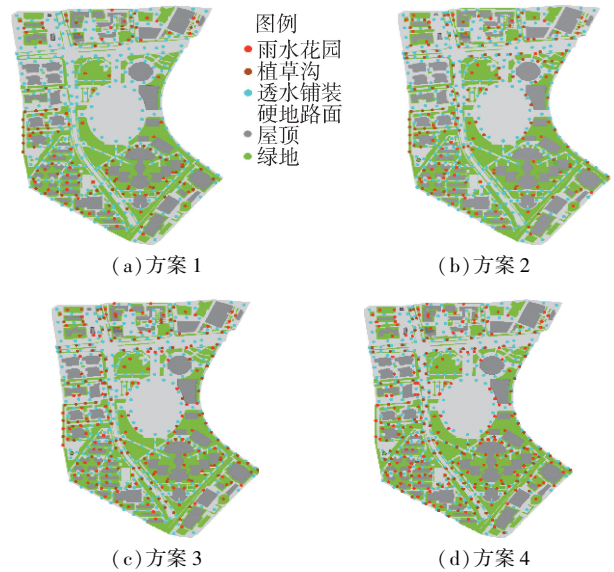


图6 LID措施扩容改造布局方案

5 LID措施改造方案评价方法

5.1 评价指标体系建立

海绵城市中LID措施是一项涵盖水文、生态、经济和社会效益的雨洪管理技术,可将LID措施综合性能具体量化为径流控制(A_1)、径流污染削减(A_2)、建设成本(A_3)、维护管理成本(A_4)和利用效益(A_5)等指标进行评价。其中,生态效益主要体现在LID措施对径流污染量的削减,以实现对水系生态功能的保护与修复,故采用 A_2 指标对其生态效益进行评价;经济效益采用 A_3 和 A_4 两个指标进行综合评价。结合LID措施的结构特性和功能特点,对5个指标进行分析、赋值与评价,构建LID措施性能的评价指标体系。

a. 径流控制(A_1)。LID措施的径流控制性能又可采用径流量控制(A_{11})、峰值流量削减(A_{12})和洪峰延迟(A_{13})等3个二级指标体系进行评价分析。由于LID措施对径流的控制可通过滞留(a_1)、吸附(a_2)、入渗(a_3)、过滤(a_4)、蒸发蒸腾(a_5)和植物吸收(a_6)等6个水文途径实现,因此,在评价LID措施径流控制性能时,首先结合国内外对LID措施技术特点的理论研究与实践经验,对LID措施各水文途

径在径流控制中所起的作用效果进行量化分析,然后再根据水文途径在 A_{11} 、 A_{12} 和 A_{13} 指标上的控制能力予以赋值。在赋值时,将水文途径作用效果及其对径流的控制能力划分为很好、好、较好、一般、差等 5 个等级,分别赋值 2.5、2.0、1.5、1.0 和 0.5,若无效果则赋值为 0,赋值结果如表 4 所示。单位面积 LID 措施在径流控制性能上的评价得分则根据式 (1) 计算得到,结果如表 5 所示。

$$R_{ik} = \sum x_{ij}y_{jk} \tag{1}$$

式中: R_{ik} 为第 i 种 LID 措施在第 k 项二级径流控制指标上的得分值; x_{ij} 为第 i 种 LID 措施在第 j 项水文途径上的原始得分; y_{jk} 为第 j 项水文途径在第 k 项二级径流控制指标上的原始得分。

表 4 径流控制指标量化

水文途径	LID 措施			径流控制二级指标		
	雨水花园	植草沟	透水铺装	A_{11}	A_{12}	A_{13}
a_1	2.5	2.0	1.0	2.5	2.5	2.0
a_2	2.0	2.5	2.5	1.0	0.5	1.5
a_3	1.5	1.5	2.5	2.0	2.0	1.5
a_4	2.0	1.5	2.0	0	1.0	1.0
a_5	2.0	1.5	1.5	0.5	0.5	0.5
a_6	2.0	1.5	0	1.0	1.0	1.0

表 5 单位面积 LID 措施径流控制性能评价

LID 措施	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_1
雨水花园	14.25	15.25	15.25	44.75
植草沟	12.75	13.00	13.75	39.50
透水铺装	10.75	11.50	12.25	34.50

b. 径流污染削减(A_2)。虽然 LID 措施可去除径流中的 SS、COD、TN、TP 等多种污染物,但我国海绵城市建设一般以 SS 削减率作为径流污染削减的考核指标。因此,根据研究区域内对已建成 LID 措施净化效能的研究结果,将 SS 去除率中位数作为单位面积 LID 措施在径流污染削减指标上的赋值依据,并对单位面积 LID 措施在径流污染削减性能进行评价分析,结果见表 6。

