

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2022.0056

徐宗学,李鹏,程涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022,20(3):552-562. XU Z X, LI P, CHENG T. LID optimization layout facilities in sponge city: A case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(3):552-562. (in Chinese)

基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局

——以济南市黄台桥流域为例

徐宗学^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 程涛³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635)

摘要:从广义与狭义角度阐释海绵城市理念的内涵,梳理常见低影响开发(low impact development, LID)措施的功能特征,系统归纳 LID 措施优化布局研究中使用的模型工具、优化算法以及规划目标。最后,以济南市黄台桥流域为例,运用 NSGA-II 算法,以 LID 措施的成本、雨洪要素控制率为目标进行 LID 优化布局,结果表明:居住区和公共设施区的透水铺装对径流总量削减效果最显著;居住区、公共设施区和园林区的透水铺装及公共设施区的绿色屋顶组合对洪峰延迟时间效果最显著;公共设施区的透水铺装和绿色屋顶组合对洪峰流量削减效果最显著。研究结果可为我国城市防洪减灾、海绵城市建设提供参考。

关键词:海绵城市;城市洪涝;减灾措施;优化布局;城市化

中图分类号:TV124;P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近年来,全球气候变化和城市化进程不断加快引发了一系列城市水问题,在水资源供需矛盾、城市暴雨内涝以及水生态环境等方面给城市居民安全造成了极大影响^[1-2]。由短时强降雨造成的城市内涝问题尤为突出,造成的灾害损失大、影响范围广^[3]。我国是受到城市化与气候变化影响最为严重的国家之一,据《中国水旱灾害防御公报:2019》统计^[4],我国因洪涝共造成 4 766.6 万人次受灾,658 人死亡失踪,直接经济损失达 1 922.7 亿元。同时,城市暴雨内涝发生频率上升,加之其影响程度大,使得我国经济社会可持续发展面临挑战^[5-7]。最近几年,我国“城市看海”现象愈演愈烈,逢雨必涝已逐渐成为我国许多城市的痼疾^[8-9]。

在此背景下,我国新一代城市雨洪管理理念——海绵城市应运而生。海绵城市理念的核心是

低影响开发(low impact development, LID)^[10],诸多研究人员从不同角度开展了 LID 建设相关研究,取得了丰硕的研究成果。其中,LID 措施的优化布局研究越来越受到研究人员的关注^[11]。国外从 20 世纪末期便已开始 LID 优化布局方法的探索,至今已涌现出一批有益的成果,如由美国 EPA 开发的 BMPDSS 和 SUSTAIN 模型^[12]已被广泛应用于 LID-BMP 措施优化布局与城市雨洪管理中。国内学者^[13]21 世纪初才开始注重 LID 的研究和实践,目前处于探索阶段,仍缺乏一套完整的城市径流控制与 LID 优化布局的理论体系。另外,目前研究多为小尺度的小区模拟,不能较好满足区域海绵城市规划的要求^[14-16]。因此,将 LID 措施及优化技术应用于大尺度城市流域的海绵城市建设势在必行。

收稿日期:2021-11-04 修回日期:2022-03-15 网络出版时间:2022-03-31

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220330.1641.002.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)

作者简介:徐宗学(1962—),男,山东淄博人,教授,主要从事城市水文、水文模型方面研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

本文在系统梳理海绵城市的内涵、LID措施及其优化布局的基础上,结合案例研究,剖析LID组合措施的雨洪削减效果与其经济成本之间的关系,为完善我国海绵城市建设体系提供一定参考。

1 海绵城市内涵及LID措施

1.1 海绵城市的内涵

近年来,我国城市防洪与雨水资源化利用思想转变,提出了新一代城市雨洪管理理念——海绵城市,北京、济南市等30个试点城市先后开展了海绵城市建设,取得了大量成功经验^[17]。海绵城市理念旨在缓解或解决快速城镇化带来的负面水文效应,使城市在应对复杂变化时展现出良好的“韧性”,充分利用自然的蓄存、渗透与净化能力,达到控制径流量、控制峰值流量、控制水环境污染和雨水资源化利用的目标^[18]。

在广义层面上,海绵城市是一种与自然环境和谐共生的发展理念,旨在解决城市化建设与自然资源环境间的矛盾。一方面,海绵城市理念以保护原有生态系统为原则,加大对山、水、林、田、湖的保护力度,改变传统城市开发模式;另一方面,改变原有城市集中排水的防洪排涝思路,实践海绵城市六字方针(“渗、滞、蓄、净、用、排”),大力恢复遭到破坏的水循环系统,在开发建设时要严格遵循生态优先原则,将对原有水生态环境的破坏程度减少到最低限度。在狭义层面上,海绵城市是一套基于源头削减、过程控制、末端处理思想的技术体系,即低影响开发(LID),以增加填洼与入渗、减少地表径流和地表冲

刷污染等^[19]。由此可见,海绵城市是“绿水青山就是金山银山”科学论断的具体实践,体现了减轻城市化造成的负面水文效应、人水和谐和可持续发展的战略方针,见图1。

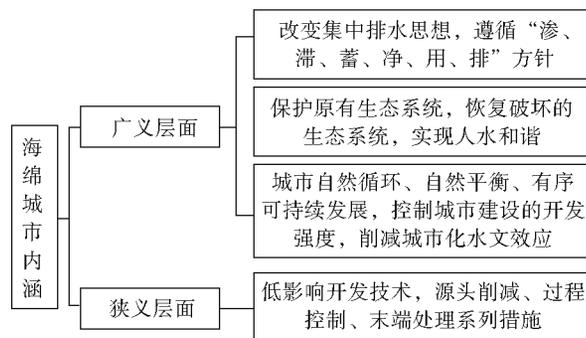


图1 海绵城市内涵

Fig. 1 The connotation of sponge city

1.2 LID措施

LID措施的宗旨是维持城市开发前的水循环特征,包括控制地表径流量与汇流速度、削减污染物浓度等。随着LID技术的发展,LID措施种类越来越多,常用于海绵城市建设的LID措施有:绿色屋顶、雨水花园、下凹式绿地、生物滞留池、雨水罐、透水铺装、植草沟等。不同的LID措施的主要功能不同,一般分为渗透、存储、截污净化与调节等功能,有些LID措施同时具备多种功能。因此,实际工程规划中,应根据区域的功能分区特点及规划的控制目标选择合适的LID措施。另外,诸多研究^[20-21]表明,不同LID措施组合运用的效果更好。表1总结了常用的LID措施的功能与特征。

