

城市雨水管理

基于雨水管网恢复力评估的 LID 设施优化布局

汪 维, 王林森, 肖 涛, 张 葵, 陶 涛

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 低影响开发(LID)作为源头控制技术是创建海绵城市的重要环节。在 LID 设施总体规模不变的前提下,为了确定 LID 设施的最佳布置数量和位置,构建了城市雨水管网恢复力计算模型,以城市雨水管网恢复力作为目标函数,采用遗传算法对 LID 设施的分布情况进行优化。结果表明,通过对 LID 设施的布置位置进行优化,可明显提升研究区域雨水管网的恢复力,合理的 LID 设施分散程度是改善雨水管网系统能力的重要因素。

关键词: 雨水管网恢复力; 低影响开发; 布局优化; 遗传算法; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0112-05

Layout Optimization of Low Impact Development Facilities Based on Resilience Assessment of Rainwater Pipe Network

WANG Wei, WANG Lin-sen, XIAO Tao, ZHANG Kui, TAO Tao

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Low impact development (LID) technology, also known as a source control technology, is an important part in sponge city construction. On the premise that there is no change of overall scale of LID facilities, a calculation model of urban rainwater pipe network resilience was established in order to determine the optimal distribution quantity and location of LID facilities. The resilience of urban rainwater pipe network was used as the objective function, and the genetic algorithm was employed to optimize the distribution of LID facilities. The results indicated that the resilience of rainwater pipe network in the study area could be significantly improved by optimizing the layout of LID facilities, and a reasonable distribution of LID facilities was an important factor to improve the capacity of rainwater pipe network.

Key words: resilience of rainwater pipe network; low impact development; layout optimization; genetic algorithm; SWMM

城市范围的不断扩张以及极端天气的增加,导致城市区域发生内涝的频率有逐渐上升的趋势,而且城市内涝的影响范围逐渐扩大^[1]。低影响开发(LID)作为源头控制技术是创建海绵城市、改善城市内涝问题的重要环节。国外学者针对 LID 技术的

研究主要集中在应用及相关模型这两方面^[2]。对 LID 雨水设施的布局研究主要包括布置规模、分布数量、具体布置位置 3 个方面,目前国内学者对分布数量和具体布置位置的优化研究尚较少。

1973 年,加拿大生态学家 Holling 首次在生态

学领域提出了恢复力这一概念,其后该概念被拓展到社会系统当中^[3]。至 2012 年,恢复力被应用于城市基础设施领域^[4],随后在 2016 年,柯庆等人提出了排水管网恢复力的评价方法^[5]。虽然恢复力这一概念被逐渐在各个领域推广开来,但目前尚没有学者将其应用于 LID 设施的优化布局研究中。鉴于此,笔者通过构建城市雨水管网恢复力计算模型,将其作为评估 LID 设施(在本研究中,主要包括生物滞留单元和透水铺装)效果的目标函数。在 LID 设施总规模确定的情况下,控制 LID 设施的布置数量并不断改变其位置,提出能够使雨水管网在应对给定重现期的降雨时恢复力达到最大的布置方案。

1 LID 设施布置研究方法

1.1 城市雨水管网恢复力评估模型

城市基础设施恢复力可以用实际性能曲线对时间的积分值比上目标性能曲线对时间的积分值来计算^[4]。对于城市雨水管网系统,雨水管网的入流量 Q_1 ,一部分流量 Q_c 留在管道内流动,最终经管道输送排入河道;另一部分流量 Q_s 从节点溢出造成地面积水。为衡量雨水管网系统的恢复力,规定目标性能曲线为常数即 $P_0 = 1$,实际性能曲线 $P = Q_c/Q_1$ 。当雨水溢出至地表产生地面积水时,管网系统的性能小于 1,其余状态下管网系统的性能等于 1。为方便计算,将性能曲线简化为矩形,就可将积分计算转化为简单的乘法运算,简化后需引入修正系数 α ,计算时针对不同的试验情况对 α 进行参数率定。由此可得到城市雨水管网的恢复力 R 的计算公式为:

$$R = 1 - \alpha \frac{t_s}{T} \frac{V_{Ts}}{V_{Tn}} \quad (1)$$

式中: t_s 为地面积水历时, h; T 为降雨历时, h; V_{Ts} 为降雨历时内产生的地面积水总量, m^3 ; V_{Tn} 为降雨历时内管网的总入流量, m^3 。