表 6 单位面积 LID 措施径流污染削减性能评价

LID 措施	SS 去除率中位数/%	A_2 评价值
雨水花园	75.8	75.8
植草沟	62.5	62.5
透水铺装	85.0	85.0

c. 建设成本(A_3)与维护管理成本(A_4)。经济效益是选择 LID 措施时需要考虑的一项重要因素,包括建设成本(A_3)和管理维护成本(A_4)两项评价指标。根据国内实际项目资料调研,并参考国外资料^[21],对 LID 措施单位建设成本和维护管理成本进行了总结。为使 A_3 和 A_4 在单位上保持一致性,需对其无量纲化处理,并以 5、4、3、2、1 进行赋值,分值越低,则费用越高。单位面积 LID 措施经济性能评价

结果见表 7。

表 7 单位面积 LID 措施经济性能评价

LID 措施	A_3		A_4	
	单位成本/元	赋值	单位成本/(元·a ⁻¹)	赋值
雨水花园	150~800	3	30~80	3
植草沟	80~120	5	4~8	4
透水铺装	120~200	4	2.4~5	5

d. 利用效益(A_5)。LID 措施的社会效益以利用效益(A_5)进行评价,主要包括雨水资源利用价值(A_{51})、景观价值(A_{52})和生态功能价值(A_{53})3 个二级指标体系。根据 LID 措施的功能特点和国内外应用实践效果,将利用效益划分为无效益、低效益、较低效益、中效益、较高效益、高效益等 6 个等级,并分别以 0、1、2、3、4、5 进行赋值,可得到单位面积 LID 措施利用效益评价结果如表 8 所示。

表 8 单位面积 LID 措施利用效益评价

LID 措施	A_{51}	A_{52}	A_{53}	A_5
雨水花园	3	5	4	12
植草沟	1	3	3	7
透水铺装	2	2	1	5

为在同一尺度下对不同 LID 措施进行综合性能的量化评价,需对各评价指标综合得分按式 (2) 进行线性归一化处理,结果见表 9。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij,max}} \tag{2}$$

式中: r_{ij} 为第 i 种 LID 措施在第 j 个指标的归一化值; x_{ij} 为第 i 种 LID 措施在第 j 个指标上的原始得分; $x_{ij,max}$ 为 LID 措施在第 j 个指标上的得分最大值。

表 9 单位面积 LID 措施性能评价指标归一化值

LID 措施	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
雨水花园	1.00	0.89	0.60	0.60	1.00
植草沟	0.88	0.74	1.00	0.80	0.58
透水铺装	0.77	1.00	0.80	1.00	0.42

5.2 LID 措施综合性能评价方法

利用层次分析法对雨水花园、植草沟和透水铺装 3 种 LID 措施的综合性能进行评价。根据层次分析结构模型,采用标度法对同层指标的重要程度进行赋值,构建判断矩阵并采用求和法计算得到权向量矩阵 W 和 B (一致性比率均小于 0.1)

$$W = (0.50, 0.29, 0.05, 0.07, 0.09)$$

$$[0.59 \quad 0.23 \quad 0.12 \quad 0.11 \quad 0.73]$$

$$B = 0.36 \quad 0.12 \quad 0.68 \quad 0.31 \quad 0.19$$

$$[0.05 \quad 0.60 \quad 0.20 \quad 0.58 \quad 0.08]$$

其中,权重矩阵 W 中的数值即为各性能评价指标权重 W_j ,而两矩阵相乘便可求得雨水花园、植草沟和透水铺装等 LID 措施的权重 W_i ,分别为 0.441、0.288 和 0.257。

5.3 评价结果

根据各方案中 LID 措施面积、性能评价指标及其求得的 W_i 、 W_j ,按式(3)求得方案 1、2、3、4 的综合得分分别为 37 606.79、37 760.71、37 897.79 和 38 009.02。

$$Z = \sum (A_j r_{ij} W_i W_j) \tag{3}$$

式中: Z 为总得分; A_j 为各 LID 设施的占地面积; r_{ij} 为各性能评价指标归一化值。

综合评价结果表明,方案 4 为 LID 措施扩容改造的最优方案。研究区域经 LID 措施扩容改造后,LID 措施面积占比从 14.4% 增至 25.6%,不透水性降至 43.5%。其中,透水铺装、雨水花园和植草沟面积 3 种措施的面积占比分别为 22.8%、1.9% 和 0.9%。