表1 各LID措施的功能特征

Tab. 1 Functions and characteristics of each LID measure

LID措施	功能作用					布局方式	建设费	维护费
	储蓄雨水	净化雨水	削减径流	排水通道	涵养地下水			
绿色屋顶	★	★★	★★	★	★	分散	高	一般
雨水花园	★★★	★★★	★★★	★	★	集中	高	一般
下凹式绿地	★	★★	★★	★	★★★	分散	高	一般
生物滞留池	★	★★★	★★	★	★★★	分散	一般	低
雨水罐	★★★	★★	★★	★	★	分散	低	低
透水铺装	★	★★	★★	★	★★★	分散	低	低
植草沟	★	★★★	★	★★★	★	分散	低	低

注:★★★-作用大;★★-作用一般;★-作用小。

2 LID措施优化布局的方法与目标

近年来,关于LID措施优化方面的研究^[11]越来越多,已经成为城市雨洪管理领域的研究前沿领域之一。国内外关于LID措施优化布局方面的研

究^[22-24]主要集中在LID措施的设计优化(类型、尺寸)以及多种措施的性能评估、LID措施的空间布局优化及成本效益分析^[25-26]、参数优化及运用多准则方法^[27-29]、不同LID措施的性能试验^[30-31]等。本文聚焦LID措施的空间布局优化研究主题,归纳总结

该类研究所采用的方法及目标,以期为解决多尺度、多参数的 LID 措施规划与优化布局问题提供系统性和战略性的指导思路。

当单独或组合 LID 措施位于不同位置时,它们表现的性能会存在一定差异。在考虑地形特征因素方面:若将 LID 措施布设在高不透水以及排水管网密集的地方,可以收集与处理大量径流,对该区域的水文状况产生较大影响^[32];若布设于渗透性较好的区域,则有利于植被生长与栖息地的保护^[33];在陡峭的地形和渗透性较差的土层条件下,会导致径流速度过快,通常不利于 LID 措施的

布设,然而这些地方对 LID 措施的需求较大^[34-35]。另一方面,LID 措施在集水区内的相对位置(上下游、排水管首末端等)也对最后的控制效果产生一定影响,分散布设与集中布设方式的水文效应也具有很大差异,见图 2^[36]。一些研究^[37-40]认为,在集水区上游(源头)处布设 LID 措施,可以在降水一开始就起到控制径流的作用,减轻下游排水系统的负荷。然而,部分研究^[41-42]认为,位于下游地区或管段末端的 LID 措施控制效果更好。因此,不同的区域特征以及优化目标会导致不同的“最优”LID 措施布局方式^[37,43]。

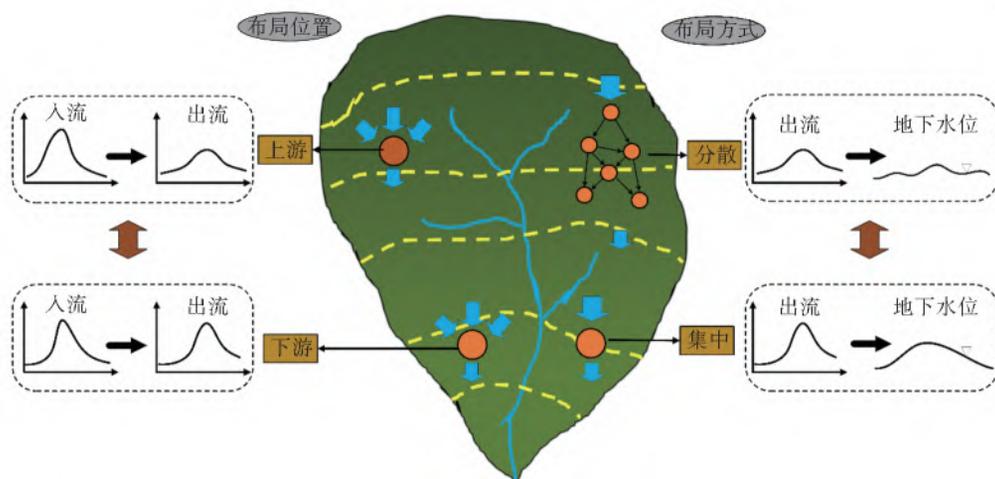


图 2 LID 措施不同空间分配方式的水文过程^[36]

Fig. 2 Hydrological process of LID facilities with different spatial allocation

针对 LID 措施优化布局主题,诸多学者从研究方法和优化目标层面开展了大量探索性工作,取得了大量有价值的成果。方法层面上,研究人员在模型工具与启发式算法领域开展了大量实践,常用的模型工具有 storm water management model (SWMM)、system for urban stormwater treatment and analysis integration model (SUSTAIN)、the hydrologic engineering center's hydrologic modeling system (HEC-HMS)、model for urban stormwater improvement conceptualization (MUSIC) 等,应用的启发式算法有 genetic algorithm (GA)、non-dominated

sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)、particle swarm optimization (PSO) 等。目标层面上,主要分为 4 类目标:水量控制(削减径流总量、控制溢流量、降低径流峰值)、水质控制(污染物削减率)、时间控制(延长峰现时间)和成本控制(建设成本与维护成本)。表 2 总结了国内外 LID 措施优化布局研究涉及的措施类型、模型工具和优化目标。此外,部分研究^[44-46]没有采用优化算法,而是通过设置多种比例、位置、类型等情景,分析不同情景 LID 措施布局方式的效果。

