

南方平原城市生态滞蓄设施运行效果的模拟评估

韩松磊, 李 田

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称《指南》)对不同地区低影响开发(LID)系统的年径流总量控制率提出了具体要求,但《指南》中同一类型地区的LID达标却面临不同的问题。以上海市为研究对象,探讨在南方平原城市地下水位高、土壤渗透性差、建筑密度高等限制条件下,适用的生态滞蓄型LID设施的选择问题;利用SWMM模型评估下渗作用受限制的应用条件下,设施的年水量控制效果。结果显示,在接近最大可能条件下进行低影响开发,上海典型城区LID系统的年径流总量控制率低于55%,难以达到《指南》的要求。因此建议,在南方平原地区将滞蓄型LID设施排水管道的出流量计入受到控制的水量范围,以体现不同区域雨水管理目标的差别。

关键词: 低影响开发; 海绵城市; 滞蓄; 年径流总量控制率; 模拟评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0119-04

Simulation and Evaluation of Operation Effect of Ecological Retention Facilities in Southern Plain Cities

HAN Song-lei, LI Tian

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

Abstract: *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development* imposed the specific requirements for volume capture ratio of annual rainfall of low impact development systems in different regions, while different problems arose to meet the LID standards in the same type of regions. Taking Shanghai as the research object, the choices of suitable ecological retention LID facilities were discussed under the limiting conditions of high underground water level, poor soil permeability and high building density in southern plain cities. The control effects of annual runoff volume of LID facilities with restricted infiltration were evaluated by using the SWMM model. The results showed that with the low impact development at close to the maximum possible conditions, the volume capture ratio of annual rainfall of the LID system was lower than 55% in typical urban area of Shanghai, which is difficult to meet the standard of the guide. Therefore, it is suggested that the effluent volume from retention LID facilities should be incorporated into the controlled range in the southern plains region in order to reflect the difference in rainwater management goals in different regions.

Key words: low impact development; sponge city; retention; volume capture ratio of annual rainfall; simulation and evaluation

海绵城市建设要求实行低影响开发,从源头控制径流的产生,使城市开发后的水文特征接近于开

发前,以控制面源污染,缓解城市内涝。《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试

行)》(简称《指南》)提出的规划控制目标包括径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制、雨水资源化利用,上述目标主要通过径流总量控制来实现。因此,《指南》选择年径流总量控制率作为核心控制指标。《指南》对不同地区年径流总量控制率指标的制定主要是从水资源禀赋状况、降雨特性、经济发展水平等角度考虑的,而关于不同地区的区域特征对低影响开发技术的可实施性缺乏考虑。南方平原城市地下水位高、土壤渗透性差,渗透型 LID 设施存在被地下水淹没或污染地下水的风险,该类区域只能使用滞蓄型 LID 设施。然而,在相同的设计容积下,滞蓄型设施的年径流总量控制率与渗透型设施相比明显较差。

笔者采用 SWMM 模型,以上海市某代表性排水区域的土地利用状况为例,根据当地的区域特征,确定适用的 LID 设施,评估 LID 设施在设计降雨条件下的水量控制效果与典型年降雨下的年径流总量控制率,探讨在只能使用滞蓄型 LID 设施的南方平原城市,海绵城市建设中年径流总量控制率标准的确定。

1 研究方法

1.1 南方平原城市 LID 设施的选择

影响 LID 设施应用的限制条件主要包括土壤渗透性、地下水位、地面坡度、空间需求等。上海等南方城市汛期地下水埋深仅有 0.5 m,土壤质地粘重,渗透速率经常小于 1×10^{-6} m/s,地面平坦不利于汇流,土地资源紧缺。参照《指南》及国外相关导则^[1]中有关地下水最高动水位距 LID 设施底部的距离不小于 1 m 的规定,渗透型 LID 设施的应用受到明显限制。研究区域适用的 LID 设施主要是分散的滞蓄型 LID 设施,设施底部需做防渗处理、铺设下排水管道防止积水或被地下水淹没。参照国外导则^[2]中不同 LID 设施的适用条件,结合南方平原城市的特征,LID 设施选择标准为:①不考虑渗透功能;②控制径流污染是主要目标;③尽可能少占用土地。由此确定适用的 LID 设施为滞蓄型生物滞留池、渗透铺装及绿色屋顶。雨水直接利用在南方高密度城区的费用效益不佳,因此不作为主要措施。