6 SWMM 模拟验证

6.1 不同方案的水文调控效果

为进一步验证评价结果的正确性,对 4 种扩容改造方案和原 LID 措施布设方案在不同设计重现期(2 a、10 a 和 50 a)下的水文调控效果进行模拟,结果见表 10。从水文调控效果来看,方案 4 在径流总量控制率、峰值流量削减率和峰值流量延迟时间等水文调控特性上均达到最佳,且各扩容改造方案的调控效果与评价结果显著正相关。以重现期 2 a 为例,LID 措施综合性能评价体系评分越高,水文调控效果越好,径流总量控制率和峰值流量削减率与评分值相关性最为显著, R^2 均接近于 1。研究结果表明,构建的 LID 措施综合性能评价体系可用于区域、街区等中小尺度下海绵城市改造方案的优选评价。

6.2 LID 措施扩容改造后的径流水文调控特性

由表 10 可知,LID 措施扩容改造后对雨洪控制的效果显著提升,特别是最优方案 4 对 2 年一遇小重现期暴雨的水文调控更有效,径流总量控制率和峰值流量削减率较现有 LID 措施布局分别提高了 34.4% 和 42.6%,并显著延缓了峰值出现时间。利用 SWMM 模型对 LID 措施扩容改造后在 3 种降雨过程(25 mm 场次降水量)下的地表产流过程进行模拟分析,以验证该方案满足 75% 年径流总量控制率的要求,结果见图 7。

研究区域经 LID 措施扩容优化后,在降雨历时

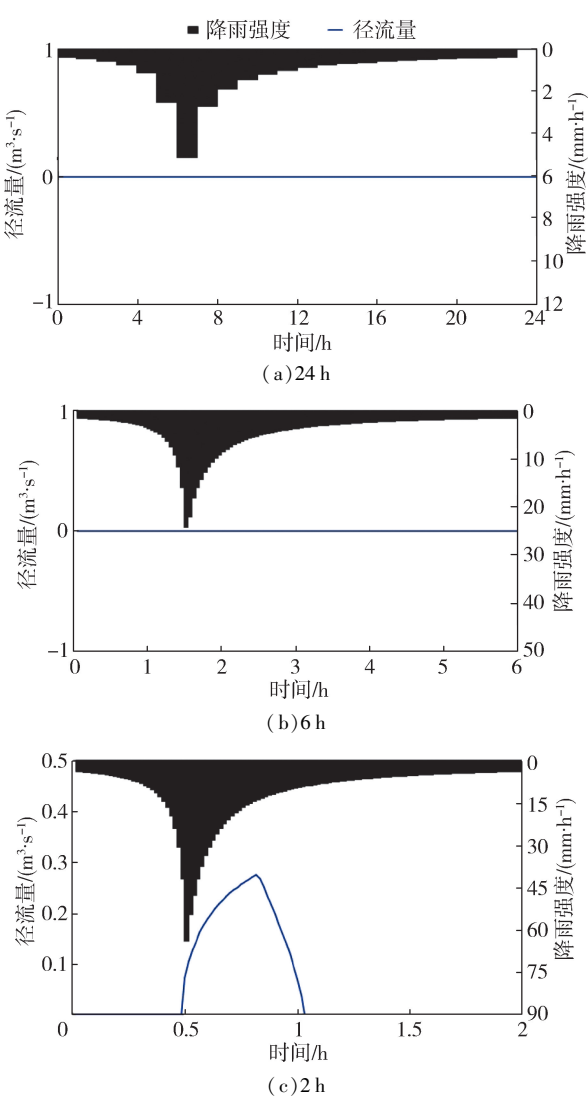


图 7 LID 设施布局优化后的降雨-径流关系

分别为 24 h 和 6 h 条件下(对应降雨峰值 5.1 mm/h 和 24.2 mm/h)并未产生地表径流,可就地消纳 85% 年平均场次降雨。而当降雨历时为 2 h 时,降雨峰值增至 76.9 mm/h,研究区域有少量地表径流出现,透水铺装暗渠开始外排雨水。研究结果表明,扩容改造方案在短历时强降雨条件下,主要起水文调控作用,并不能完全控制径流不外排。由于当地降雨峰值在 60 mm/h 及以下的年平均降雨场次达 86.9%,即可认为该方案能满足 85% 年降雨场次控制率要求,可实现 75% 年径流总量控制率目标。