表 2 LID 措施优化布局研究细节

Tab. 2 The details of the research on the optimization layout of LID facilities

研究人员	模型与算法	优化目标	LID 措施
Liang 等 ^[47]	SWMM+GA	径流峰值削减最大化	生物滞留池、透水铺装
Lee 等 ^[48]	SUSTAIN+NSGA-II	最大化成本效益	生物滞留池、透水路面
Latifi 等 ^[49]	SWMM+ NSGA-II	径流总量与水体污染削减最大化	生物滞留池、植被洼地
Montaseri 等 ^[50]	MUSIC+GA	径流总量与水体污染削减最大化、成本效益最大化	植被洼地、雨水罐、渗滤池
陈前虎等 ^[51]	SWMM+PSO	成本最低、净流总量最小、水体污染最小	下凹式绿地、雨水花园、透水路面、雨水罐
缪遇虹 ^[52]	SUSTAIN+NSGA-II	径流总量削减最大化、最大成本效益	生物滞留池、植草沟、绿色屋顶、透水铺装

3 案例研究

针对济南市黄台桥流域开展LID措施优化布局研究。该研究区包含济南市中心城区、西北部郊区和南部山区,总面积约326 km²,济南市海绵城市示范区就位于该研究区内。当暴雨发生时,南部山区形成的径流很容易在北部形成积涝。选取不同LID措施在各功能区的设置比例为参数,在不同目标函数下对LID组合措施进行优化,筛选LID措施布局在经济成本、径流总量削减率、洪峰流量削减率和洪峰推迟时间等约束条件下的最优方案。

3.1 黄台桥流域功能区划分

仅对黄台桥流域主城区LID布设进行优化及效果评估,根据《城市用地分类与规划建设用地标准》^[57],结合研究区下垫面特征将研究区用地类型分为园林区、居住区、公共设施区、教育科研区和其他区域,见图3。居住区包括居住小区及周边配套活动场所等,其建筑物密集、人口流量大、不透水率较大;教育科研区包括初高中及高等院校、研究所等;公共设施区涵盖各大商圈,其建筑物密度大、不透水率极高;园林区包括公园、湿地、生态区等,植被覆盖率较高、不透水率较小;其他区域包括平原区、山区等,不对该类用地进行LID设置。

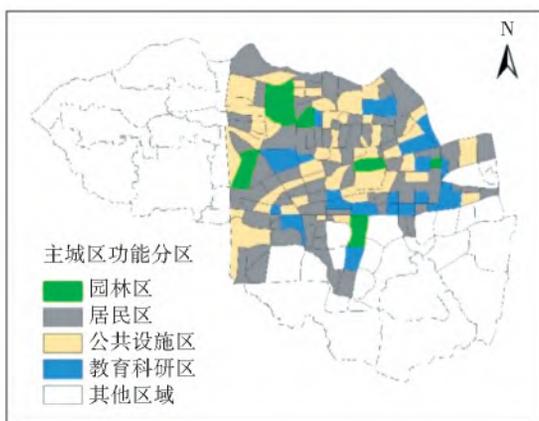


图3 济南市主城区功能分区

Fig. 3 Functional zoning of main urban area in Jinan City

3.2 LID措施筛选与布局

大量研究表明,不同种类和规模的LID组合措

施有助于实现雨水资源化利用、洪峰流量削减、径流总量控制、生态景观修复等多重目标,从而解决城市水问题。为了解决流域尺度LID研究中面临的数据量大、布设位置较难确定等问题,根据研究区下垫面特征初步筛选出适用的LID,根据各功能区用地类型确定LID的最大设置比例,综合考虑雨洪控制效果、经济成本等约束,对LID组合布置比例进行优化。

在4个功能区布设不同比例的透水铺装和雨水花园,除园林区外均设置相应比例的雨水罐和绿色屋顶。其中:绿色屋顶主要设置于教学楼、写字楼及居民小区等;透水铺装主要设置于公路及人行道、小区道路及面积较大的广场;雨水花园主要设置于草坪、隔离带等公共绿地区域;雨水罐则设置于住宅、教学楼和商场等四周。研究区用地构成及LID最大设置比例见表3,LID相关参数主要参考《雨水控制与利用工程设计规范》^[58],经济成本主要参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[21]及相关实际工程案例概算等资料,主要参数见表4。

表3 黄台桥流域用地构成及LID设置

Tab. 3 Land use composition and LID setting of Huangtaiqiao catchment

功能区划分	用地构成	用地比例/%	LID措施	LID最大设置比例/%
园林区	建筑用地	<3.0	透水铺装	15
	道路广场	10~20	雨水花园	30
	公共绿地	>75		
居住区	建筑用地	50~60	绿色屋顶 透水铺装	55 15
	道路广场	10~18	雨水花园	10
	公共绿地	>30	雨水罐	1
教育科研区	建筑用地	25~50	绿色屋顶 透水铺装	40 17
	道路广场	15~20	雨水花园	15
	公共绿地	35~40	雨水罐	0.5
公共设施区	建筑用地	20~50	绿色屋顶 透水铺装	40 30
	道路广场	15~40	雨水花园	10
	公共绿地	>20	雨水罐	0.5