LID 设施主要针对中小降雨进行总量控制,因此重现期越大, LID 设施对雨水管网削峰的效果就越弱,式(1)的计算误差就越大。目前城市防涝标准可达到 10 ~ 50 年一遇,部分中心城区甚至更高,较低重现期的降雨可通过 LID 设施进行控制,较高重现期的暴雨应当通过基础设施(LID 设施、排水管网、深隧工程等)与预警、应急措施相结合共同实现城市防涝要求。考虑到 LID 设施一般可抵御 5 年一遇重现期及以下的降雨造成的城市内涝,故主要对 5 年一遇降雨事件下的雨水管网恢复力进行研究。

1.2 目标函数

雨水管网恢复力可反映城市雨水管网在面临强降雨时的抵御和恢复能力,本研究以雨水管网系统的恢复力为目标函数。根据式(1),雨水管网恢复力是 t_s 、 T 、 V_{Ts} 和 V_{Tn} 的函数,在 SWMM 模型中模拟可得到 t_s 、 V_{Ts} 、 V_{Tn} 值。本研究采用上海市中心城区暴雨强度公式以及芝加哥雨型,重现期设为 5 年,设计降雨历时设为 2 h,该情况下 α 值为 17。将子汇水区设置 LID 设施的布置情况用一组变量即 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的值来表示,每种布置情况可以得到 $\frac{t_s}{T} \frac{V_{Ts}}{V_{Tn}}$ 的唯一值。于是可以得到如下函数关系:

$$\frac{t_s}{T} \frac{V_{Ts}}{V_{Tn}} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

则目标函数可以表示为:

$$\max R = 1 - 17 \times f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

式中: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 代表子汇水区上是否设置 LID 设施,仅有 0 或 1 两种取值,0 代表不设置,1 代表设置; n 为可设置 LID 设施的子汇水区总数。

1.3 约束条件

以雨水管网恢复力为目标函数,变量为子汇水区上是否设置了生物滞留单元和透水铺装。根据确定的布置规模进行城市雨水管网恢复力优化,该优化问题是一种等式约束问题,如下:

$$\sum_{i=1}^n x_i = a \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^a S_i = A \quad (5)$$

式中: a 为设置了 LID 设施的子汇水区总数; S_i 为每个子汇水区上设置的生物滞留单元或透水铺装面积, m^2 ; A 为整个研究区域上设置生物滞留单元或透水铺装的总面积,针对每种总体方案为常数, m^2 ; i 为子汇水区的编号。

1.4 优化思路及过程

所研究的问题为包含等式约束的单目标优化问题,采用的方法为遗传算法。在研究区域需要设置 LID 设施的总面积和设置了两种 LID 设施的子汇水区总数不变的前提下,不断改变 LID 设施的位置(用 x_i 表示),并运用 SWMM 进行模拟,得出在每个解的情况下,研究区域雨水管网的总积水量、总进流量和积水时间,进而求出对应条件下的雨水管网恢复力。为简化优化过程,设定所选择的每一个拟设置 LID 设施的子汇水区同时设置了生物滞留单元和

透水铺装,两种 LID 设施在子汇水区中的面积均依据相应子汇水区面积占有所有被选择的子汇水区总面积的比例进行分配。运用 Matlab 语言调用 SWMM 模型的方式实现该优化过程,算法流程见图 1。