6.3 管网承载能力改善情况

研究区域排水设施经 LID 设施扩容改造后的管网承载能力得到显著改善,当暴雨设计重现期为

表 10 不同 LID 设施布局的水文调控特性

重现期/ a	径流总量控制率/%					峰值流量削减率/%					峰值流量延迟时间/min				
	原 LID 措施	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	原 LID 措施	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	原 LID 措施	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
2	23.7	36.9	46.0	52.1	58.1	29.4	46.4	57.5	64.9	72.0	0	14	15	15	19
10	16.4	29.1	39.4	46.6	53.9	25.9	33.1	46.6	55.8	64.8	0	10	11	12	13
50	15.0	26.2	34.4	41.0	48.4	20.7	25.6	40.0	49.9	59.8	0	9	9	9	9

2 a 和 10 a 时,排水管网无管段超载与节点溢流,且地表径流能得到有效控制。随着重现期增为 50 a 时,虽然地表径流控制效果有所减弱,排水管网也将出现少量管段超载(超载率为 3.03%)和节点溢流现象(节点溢流率 5.56%,最大溢流时间 3.2 min),但研究区域的总体内涝风险较低。

7 结 论

a. 现有 LID 措施改造后,研究区域的年径流控制率低于 75%,且在设计降水量 25 mm(对应降雨场次控制率为 85%)的不同降雨条件下均无法满足降雨场次控制率要求。现有 LID 措施改造方案主要存在 LID 设施面积占比过小和组合方式不合理等问题。

b. 将 LID 措施的水文、生态、经济和社会效益具体量化为径流控制、径流污染削减、建设成本、维护管理成本和利用效益 5 个指标,其权重分别为 0.50、0.29、0.05、0.07 和 0.09,结合单项 LID 措施性能评价指标体系与权重,构建了 LID 措施改造方案综合评价体系。

c. 不同 LID 措施改造方案的综合评分与径流总量控制率、峰值流量削减率等水文控制指标显著正相关,确定 LID 扩容改造最优方案为:人行道以透水铺装(92%) + 植草沟(8%)组合形式改造,市政广场以透水铺装(97%) + 雨水花园(3%)组合形式改造,传统绿地以雨水花园改造。水文模拟分析表明,LID 措施扩容改造后对雨洪控制的效果显著提升,研究区域排水管网的承载能力显著得到改善。研究结果证实构建的 LID 措施综合性能评价体系可用于中小尺度下海绵城市改造方案的优选评价。

参考文献:

[1] AHIABLA ME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223: 4253-4273.

[2] MILES B, BAND LE. Green infrastructure stormwater management at the watershed scale: urban variable source area and watershed capacitance[J]. Hydrological Process, 2015, 29: 2268-2274.

[3] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development: a review [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 413-432.

[4] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 1-7. (QIU Baoxing. Intension, approach and outlook of Sponge City (LID)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(3): 1-7. (in

Chinese))

[5] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))

[6] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 13-15. (in Chinese))

[7] LIU Y, AHIABLA ME L, BRALTS V, et al. Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 147: 12-23.

[8] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))

[9] JIA H, WANG H Z, ZHEN X, et al. China's Sponge City construction: a discussion on technical approaches [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(4): 39-49.

[10] LEE J G, SELVAKUMAR A, ALVI K, et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 37: 6-18.

[11] JIA H, LU Y, YU S L, et al. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic Village [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 112-119.

[12] SONG J Y, CHUNG E-S. A multi-criteria decision analysis system for prioritizing sites and types of low impact development practices: case of Korea [J]. Water, 2017, 9: 291.

[13] ROSSMAN L. Storm water management model (SWMM) user's manual version 5.0 [R]. Cincinnati: USEPA, 2010.