表4 LID措施主要参数及成本设置

Tab. 4 Main parameters and cost settings of LID measures

LID类型	表层/mm	土壤层/mm	路面层/mm	蓄水层/mm	经济成本/(元·m ⁻²)	
					工程造价	维护费用
雨水罐				1 100	100	5
绿色屋顶	60	500			200	30
透水铺装	5		400		130	10
雨水花园	200	900			475	20

3.3 LID 优化情景设置

为探求不同 LID 组合对不同重现期暴雨条件下雨洪的削减效果(径流总量、洪峰流量、峰现时间),以及相应 LID 的建设与维护成本对 LID 措施实施的制约性,根据研究区用地类型及 LID 布局比例,针对不同重现期降雨在不同目标函数下进行优化设计,见表 5。其中: C_E 为 LID 的经济成本(建设成本与维护成本); Q_W 为径流总量削减率; Q_{max} 为洪峰流量削减效果; T_Q 为洪峰推迟时间。

表 5 LID 优化情景设置

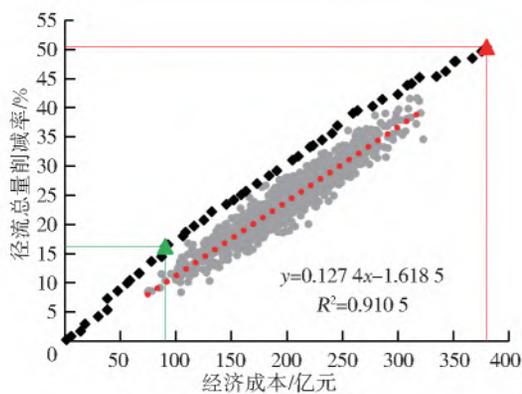
Tab. 5 LID optimization scenario settings

降雨重现期/a	情景设置	目标函数	降雨重现期/a	情景设置	目标函数
1	情景 1	$C_E + Q_W$	10	情景 9	$C_E + Q_W$
	情景 2	$C_E + T_Q$		情景 10	$C_E + Q_{max}$
	情景 3	$C_E + Q_{max}$	20	情景 11	$C_E + Q_W$
	情景 4	$C_E + Q_W + Q_{max}$		情景 12	$C_E + Q_{max}$
3	情景 5	$C_E + Q_W$	50	情景 13	$C_E + Q_W$
	情景 6	$C_E + Q_{max}$		情景 14	$C_E + Q_{max}$
5	情景 7	$C_E + Q_W$	100	情景 15	$C_E + Q_W$
	情景 8	$C_E + Q_{max}$		情景 16	$C_E + Q_{max}$

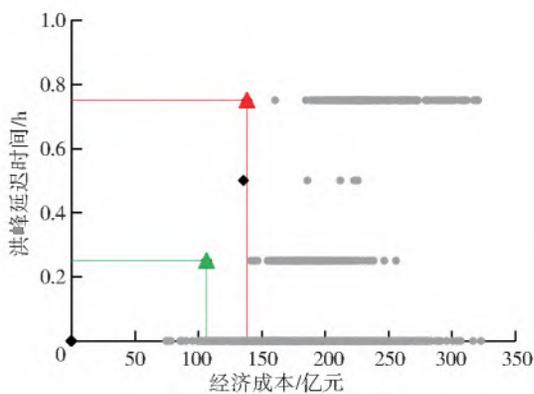
3.4 结果分析

以不同 LID 在各功能区的设置比例为参数,针对不同的情景设置,选用 NSGA-II 算法进行 60 000 次降雨产流模拟计算。以设计暴雨重现期 1 a 为例,探究 LID 组合雨洪削减效果与其经济成本之间的关系,结果见图 4,各情景 LID 设置比例见表 6。图 4(a)~4(c)中灰色点为 LID 布设方案,黑色点为具有一定成本-效益的 LID 布设方案,绿色点为最具成本-效益的 LID 布设方案(即表 5 中最经济方案),红色点为削减效果最好的 LID 布设方案(即表 5 中最大削减方案)。图 4(d)为具有一定成本-效益的 LID 布设方案,气泡大小表示洪峰流量削减率。

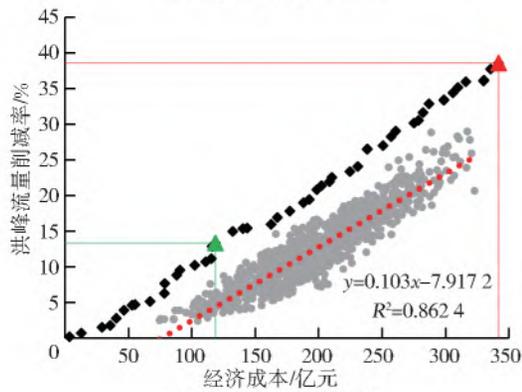
根据情景 1 结果可知: $C_E + Q_W$ 的 LID 布设方案中,经济成本随径流总量削减率的增加而持续增加,最具成本-效益的布设方案径流总量削减率为 16.20%,所需经济成本为 90.67 亿元;具有一定成本-效益的 LID 布设方案中径流总量削减率最大为 50.38%,所需经济成本为 380.21 亿元。由表 6 可知,居住区和公共设施区的透水铺装对径流总量削减效果最为明显。



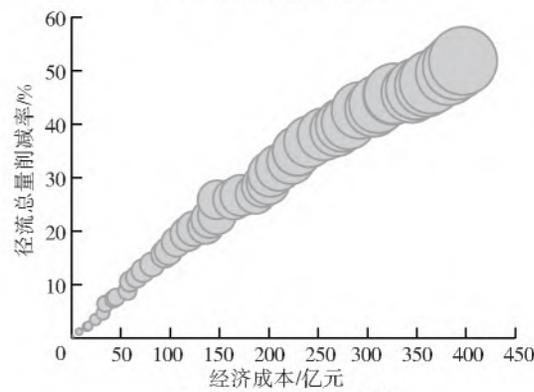
(a) 情景1优化模拟结果



(b) 情景2优化模拟结果



(c) 情景3优化模拟结果



(d) 情景4优化模拟结果

图 4 重现期为 1 a 时各情景优化模拟结果

Fig. 4 Optimization simulation results of each scenario with a recurrence period of 1 year