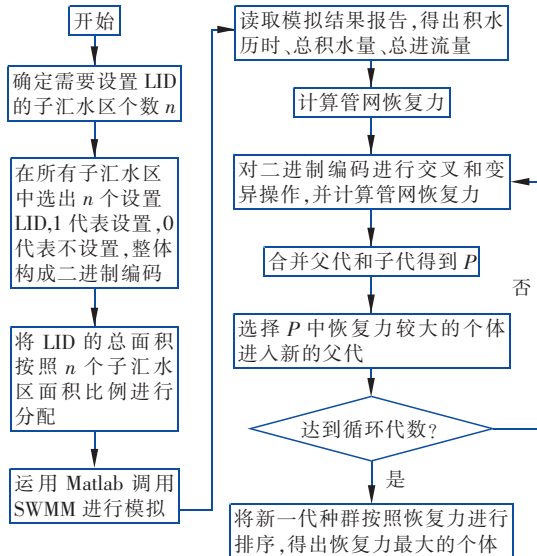


图 1 LID 设施优化布置算法流程

Fig. 1 Flow chart of LID layout optimization

2 工程案例

2.1 研究区域概况

以 SH 市某片区的雨水管网为研究对象,服务面积为 263 hm^2 。该片区的 SWMM 雨水管网模型包含 249 个子汇水区、150 根管道、151 个节点和 1 个排放口。研究区域的总绿化率为 40%,子汇水区面积在 $0.013 \sim 1.78 \text{ hm}^2$ 之间,选择面积 $>0.3 \text{ hm}^2$ 的子汇水区作为可以设置 LID 设施的对象,最终选出 233 个子汇水区。雨水管道总长度为 15.7 km,其中管径在 500 ~ 1 000 mm 之间的管道长度占 64%。研究片区的地势为南高北低,雨水经管网收集后由南向北排入河道。雨水管网模型见图 2。

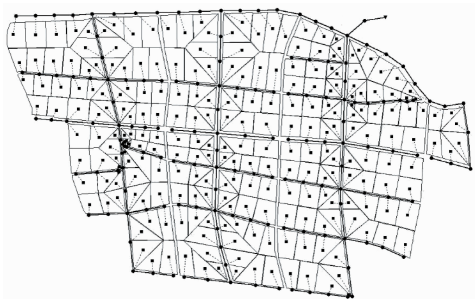


图 2 研究区域雨水管网的 SWMM 模型

Fig. 2 SWMM of rainwater pipe network in study area

2.2 LID 设施分布数量和位置的优化结果

以年径流总量控制率和总费用作为目标函数,采用 NSGA- II 算法进行优化可得到年径流总量控制率与总费用的 Pareto 最优曲线。根据 SH 市合理的年径流总量控制率即 75% ~ 85%,可筛选出 3 种总体方案,如表 1 所示^[6],针对每种总体方案,在保持两种 LID 设施总面积不变的前提下,随机从 233 个子汇水区中分别选取 20、25、30、35、40、55、70、100 个设置两种 LID 设施,通过不断改变所选子汇水区的位置,计算分析研究区域雨水管网的恢复力达到最大的方案。本研究中遗传算法每代种群规模为 50 个,遗传代数为 100 代,经过 100 代的操作雨水管网的恢复力基本可达到收敛。

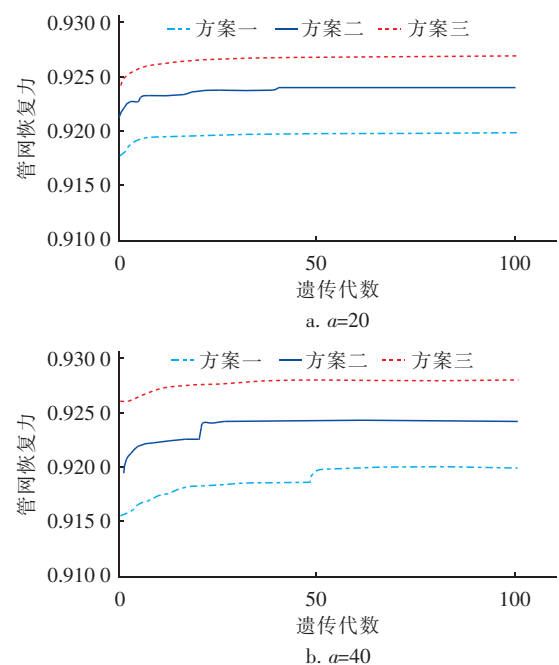
表 1 3 种总体方案的年径流总量控制率及总费用

Tab. 1 Volume capture ratio of annual rainfall and total cost for three overall schemes

项 目	方案($S_{\text{bre}}, S_{\text{pp}}$)/ hm^2	年径流总量 控制率/%	总费用/ 万元
方案一	(7.30, 15.00)	75.9	6 240.4
方案二	(10.12, 14.44)	80.8	7 588.4
方案三	(12.25, 14.93)	84.2	8 755.7

注: S_{bre} 表示生物滞留单元的面积; S_{pp} 表示透水铺装的面积。

在未设置两种 LID 设施时研究区域的雨水管网恢复力为 0.869 9。图 3 显示的是针对 3 种方案,当设置 LID 设施子汇水区数量分别为 20、40、70、100 个时,雨水管网恢复力的变化曲线。