1.2 研究区域

鞍山汇水区域(简称 A 汇水区域)位于上海市杨浦区,建成于 1994 年,服务面积约为 1.3 km²,为合流制泵排系统。区域内主要是 20 世纪 80~90 年

代建造的多层住宅及少量商业建筑,建筑密度为 32.1%,人口密度为 370 人/hm²,在上海市中心城区具有代表性。根据 GIS 数据,得到 A 汇水区域的主要用地类型如图 1 所示,可归纳为以下三类:①建筑,面积为 38.3 hm²,占比为 32.1%;②道路广场(不包含市政道路),面积为 40.2 hm²,占比为 33.7%;③绿地,面积为 40.8 hm²,占比为 34.2%。本研究以 A 汇水区域的管道系统及用地概况为例,讨论在上海类似用地条件下 LID 的水量控制效果。



图1 鞍山用地类型

Fig. 1 Land use of Anshan watershed

1.3 模型的构建与率定

本研究以 SWMM5.1 模型软件作为模拟研究工具,该模型中包含了常用的 LID 设施,能很好地表达 LID 设施运行的物理过程。

根据 SWMM5.1 模型的应用要求,结合 A 汇水区域排水管网数据与下垫面情况,考虑小区围墙对地表径流汇入到市政管网路径的影响,细分了研究区域的子汇水区。其中,不同子汇水区 LID 设施的下排水出口直接汇入该子汇水区的收水节点,未能通过 LID 设施收集的径流直接进入道路市政管网。研究区域概化结果如下:共划分为 110 个子汇水区,面积在 0.14~7.26 hm² 之间;排水管网节点共 182 个;排水管总长为 6.5 km。

参考相关文献、模型用户手册和实地监测值^[3]选择研究区域的管网模型参数。其中,产流过程采用 Horton 方程进行模拟。参考谭琼^[4]、董欣^[5]等对模型参数灵敏度的分析,确定灵敏度较高的参数,提高管网模型率定效率。由鞍山泵站 SCADA 系统选择 2012 年历时不同的 3 场降雨进行率定、1 场降雨进行验证,4 场降雨的 N-S 系数均在 70% 以上,满

足模型使用要求。

1.4 LID 的布置方案与模型设置

选用的 3 种 LID 设施中,生物滞留池的介质较厚,相同面积下水文控制效果较好,主要布置在道路两侧绿地及大块绿地中;研究区域内住宅以 6~7 层公寓房为主,适合应用轻型介质的粗放型绿色屋顶;渗透铺装主要用于小区内道路及停车场的改造。以接近最大可能性布置 LID 设施,每种设施所占相关下垫面比例如下:生物滞留池所占比例(设施占渗透性面积的比例)为 33%,服务面积比为 10%;绿色屋顶所占比例为 60%;透水铺装所占比例为 40%。

参照朋四海^[6]、陈昱霖^[7]等场地试验设施参数及国内外 LID 设计手册,结合 A 汇水区域特征,选择 SWMM5.1 模型中 3 种 LID 设施的设计值与模型参数如表 1 所示。其中,LID 设施排空时间通过孔口排放系数控制,由于滞蓄型设施孔口排放速率对洪峰削减及峰现时间有影响,对水量削减效果无明显影响,本研究设定 LID 设施 24 h 内排空。

表 1 LID 设施参数选择

Tab.1 Parameters of LID facilities

项 目	生物滞留池	绿色屋顶	渗透铺装
堰高/m	0.05	—	—
表层粗糙系数	0.4	0.4	0.2
透水砖	厚度/m	—	0.08
	孔隙率		0.15
	渗透速率/ (mm·h ⁻¹)		35
介质厚度/m	0.8	0.15	0.25
介质空隙度	0.37	0.46	0.35
田间持水量	0.24	0.28	0.062
凋萎点	0.12	0.16	0.024
饱和土壤渗透率/ (mm·h ⁻¹)	40	50	40
排水层厚度/m	0.15	0.05 (排水板)	0.2
排水层孔隙率	0.3	—	0.35
排水系数	0.52	—	0.38