根据情景 2 结果可知: $C_E + T_Q$ 的 LID 布设方案中,经济成本随洪峰延迟时间的增加而呈阶梯性增

长。最具成本-效益的布设方案的洪峰延迟时间为 0.25 h,所需的经济成本为 106.65 亿元;具有一定成

本-效益的 LID 布设方案中洪峰延迟时间最大为 0.75 h, 所需经济成本为 138.55 亿元。由表 6 可知,居住

区、公共设施区和园林区透水铺装及公共设施区绿色屋顶的组合措施对洪峰延迟时间效果最为明显。

表 6 重现期为 1 a 时各情景优化方案 LID 设置比例

Tab. 6 The LID setting ratio of each scenario with a recurrence period of 1 year

%

功能区	LID 种类	最大设置比例	情景 1		情景 2		情景 3		情景 4
			最经济方案	最大削减方案	最经济方案	最大削减方案	最经济方案	最大削减方案	最大削减方案
居住区	透水铺装	15.00	14.73	14.72	11.95	15.00	8.71	14.88	15.00
	绿色屋顶	55.00	7.87	22.23	0.97	54.96	0.19	54.97	54.99
	雨水花园	10.00	3.75	3.20	0.53	9.95	0.06	10.00	9.99
	雨水罐	1.00	0.56	0.59	0.60	0.82	0.32	0.98	0.99
教育科研区	透水铺装	17.00	0.00	0.00	8.60	16.91	8.05	9.13	16.97
	绿色屋顶	40.00	0.00	0.00	6.56	39.94	0.39	17.63	39.85
	雨水花园	15.00	0.01	0.00	0.25	2.60	0.03	0.19	14.80
	雨水罐	0.50	0.00	0.16	0.08	0.19	0.48	0.08	0.32
公共设施区	透水铺装	30.00	24.67	28.45	29.35	29.98	29.47	29.97	29.96
	绿色屋顶	40.00	16.74	15.35	19.39	39.99	36.40	39.89	39.97
	雨水花园	10.00	0.01	0.00	0.45	9.98	6.11	9.80	9.99
	雨水罐	0.50	0.15	0.00	0.31	0.45	0.31	0.44	0.38
园林区	透水铺装	15.00	0.00	0.00	10.72	14.86	0.44	8.82	14.90
	雨水花园	30.00	0.00	0.00	0.17	29.71	0.05	7.63	29.54

根据情景 3 结果可知, $C_E + Q_{\max}$ 的 LID 布设方案中,经济成本随洪峰流量削减率的增加而持续增加。最具成本-效益的布设方案的洪峰流量削减率为 13.29%,此时布设 LID 所需的经济成本为 118.86 亿元;具有一定成本-效益的 LID 布设方案中洪峰流量削减率最大为 38.52%,所需经济成本为 342.12 亿元。根据表 6 中两种方案在不同功能区 LID 设置比例可知,公共设施区的透水铺装和绿色屋顶组合措施对洪峰流量削减效果最为明显。

根据情景 4 结果可知: $C_E + Q_W + Q_{\max}$ 的 LID 布设方案中,经济成本随径流总量和洪峰流量削减率的增加而持续增加;由于目标函数较多,考虑到计算时间和效率,不对该情景进行最具成本-效益的布设方案的确定。具有一定成本-效益的 LID 布设方案中经济成本为 397.17 亿元时,径流总量削减率最大可为 51.79%,洪峰流量削减率为 42.96%。根据表 6 中最大削减方案中不同功能区 LID 设置比例可知,各 LID 比例均已接近其最大设置比,这也与经验相吻合。

由图 4 可以看出:当目标函数分别为 $C_E + Q_W$ 和 $C_E + Q_{\max}$ (情景 1 和情景 3) 时,其成本-效益呈线性函数关系,各情景的 LID 布设方案中其经济成本随 LID 对雨洪的削减效益的增加而增加,可对实际

情况中的 LID 布设起到一定的指导作用;当目标函数为 $C_E + T_Q$ (情景 2) 时,具有一定成本-效益的 LID 布设方案较少,可根据实际情况进行选取;当目标函数为 $C_E + Q_W + Q_{\max}$ (情景 4) 时,由于目标函数较多,其最优 LID 布设方案还需通过较为复杂的计算方法确定。

分析情景 4~16 模拟结果发现:当目标函数为 $C_E + Q_W$ 时,具有一定成本-效益的 LID 布设方案中,经济成本随径流总量削减率的增加而持续增加,但随着设计暴雨重现期的增加,其径流总量最大削减率呈现出降低趋势,最优布设方案所需的经济成本随之降低;当目标函数为 $C_E + Q_{\max}$ 时,具有一定成本-效益的 LID 布设方案中,经济成本随洪峰流量削减率的增加而持续增加,但随着设计暴雨重现期的增加,其洪峰流量最大削减率呈现出不断降低趋势,最优布设方案所需的经济成本也随之降低。这表明 LID 措施对重现期较低的暴雨控制效果较好,但对重现期较高的暴雨控制效果较差。

参考济南市雨洪现状^[55],根据模拟结果:当济南市相关部门拟投入 100 亿元进行海绵城市 LID 工程建设时,对于 1 a 一遇的降雨(图 4),此时最具成本-效益的 LID 布置方案约可控制 17% 的径流总量;若其想控制其降水径流总量的 40%,则需相关