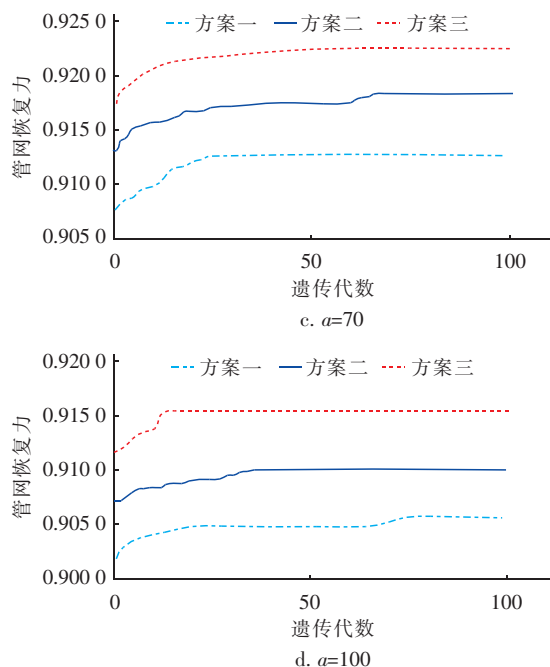


图3 雨水管网恢复力的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of resilience of rainwater pipe network

由图3可知,3种总体方案均可使得研究区域的雨水管网恢复力达到0.9以上;另外,对3种总体方案分别设置不同的LID设施数量会对结果产生影响,但管网恢复力相差不到2%,这是因为所选取的3种总体方案已经是最优方案,再对其进一步优化得出的结果差异较小是合理的。

研究结果同时也表明,设置的LID设施数量越多,研究区域的雨水管网恢复力反而下降。合理的解释是,在区域的LID设施总规模已经确定的情况下,LID设施的分散程度越高,每一块设施的面积就越小,很小的LID单元无法有效控制雨水径流量,从而使得提升雨水管网恢复力的能力下降。当然,LID设施的分布也不能过于集中,通过集中改造某一片区来提升整个研究区域年径流总量控制率的方式并不利于解决该区域的内涝问题,从而造成了整体雨水管网系统的恢复力出现下降。因此,合理的LID设施分散程度也是改善雨水管网系统能力的重要因素。根据研究结果,当设置LID设施的子汇水区数量为25个时,3种总体方案所得出的管网恢复力均可取得最大值。

3种总体方案经过优化后,LID设施的分布情况如图4所示,绿色部分代表每种总体方案中LID设施的最佳分布位置(限于篇幅,仅列出设置LID设

施的子汇水区数量为20和100个时的情况)。

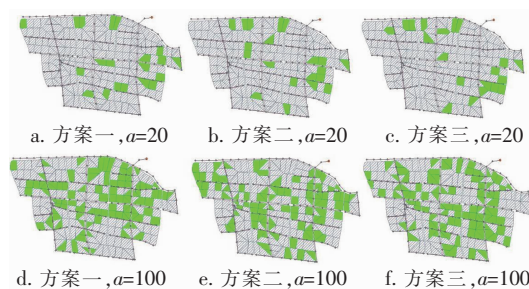


图4 3种总体方案经优化后的LID设施布局方式

Fig. 4 Layout of LID facilities in three overall schemes after optimization

3 结论

① 通过对LID设施的布置位置进行优化,可明显提升研究区域雨水管网的恢复力。通过构建包含 t_s 、 T 、 V_{Ts} 、 V_{Ti} 等参数的城市雨水管网恢复力计算模型和选取合适的优化算法,可实现对LID设施布置数量和位置的优化。

② 采用遗传算法为优化方法,以研究区域的雨水管网恢复力为目标函数,研究LID设施的最佳布置数量和位置,筛选出3种总体方案,与未设置LID设施时相比,3种总体方案均能够将城市雨水管网的恢复力提升至0.9以上。根据优化结果,得出了雨水管网恢复力随LID设施设置数量的变化关系,在LID设施总规模不变的前提下,LID设施设置过于分散或者过于集中均不利于提高雨水管网恢复力,合理的LID设施分散程度是改善雨水管网系统能力的重要因素。