[14] 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))

[15] 赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1961-1972. (ZHAO Lei, YANG Fengle, YUAN Guolin, et al. Simulation of the quantity and quality of the urban runoff [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1961-1972. (in Chinese)) (下转第 144 页)

95. (in Chinese))
- [44] 吕纯剑. 基于辽宁省辽河流域水生生态功能三级分区的河流健康评价[D]. 沈阳:辽宁大学,2013.
- [45] 毛雪慧,黄凌,黄奕龙,等. 深圳观澜河综合整治河流健康影响评估[J]. 水资源保护,2015,31(1):80-85. (MAO Xuehui, HUANG Ling, HUANG Yilong, et al. Assessment on impacts of Guanlan River comprehensive treatment in Shenzhen City to river health[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):80-85. (in Chinese))
- [46] 邱祖凯. 洱海入湖河流健康评价:以白鹤溪为例[D]. 苏州:苏州科技大学,2015.
- [47] 苏辉东. 基于层次分析法的拉萨河河流健康评价[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [48] 孙博,马涛,李伟. 辽河健康评价与治理保护研究[J]. 中国农村水利水电,2016(5):27-32. (SUN Bo, MA Tao, LI Wei. Research on health assessment and management protection in Liaohe River[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower,2016(5):27-32. (in Chinese))
- [49] 田野. 黄河内蒙古段河流健康评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [50] 王冰洁. 京郊山区河流健康评价与应用:以安达木河为例[D]. 北京:北京林业大学,2015.
- [51] 王国胜. 河流健康评价指标体系与 AHP:模糊综合评价模型研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.
- [52] 王晖文. 河北省河流生态健康评价及修复技术研究[D]. 保定:河北农业大学,2010.
- [53] 王志刚. 北京北部山区河流健康评价及其诊断研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [54] 吴阿娜. 河流健康评价:理论、方法与实践[D]. 上海:华东师范大学,2008.
- [55] 杨文慧. 河流健康的理论构架与诊断体系的研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [56] 姚睿宸. 项目前评价体系在河流系统治理工程中的应用[D]. 重庆:西南交通大学,2016.
- [57] 于志慧. 太湖流域平原河网地区城市化背景下的河流健康评价研究[D]. 南京:南京大学,2015.
- [58] 袁茜. 山地城市河流与湖库健康度评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [59] 张朝. 重庆市河流健康指标体系的构建与评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [60] 张立. 健康长江水域生态指标体系与评价方法初步研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [61] 张伟华. 河流健康评价与保护对策分析:以海城河为例[J]. 水利规划与设计,2015(11):9-11. (ZHANG Weihua. River health assessment and conservation strategy analysis:taking Haicheng River as an example[J]. Water Conservancy Planning and Design,2015(11):9-11. (in Chinese))
- [62] 张颖睿. 小清河流域生态健康评估研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [63] 张娟,郝达平,鞠伟. 基于层次分析法的城市河流健康评价研究[J]. 水资源保护,2016,32(增刊1):154-157. (ZHANG Juan,HAO Daping,JU Wei. Research on urban river health assessment based on analytic hierarchy process [J]. Water Resources Protection,2016,32(Sup1):154-157. (in Chinese))
- [64] 张柱. 河流健康综合评价指数法评价袁河水生态系统健康[D]. 南昌:南昌大学,2011.
- [65] KLEYNHANS C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health,1996,5(1):41-54.
- [66] PETERSEN J R, ROBERT C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape [J]. Freshwater Biology,1992,27(2):295-306.

(收稿日期:2019-01-04 编辑:熊水斌)

(上接第8页)

- [16] 张麟,黄华兵,王先伟,等. 城市内涝模型参数灵敏度分析与方法比较[J]. 中国给水排水,2018,34(3):129-134. (ZHANG Lin,HUANG Huabing,WANG Xianwei,et al. Sensitivity analysis of urban flooding model parameters using local and global approaches [J]. China Water & Wastewater,2018,34(3):129-134. (in Chinese))
- [17] GUO J C Y, URBONAS B, MACKENZIE K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2014,19(4):682-686.
- [18] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水,2016,32(6):9-14. (CHE Wu,ZHANG Kun,ZHANG Wei,et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater,2016,32(6):9-14. (in Chinese))
- [19] 李明怡. 城市径流总量控制指标分解及实现路径探索与实践[J]. 水资源保护,2017,33(5):81-85. (LI Mingyi. Exploration and practice regarding decomposition and implementation of urban total runoff control index [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):81-85. (in Chinese))
- [20] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护,2017,33(2):10-16. (LI Junqi,LI Xiaojing,WANG Wenliang,et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):10-16. (in Chinese))
- [21] CAHILLT H. Low impact development and sustainable stormwater management [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.,2012.

(收稿日期:2019-07-04 编辑:彭桃英)