部门投入 275 亿元左右用于 LID 工程建设,同时相应方案的 LID 设置比例均可通过本研究的计算方法获取。由此可见,该研究结果对济南市海绵城市建设具有较好的指导作用。

4 结 论

梳理了海绵城市理念的内涵,总结了常见 LID 措施的功能特征,并系统总结了 LID 措施优化布局方面的研究进展。以济南市黄台桥流域为研究区,基于不同功能区进行 LID 措施及建设比例设置,选用 NSGA-II 算法对各功能区 LID 布局进行了多目标优化模拟,初步得出以下结论。

选用不同的目标函数时,NSGA-II 算法能较为准确地给出具有一定成本—效益的 LID 布局方案,从而进一步确定出相应情景下的最经济方案和最大削减方案,并能给出相应的 LID 布设比例,表现出较良好的适用性,表明 NSGA-II 算法适用于流域尺度的城市区域 LID 优化布局。对径流总量削减效果最显著的是居住区和公共设施区的透水铺装,居住区、公共设施区和园林区的透水铺装及公共设施区的绿色屋顶组合方式对洪峰延迟时间效果最显著,对洪峰流量削减效果最显著的是公共设施区的透水铺装和绿色屋顶组合方式。本研究是对大尺度城市流域海绵规划的初步探讨,以期为该方面的研究、工程建设等提供一定参考。

参考文献(References):

[1] WING O, BATES P D, SMITH A M, et al. Estimates of present and future flood risk in the conterminous United States [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 034023. DOI: 10.1088/1748-9326/aaac65.

[2] 宋全香, 左其亭, 杨峰. 城市化建设带来的水问题及解决措施[J]. *水资源与水工程学报*, 2004(1): 56-58. (SONG Q X, ZUO Q T, YANG F. Water problems brought out by citifying construction and measures [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004(1): 56-58. (in Chinese)) DOI: 1672-643X(2004)01-0056-03.

[3] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 52(3): 522-555. DOI: 10.1002/2014RG000464.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报[R]. 2019. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Bulletin of Flood and Drought Disasters in China*[R]. 2019. (in Chinese))

[5] RIEDEL T, WEBER T. Review: The influence of global

change on Europe's water cycle and groundwater recharge[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(6): 1-21. DOI: 10.1007/s10040-020-02165-3.

[6] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001.

[7] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 53-61. (XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city: Review on urban hydrology [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20181056.

[8] 王浩, 孟现勇. 谈 2020 年我国南北洪涝问题[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 207-208. (WANG H, MENG X Y. A talk about China's north and south floods in 2020 [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 207-208. (in Chinese)) DOI: 2021, 19(1): 207-208.

[9] 徐宗学, 程涛, 任梅芳. “城市看海”何时休: 兼论海绵城市功能与作用[J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(5): 64-66, 95. (XU Z X, CHENG T, REN M F. When will the “watching the sea in the city” stop: The function and role of sponge city [J]. *China Flood & Drought Management*, 2017, 27(5): 64-66, 95. (in Chinese)) DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2017.05.016.

[10] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. *城市规划*, 2015, 39(6): 26-36. (YU K J, LI D H, YUAN H, et al. “Sponge city”: theory and practice [J]. *City Planning Review*, 2015, 39(6): 26-36. (in Chinese)) DOI: 10.11819/cpr20150605a.

[11] ISLAM A, HASSINI S, El-Dakhakhni W. A systematic bibliometric review of optimization and resilience within low impact development stormwater management practices[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 599: 126457. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126457.

[12] GAO J, WANG R, HUANG J, et al. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 177-183.

[13] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 719-731. (LIU C M, ZHANG Y Y, WANG Z G, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: A

