

基于 SUSTAIN 模型的 LID 设施成本效益分析

梁 骞¹, 任心欣¹, 张晓菊²

(1. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东 深圳 518028; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 以深圳市某低影响开发(LID)示范区为研究对象,利用 SUSTAIN 模型分析 LID 措施在削减峰值流量方面的成本效益。构建研究区域排水系统的现状模型,并利用实测降雨数据进行率定,在现状模型的基础上构建 LID 方案,以雨水排放口的峰值流量为控制目标,以 LID 设施的规模为决策变量,设置不同重现期设计暴雨作为边界条件,对多种组合的 LID 设施进行模拟,得到各情景下的优化方案以及成本-效益曲线。结果显示,相同的 LID 设置方案在不同强度的降雨条件下的成本-效益曲线有较大差异,LID 设施在高强度降雨下的径流控制效果较差。该研究方法可为相关规划与设计控制目标的制定与建设方案的优化提供参考。

关键词: SUSTAIN 模型; 低影响开发; 峰值流量; 决策变量; 优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0136-04

Cost-effectiveness Analysis of Low Impact Development Facilities Based on SUSTAIN Model

LIANG Qian¹, REN Xin-xin¹, ZHANG Xiao-ju²

(1. Urban Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The cost-effectiveness of low impact development (LID) facilities in peak flow reduction in a LID demonstration area in Shenzhen City were studied using SUSTAIN model. The model for the current drainage system in the studied area was built and calibrated with previous monitored data. LID facilities were configured based on the model. Using the peak flow at the outlet as the control target, the capacities of the LID facilities as the decision variables, and the design storms of different return periods as boundary conditions, the LID facilities with various combinations were simulated, and the optimized schemes and the cost-effectiveness curves for LID facilities under different scenarios were obtained. The results showed that the cost-effectiveness curves of the same LID facilities were very different under rainfalls with different intensities, and the performance of LID facilities was relatively poor under high-intense rainfalls. The study can provide reference for making control targets and optimizing construction scheme when planning and designing LID facilities.

Key words: SUSTAIN model; LID; peak flow; decision variable; optimization

低影响开发(LID)设施对降雨径流流量的控制主要体现在控制径流总量和削减峰值流量两个方面。其中,峰值流量主要影响到降雨过程中汇入市政排水管网的最大流量,在排水管道设计能力一定的条件下,管网的设计过流能力是否大于最大汇流量决定了管道是否具备足够的排水能力。通过源头建设 LID 设施削减径流峰值,对于减小管网负载以及提高管道的实际排水标准具有一定的效果。我国的《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》中将雨水径流控制列为组成城市排水防涝体系的三大系统之一。不同的 LID 设施布局和规模会影响到控制峰值径流的效果,同样规模的 LID 设施对于不同强度降雨的峰值径流控制效果也有所不同。因此,有必要研究 LID 设施的处理效果与控制目标、建设规模之间的关系,从而在相关项目的规划与设计发挥指导作用,实现 LID 的优化布局。笔者以深圳市某 LID 示范区为研究对象,采用 SUSTAIN 模型,构建研究区域排水系统模型和 LID 模型,以削减径流峰值为目标,对多种组合的 LID 布局方案进行模拟与优化,形成不同降雨强度下的成本-效益曲线。

1 研究区域概况

研究区域位于深圳市茅洲河流域,属于亚热带季风气候,降雨充沛且相对集中。研究区域包含两个商业地块和一条市政道路,总汇流面积为 20.4 hm²。区域内建有现状雨水管网,排水口位于区域的西北角。研究区域的下垫面类型包括建筑屋顶、绿地、硬质铺装、市政道路和未开发用地,面积分别为 5.3、4.5、7.5、1.1、2 hm²,所占比例分别为 26%、22%、36.8%、5.4%、9.8%,具体分布情况见图 1。