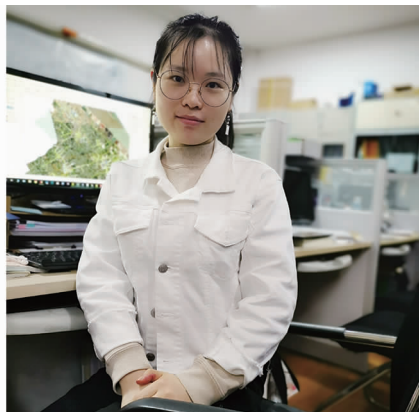
③ 当某一分布数量确定时,本方法优化过程所得出的解就是LID设施的最佳分布位置。在确定布置数量时,评判标准即管网恢复力的差异较小,应当同时考虑分散程度的大小能够在其他方面(如城市生态、面源污染控制)产生相应影响,因此,在决策优化布局方案时应当综合考虑年径流总量控制率、LID技术建设及运行成本、雨水管网恢复力、面源污染控制等多方评价因素,选取合适的决策方法,确定最终方案。

参考文献:

- [1] 熊小兰. 基于排水模型与GIS技术耦合的城市暴雨内涝灾害风险评估[D]. 上海:同济大学,2015.
Xiong Xiaolan. Water Flooding Disaster Risk Assessment Based on Drainage System Model Coupled with GIS

- Technology [D]. Shanghai: Tongji University, 2015 (in Chinese).
- [2] 陈秉楠. 新开发区低影响开发设施布置优化研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- Chen Bingnan. Layout Optimization of Low Impact Development Facilities in New Development Zone [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015 (in Chinese).
- [3] Adger W N. Social and ecological resilience: are they related? [J]. Prog Hum Geog, 2000, 24(3): 347-364.
- [4] Ouyang M, Dueñas-Osorio L. Time-dependent resilience assessment and improvement of urban infrastructure systems [J]. Chaos, 2012, 22(3): 3122-3133.
- [5] 柯庆, 王林森, 陶涛. 城市雨水排水系统恢复力评估 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 6-11.
- Ke Qing, Wang Linsen, Tao Tao. Resilience assessment of urban rainwater drainage systems [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 6-11 (in Chinese).
- [6] 王林森. 低影响开发雨水设施的布局优化研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017.

Wang Linsen. Study on the Layout Optimization of Low Impact Development Infrastructures [D]. Shanghai: Tongji University, 2017 (in Chinese).



作者简介: 汪维 (1994 -), 女, 安徽桐城人, 硕士研究生, 研究方向为给排水管网设计与运行优化。

E-mail: wangwei_victoria@126.com

收稿日期: 2018-12-19

· 会讯 ·

“《中国给水排水》2019年排水管网大会”定于8月27日—30日在宁波市召开

在《水污染防治行动计划》(水十条)以及住房和城乡建设部、生态环境部、发展改革委联合印发关于城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019年—2021年)等政策实施的大背景下,全国重点区域及重点流域均对污水处理和排水提出了更高的要求,排水管网成为行业发展的瓶颈和热点问题,在行业内外皆备受关注。2014年6月,国务院办公厅印发了《关于加强城市地下管线建设管理的指导意见》(国办发[2014]27号),作为国内首部专门针对地下管线的政策指导文件,为今后一段时间我国城市地下管线建设管理指明了方向,具有里程碑式的意义。2016年9月,住房和城乡建设部发布了《城市黑臭水体整治——排水口、管道及检查井治理技术指南》(试行)。为了进一步贯彻落实以上文件精神,总结交流国内外技术进展与管理经验,提高排水管网的智慧化水平,《中国给水排水》杂志社联合中国市政工程华北设计研究总院有限公司、上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司、宁波市供排水集团有限公司、中国建设科技集团股份有限公司等单位举办“2019年排水管网大会”,届时将邀请住房和城乡建设部、中国土木工程学会、中国城镇供水排水协会等有关单位领导,全国排水行业设计、科研、运营、建设单位的专家、学者、管理人员等,解读行业政策,分享国内外排水系统典型成功案例,研讨未来技术发展方向,搭建推介排水系统新技术、新工艺、新设备的平台。

欢迎全国水行业工程技术及管理人员撰写论文,优秀论文将收录入会议论文集,并优先在《中国给水排水》杂志上发表。投稿邮箱: wanglingquan88@163.com, 截稿日期: 7月25日。

会议时间: 2019年8月27日—30日(27日报到, 28日—29日会场交流, 30日参观)

会议地点: 宁波泛太平洋大酒店(宁波市鄞州区民安东路99号)

会议负责人: 王领全, 13752275003, wanglingquan88@163.com

(本刊编辑部)