- preliminary study of planning and techniques for sponge city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5):719-731. (in Chinese))DOI:10.11849/zrzyxb.20151294.
- [14] 陈韬,夏蒙蒙,刘云鹏,等.基于SWMM的海绵改建小区雨水径流调控研究[J].*中国给水排水*,2020,36(11):103-111.(CHEN T,XIA M M,LIU Y P,et al.Regulation of stormwater runoff in sponge reconstructed community based on SWMM[J].*China Water & Wastewater*,2020,36(11):103-111.(in Chinese))DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.
- [15] 何爽,刘俊,朱嘉祺.基于SWMM模型的低影响开发模式雨洪控制利用效果模拟与评估[J].*水电能源科学*,2013,31(12):42-45.(HE S,LIU J,ZHU J Q.Rainwater control and utilization effect assessment and simulation of low impact development based on SWMM[J].*Water Resources and Power*,2013,31(12):42-45.(in Chinese))DOI:1000-7709(2013)12-0042-04.
- [16] 朱培元,傅春,肖存艳.基于SWMM的住宅区多LID措施雨水系统径流控制[J].*水电能源科学*,2018,36(3):10-13.(ZHU P Y,FU C,XIAO C Y.Runoff control of multiple LID facilities rainwater drainage system in residential area based on SWMM[J].*Water Resources and Power*,2018,36(3):10-13.(in Chinese))DOI:1000-7709(2018)03-0010-04.
- [17] 建城函275号,海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2014.(Urban construction letter No.275,Sponge city construction technical guide:low impact development rainwater system construction (trial implementation)[S].Beijing:Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China,2014.(in Chinese))
- [18] 李运杰,张弛,冷祥阳,等.智慧化海绵城市的探讨与展望[J].*南水北调与水利科技*,2016,14(1):161-164,171.(LI Y J,ZHANG C,LENG X Y,et al.Exploration and expectation of smart sponge city[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2016,14(1):161-164,171.(in Chinese))DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.01.027.
- [19] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].*给水排水*,2015,51(3):1-7.(CHOU B X.The connotation,approach and prospect of sponge city(LID)[J].*Water & Wastewater Engineering*,2015,51(3):1-7.(in Chinese))DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0069.
- [20] HUA P,YANG W,QI X,et al.Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development[J].*Journal of Cleaner Production*,2019,242:118515.DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118515.
- [21] 吴盈盈,余敦先,夏军,等.典型LID措施对城市降雨径流过程影响[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2021,19(5):833-842.(WU Y Y,SHE D X,XIA J,et al.Impact of LID on urban rainfall and runoff process [J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2021,19(5):833-842.(in Chinese))DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0087.
- [22] ERCOLANI G,CHIARADIA E A,GANDOLFI C,et al.Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment[J].*Journal of Hydrology*,2018,566:830-845.DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.09.050.
- [23] YANG Y,CHUI T F M.Optimizing surface and contributing areas of bioretention cells for stormwater runoff quality and quantity management[J].*Journal of environmental management*,2018,206:1090-1103.DOI:10.1016/j.jenvman.2017.11.064.
- [24] 孙艳伟,魏晓妹.生物滞留池的水文效应分析[J].*灌溉排水学报*,2011,30(2):98-103.(SUN Y W,WEI X M.Research on hydrological effect of bioretention cells[J].*Journal of Irrigation and Drainage*,2011,30(2):98-103.(in Chinese))DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2011.02.016.
- [25] ALVES A,SANCHEZ A,VOJINOVIC Z,et al.Evolutionary and holistic assessment of green-grey infrastructure for CSO reduction[J].*Water*,2016,8(9):402.DOI:10.3390/w8090402.
- [26] GIACOMONI M H,JOSEPH J.Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale[J].*Journal of Water Resources Planning and Management*,2017,143(9):04017053.DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000812.
- [27] GOGATE N G,KALBAR P P,RAVAL P M.Assessment of stormwater management options in urban contexts using Multiple Attribute Decision-Making [J].*Journal of cleaner production*,2017,142:2046-2059.DOI:10.1016/j.jclepro.2016.11.079.
- [28] 熊丽君.基于参数敏感性和径流调控的LID优化设计方法[J].*给水排水*,2020,56(5):78-83,88.(XIONG L J.LID optimal design method based on parameter sensitivity and runoff regulation[J].*Water & Wastewater Engineering*,2020,56(5):78-83,88.(in Chinese))DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2020.05.014.
- [29] LUAN B,YIN R,XU P,et al.Evaluating Green Storm-

- water Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 680-691. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.03.028.
- [30] 李娟,张伟,桑敏,等.生物滞留设施对雨水径流氮磷污染物净化机理和运行优化方式研究进展[J].*环境工程*,2020,38(4):77-82,113.(LI J,ZHANG W,SANG M,et al.Review on purification mechanism and performance optimization methods of bioretention for nitrogen and phosphorus in urban stormwater[J].*Environmental Engineering*,2020,38(4):77-82,113.(in Chinese))DOI:2020,38(4):77-82,113.
- [31] LI M H,SWAPP M,KIM M H,et al.Comparing bioretention designs with and without an internal water storage layer for treating highway runoff[J].*Water Environment Research*,2014,86(5):387-397. DOI:10.2175/106143013X13789303501920.
- [32] 许萍,任恒阳,徐慧纬,等.LID与传统开发模式下雨水管渠运行状态对比研究[J].*中国给水排水*,2018,34(15):127-132.(XU P,REN H Y,XU H W,et al.Comparison of stormwater sewer running state between LID and traditional development mode[J].*China Water & Wastewater*,2018,34(15):127-132.(in Chinese))DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.15.025.
- [33] PENA S B,ABREU M M,MAGALHAES M R.Planning landscape with water infiltration.Empirical model to assess maximum infiltration areas in Mediterranean landscapes[J].*Water Resources Management*,2016,30(7):2343-2360. DOI:10.1007/s11269-016-1291-0.
- [34] BACH P M,MCCARTHY D T,DELETIC A.Redefining the stormwater first flush phenomenon[J].*Water Research*,2010,44(8):2487-2498. DOI:10.1016/j.watres.2010.01.022.
- [35] MESHGI A,SCHMITTER P,CHUI T F M,et al.Development of a modular streamflow model to quantify runoff contributions from different land uses in tropical urban environments using genetic programming[J].*Journal of Hydrology*,2015,525:711-723. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.04.032.
- [36] ZHANG K,CHUI T F M.A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices:Strategies and optimization tools[J].*Science of the Total Environment*,2018,621:915-929. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.11.281.
- [37] 程涛,黄本胜,邱静,等.基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J].*水力发电学报*,2021,40(7):32-46.(CHENG T,HUANG B S, QIU J,et al.Optimization of overall layout of sponge city facilities for flooding alleviation effect[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2021,40(7):32-46.(in Chinese))DOI:10.11660/slfdx.20210704.
- [38] ZENG S, GUO H, DONG X. Understanding the synergistic effect between LID facility and drainage network: With a comprehensive perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 849-859. DOI:10.1016/j.jenvman.2019.06.028.
- [39] KULLER M, BACH P M, RAMIREZ-LOVERING D, et al. The location choice of water sensitive urban design within a city: A case study of Melbourne[C]. // IWA World Water Congress and Exhibition. Brisbane, Australia, 2016.
- [40] 刘芳,赵进勇,路明,等.基于 SWMM 的城市初雨净化设施布局优化研究[J].*中国水利水电科学研究院学报*,2020,18(3):212-222.(LIU F,ZHAO J Y,LU M,et al.Research on layout optimization of urban initial rain purification facilities based on SWMM[J].*Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*,2020,18(3):212-222.(in Chinese))DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.03.007.
- [41] 马萌华.基于模糊综合评价的海绵城市 LID 措施综合效能评价体系研究[D].西安:西安理工大学,2019.(MA M H.Study on comprehensive performance evaluation system of sponge city LID measures based on FCE[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2019.(in Chinese))
- [42] CHANG C L, LO S L, HUANG S M. Optimal strategies for best management practice placement in a synthetic watershed[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 153: 359-364. DOI: 10.1007/s10661-008-0362-y.
- [43] BASTIEN N, ARTHUR S, WALLIS S, et al. The best management of SuDS treatment trains: A holistic approach[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(1):263-272. DOI:10.2166/wst.2010.806.
- [44] 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.(WANG T,DIAO X M,LIU J,et al.Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2017,15(4):39-43,128.(in Chinese))DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.007.
- [45] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等.基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价:以北京市清河流域为例[J].*水力发电学报*,2016,35(11):84-93.(CHANG X D,XU Z X,ZHAO G,et al.Urban rainfall-runoff sim-

- ulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: A case study of Qinghe catchment in Beijing[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35 (11): 84-93. (in Chinese) DOI: 10.11660/slfdbx.20161110.
- [46] 李娜,孟雨婷,王静,等.低影响开发措施的内涝削减效果研究:以济南市海绵试点区为例[J].*水利学报*, 2018,49(12):1489-1502. (LI N, MENG Y T, WANG J, et al. Effect of low impact development measures on inundation reduction: Taking Jinan pilot area as example[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49 (12): 1489-1502. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180696.
- [47] LIANG C Y, YOU G J Y, LEE H Y. Investigating the effectiveness and optimal spatial arrangement of low-impact development facilities[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 124008. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124008.
- [48] 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. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.04.011.
- [49] LATIFI M, RAKHSHANDEHROO G, NIKOO M R, et al. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118323. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118323.
- [50] MONTASERI M, AFSHAR M H, BOZORG-Haddad O. Development of simulation-optimization model (MUSIC-GA) for urban stormwater management[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29 (13): 4649-4665. DOI: 10.1007/s10661-019-7488-y.
- [51] 陈前虎,邹澄昊,黄初冬,等.基于多目标粒子群算法的LID设施优化布局研究[J].*中国给水排水*, 2019, 35(19): 126-132. (CHEN Q H, ZOU C H, HUANG C D, et al. Optimization of LID facilities layout based on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(19): 126-132. (in Chinese) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2019.19.022.
- [52] 缪遇虹.低影响开发设施的选址布局优化方法研究[D].北京:北京建筑大学,2020. (MIAO Y H. Method study on location and layout optimization of low impact development facilities[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese))
- [53] GB 50137—2011,城市用地分类与规划建设用地标准[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2012. (GB 50137—2011, Code for classification of urban land use and planning standards of development land [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese))
- [54] DB 11/685—2013,雨水控制与利用工程设计规范[S].北京:北京市规划委员会,2014. (DB 11/685—2013, Code for design of stormwater management and harvest engineering [S]. Beijing: Beijing Municipal Planning Commission, 2014. (in Chinese))
- [55] 李鹏,徐宗学,赵刚,等.基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1083-1092. (LI P, XU Z X, ZHAO G, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: Case study in Jinan City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19 (6): 1083-1092. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdbk.2021.0111.

LID optimization layout facilities in sponge city: A case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan City

XU Zongxue^{1,2}, LI Peng^{1,2}, CHENG Tao³

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: With the development of global urbanization, cities have been severely threatened by the negative hydrological effects of urbanization, and the healthy and sustainable development of cities is threatened in past decades. The concept of sponge city was proposed under this background. The core of sponge city construction is Low Impact Development (LID). The research on the optimal layout of LID measures has received more attention. Domestic scholars began to pay attention to the research and practice of LID at the beginning of this century. Currently, in the exploratory stage, there is still a lack of a complete theoretical system for urban runoff control and LID optimization. Therefore, it is imperative to apply LID measures and optimization techniques to the construction of sponge cities in large-scale urban watersheds.

The connotation of sponge city was explained in both broad and narrow perspectives. The functional characteristics of common LID facilities were sorted out. The model tools, optimization algorithms and optimization target used in the field of optimization of LID facilities were summarized systematically. Typically, the models employed by researchers include SWMM, SUSTAIN, HEC-HMS and MUSIC, etc. The heuristic algorithms used in research are GA, NSGA- II and PSO. Meanwhile, it was illustrated that both the pattern of LID layout and the location of LID facilities had an impact on the urban hydrological process.

The present research on LID optimal layout should meet the requirements of the regional sponge plan. For this purpose, the Huangtaiqiao catchment in Jinan City was selected as the study area. Using NSGA- II algorithm and SWMM model, the multi-objective optimization of the LID layout was carried out considering the cost of LID facilities and the control rate of flood factors. The optimization was carried out according to the division of functional areas and the proportion of LID facilities in each functional area.

The result shows that: (1) When selecting different objective functions, the NSGA- II algorithm can more accurately give a certain cost-effective LID layout scheme, to further determine the most economical scheme and maximum reduction scheme under the corresponding scenario, and can give the corresponding LID. The layout ratio shows good applicability, indicating that the NSGA- II algorithm is suitable for LID optimization layout in urban areas at the watershed scale. (2) The most significant reduction effect on the total runoff is the permeable pavement in the residential area and the public facility area. The combination of the permeable pavement in the residential area, the public facility area and the garden area and the green roof in the public facility area have the most significant effect on the delay time of the flood peak. The most significant reduction effect on flood peak flow is the combination of permeable pavement and green roof in the public facility area.

This study is a preliminary discussion on sponge planning in large-scale urban watersheds to provide some reference for research and engineering construction in this area.

Key words: sponge city; urban flooding; disaster mitigation measures; layout optimization; urbanization

贯彻地下水管理条例，强化地下水超采治理