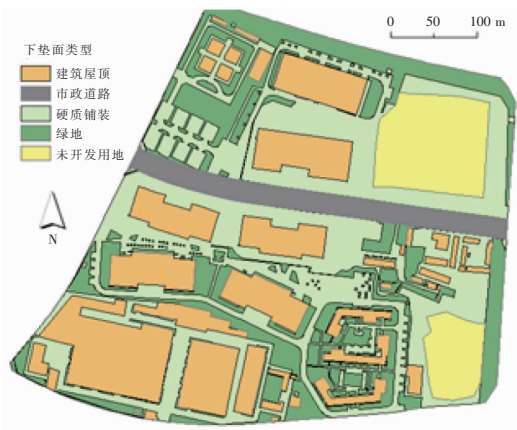


图 1 研究区域下垫面分布示意

Fig. 1 Map of land uses in study area

根据深圳市相关设计暴雨资料,研究区域内 1、2、3、5、10 年一遇重现期下的 2 h 设计暴雨量分别为 60.8、71.5、82.2、94、108.6 mm。

2 研究方法

2.1 SUSTAIN 模型简介

SUSTAIN 模型是由美国环境保护署于 2009 年发布的基于 ArcGIS 平台的城市雨水径流模拟分析系统,可用于 LID/BMP 系统的模拟、布局、分析和优化。模型集成了 BMP 选址工具、流域模块、BMP 模块、优化模块、成本模块和后处理模块六大组件于一体。使用 SUSTAIN 模型进行 LID 方案优化分析的优势在于:模型可以在设定的范围内,自动对不同 LID 设施的规模和参数进行多种组合和逐一模拟,最后在所有可能的方案中提出最优化或近似最优化的方案。相对于人工设定 LID 措施一般仅能获得的相对有限的组合数量的情况,采用 SUSTAIN 提供的自动组合和优化分析方法的效率更高,而且可以避免遗漏,从而提供更有有效的决策支持。

2.2 优化方法

方案优化的过程就是通过调整 LID 设施的布置、类型与设计参数等,实现在最低的费用投入基础上满足水质、水量方面的控制要求。应用 SUSTAIN 进行方案优化分析所需的要素包括:决策变量、评估点和评估因子。

LID 设施的布局、规模、参数均可以作为优化分析中的决策变量。在模型模拟中,允许决策变量在一定的范围内变化从而构成不同的方案。出于研究需要,假设每一类 LID 设施均采用固定的设计参数,在确定设施布局的情况下,将设施的规模作为决策变量,进而研究 LID 投资规模与处理效果之间的关系。评估点就是进行水质或水量参数评估的地点;在模拟中取研究区域的总出水口作为评估点。评估因子可以设为不同的水质或水量控制目标,包括峰值流量、总流量、污染物浓度等;本次研究的评估因子即为总出水口处的峰值流量削减率。

2.3 技术路线

结合上述方法,本次研究的主要步骤包括:①收集数据。收集并分析建模所需数据信息,包括数字高程信息(DEM)、下垫面数据、土壤类型、LID 设计方案、LID 设施造价、雨水管网布置、降雨数据和水量监测数据等。②建立现状模型。在 SUSTAIN 平台上建立研究区域的现状模型,模拟无 LID 设施情

景下的现状排水条件,绘制雨水管网、划分汇水分区、设置下垫面、制定汇水路径等。③校核现状模型。利用实测降雨数据及管网流量监测数据校核模型结果,并对模型参数进行率定。④建立 LID 模型。在现状模型的基础上添加 LID 设施,设置 LID 的类型、参数、布局 and 造价。⑤优化方案。制定方案优化所需的决策变量、评价地点和评价参数。分别在 5 种不同设计暴雨强度下运行模型,得到最优方案下的成本 - 效益曲线。

3 现状模型构建与率定

以 SUSTAIN 为平台建立现状模型,选择 Internal Land Simulation 选项,调用内置的 SWMM 计算引擎进行产汇流模拟,获得排水口的流量结果。采用 2012 年发生的 3 场降雨实测数据对模型进行率定。将降雨期间在排水口处监测到的时间间隔为 5 min 的流量数据与模型结果进行对比,参考已有的参数敏感性有关研究^[1],通过调整下垫面不透水率、管网糙率等参数,将模型结果的偏差置于可接受的范围,即水体积偏差率在 -10% ~20% 之间^[2],峰值流量偏差在 -15% ~25% 之间。模型的率定结果见表 1。

表 1 模型率定结果

Tab. 1 Model calibration performance

降雨时间	降雨量/ mm	水体积 偏差/%	峰值流量 偏差/%
6 月 15 日 9:13—10:53	21.1	6	9
6 月 24 日 16:20—18:50	70.8	-7	-11
7 月 15 日 13:50—15:45	14.6	-4	2

4 LID 模型构建

在现状模型的基础上布置 4 种 LID 设施:雨水花园、透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地。结合地形、雨水管渠分布和下垫面类型对设施进行布局。将建筑屋顶分为平屋顶与坡屋顶两类,在平屋顶上采用绿色屋顶措施,再将绿色屋顶的出水导入雨水花园;坡屋顶收集的雨水则直接进入雨水花园。市政道路的雨水通过两旁的雨水花园处理之后再进入市政管道。将部分硬质铺装改造成透水铺装,透水铺装的溢流雨水以及其余硬质铺装的雨水均先进入下沉式绿地,然后再进入市政管道。绿地和未开发用地的雨水则直接汇入市政管道。LID 设施的布局与径流组织方案如图 2 所示。

将 LID 设施的规模作为决策变量,设置决策变

量的取值范围和增量,作为组成不同方案的基础。分析场地内可用于各类设施建设的全部范围,将 LID 设施可能布置的最大面积作为设施规模的最大值,将不设任何 LID 措施的方案作为最小值,从而使设施规模的取值范围涵盖从零到最大的所有可能性,并通过设施的建设单价与规模相乘来计算投资成本的范围。各类 LID 设施的规模范围与建设单价设置如表 2 所示。

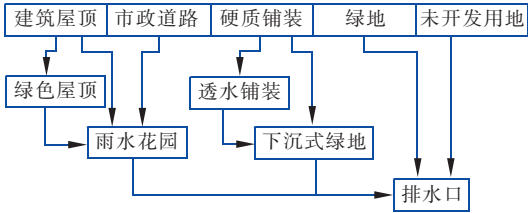


图 2 LID 设施布局与径流路径

Fig. 2 Schematics of LID facilities

表 2 LID 设施的规模与造价

Tab. 2 Scale and increments of LID facilities

设施类型	最大规模/ m ²	最小规模/ m ²	规模增量/ m ²	单价/ (元 · m ⁻²)
雨水花园	743	0	2	700
透水铺装	47 566	0	186	300
绿色屋顶	21 553	0	186	800
下沉式绿地	1 226	0	9	100

构建完成后的 LID 模型界面如图 3 所示。

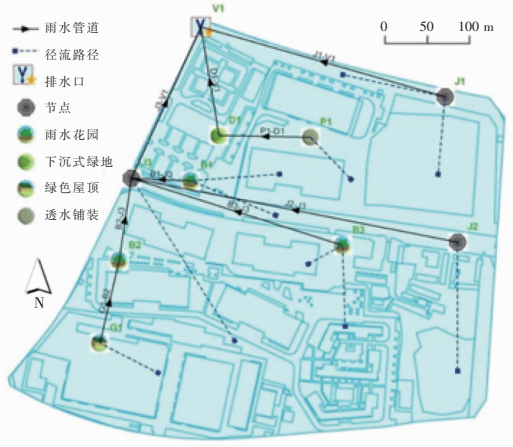


图 3 LID 模型界面

Fig. 3 LID model interface

5 LID 方案的成本效益分析

取流量峰值削减率作为优化目标,以设施规模为决策变量,设置 5 个模拟情景分别以 1、2、3、5、10 年一遇的设计暴雨作为边界条件,基于 NSGA - II

方法^[2]对 LID 模型进行超过 1 000 次模拟,得到各情景下的成本-效益模拟结果。

以 1 年一遇降雨情景下得到的模拟结果为例,将全部方案的成本与效益的对应关系绘制成散点图,如图 4 所示。可知,在 LID 设施能够达到的最大峰值削减率之下,每一个削减率目标对应的成本都存在一个最优解,这个最优解对应的各类设施规模的组合就是 LID 布局的最优方案之一。LID 对峰值流量的削减效益总体随着成本的增加而增加,但在效益超过一定的阈值之后,继续增加 LID 成本带来的边际效益就会逐渐降低,最后趋向于零。

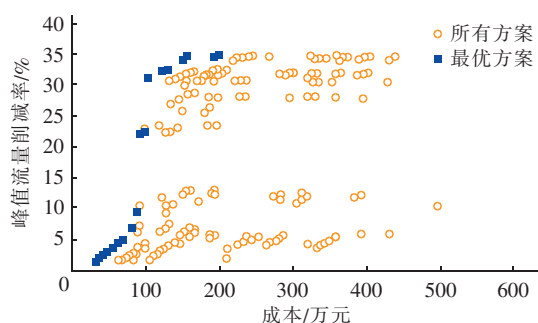


图 4 LID 方案的成本-效益对应关系

Fig. 4 Cost-effectiveness results of LID schemes

将各种情景下的最优方案的成本-效益曲线进行对比,如图 5 所示。

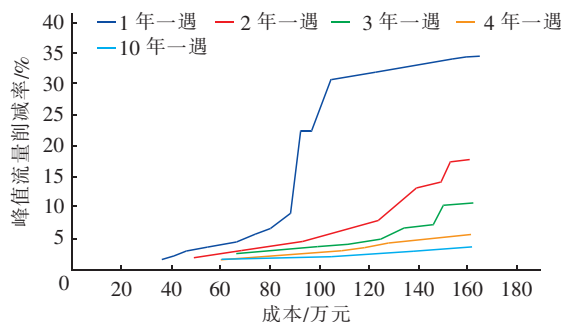


图 5 不同降雨强度下的成本-效益曲线

Fig. 5 Cost-effectiveness curves under various rainfall intensities

由图 5 可见,同样规模的 LID 设施在不同降雨强度下表现出来的峰值削减效益具有显著差异。降雨越强,成本-效益曲线的坡度就越小,也就是要实现一定的控制目标需要花费的成本越高。在本案例中,1、2、3、5 和 10 年一遇降雨条件下 LID 可以实现

的最大峰值削减率分别在 34%、18%、11%、4% 和 3% 左右。

6 结论

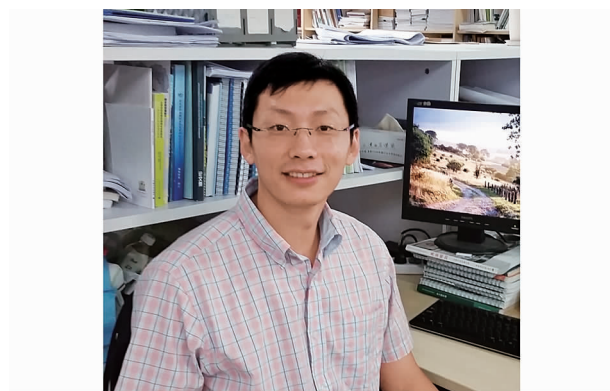
① 在设计 LID 设施时,要实现同一控制目标,可能存在性价比高低各不相同的多种方案,可以通过设置多种设施的组合以及模型的辅助运算找出其中的优化方案。

② LID 设施对峰值径流的削减率具有一定的上限。在处理效果接近上限值时,继续增加设施规模上的投资带来的边际效应会逐渐减小。

③ 同样规模的 LID 设施在不同降雨强度下的效益呈现出显著差异。为了满足一定的控制目标,有必要在开展 LID 设计时紧密结合降雨条件进行考虑。本研究可为如何在实践中确定 LID 设施的合适布局及规模提供参考方法。

参考文献:

- [1] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. 水科学进展,2009,20(1):45-51.
- [2] Wastewater Planning Users Group. WaPUG Code of Practice for the Hydraulic Modeling of Sewers (3rd ed)[M]. Wallingford, U. K.: Watershed Planning Users Group, 2002.



作者简介:梁骞(1985-),男,湖北天门人,硕士,工程师,研究方向为给水排水模型应用、市政工程规划。

E-mail: liangq@upr.cn

收稿日期:2016-07-14