2 LID 设施的水量控制效果

在相同的土地利用条件下,比较上述低影响开发方案与传统排水系统(现状)两种模式下系统的径流总量,据此评价 LID 系统的水文控制效果。目的在于考察与 A 系统用地及建筑类型相似的条件,南方平原城市新开发区采用 LID 措施控制径流总量的效果。

2.1 设计降雨条件下 LID 系统的控制效果

选用 A 区域 2011 年 10 月 13 日的实测降雨过程作为模型输入降雨,如图 2 所示,该场降雨历时 6 h,累计降雨量为 33.8 mm,与《指南》中对上海地区年径流总量控制率达到 85% 的次降雨量对应。

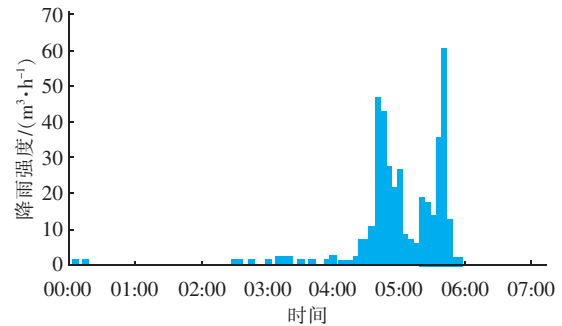


图 2 设计次降雨过程

Fig.2 Process of design rainfall

设定生物滞留池和渗透铺装内的重力水 24 h 内排空,因此模拟时长取 24 h。各 LID 设施的初始含水率设置为凋萎点,以评估 LID 设施削减径流量的最大可能性。为了直观反映 LID 设施的峰值延迟和削减效果,模型中将 A 系统设置为可重力自由出流,以便直接描述系统末端的流量过程。传统排水系统和低影响开发两种场景下,汇水区域的出口流量变化过程如图 3 所示。

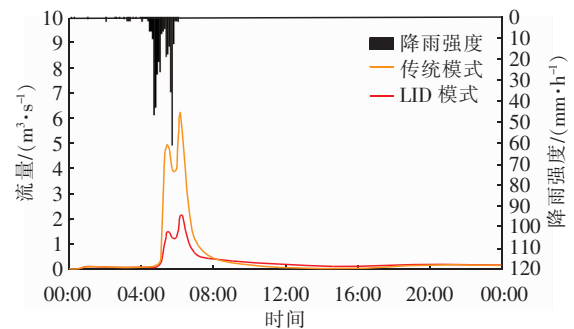


图 3 A 汇水区域传统排水设施与低影响开发场景下的出流过程

Fig.3 Outflow processes of traditional sewer system and low impact development

根据模拟计算结果的统计,相比传统排水系统,低影响开发方案的峰值流量削减率为 64.7%,出水流量削减率为 36.7%,峰现时间延迟 4 min。累积出水量的统计结果显示,对降雨径流总量的控制率只有 66.5%,达不到《指南》所要求的 85% 的年径流总量控制率。

2.2 LID 系统的年径流总量控制效果评估

为进一步讨论 LID 系统的年径流总量控制效果,以 A 系统为研究对象,在与次降雨控制效果研究相同的 LID 方案设置与对照场景下,采用 SWMM5.1 进行年降雨长期连续模拟,评估实行低

影响开发可能达到的年径流总量控制率。选用降雨量接近上海多年平均值的 1996 年(雨量为 1 183 mm)的分钟降雨数据,以 15 min 步长重新统计雨量分布后作为年降雨输入过程。蒸发量采用上海各月平均蒸发数据。模拟结果统计如表 2 所示。

表 2 长期连续模拟两种模式下的水量平衡统计

Tab.2 Water balance of two scenarios under long-term continuous simulation

m³

项 目	总降雨量	蒸发损失量	渗透损失量	径流量	LID 排放量	LID 初始储量	最终储量
传统模式	1.52×10^6	2.56×10^5	3.71×10^5	8.97×10^5	—	—	—
LID 模式	1.52×10^6	4.99×10^5	2.95×10^5	3.68×10^5	3.49×10^5	1.98×10^4	2.37×10^4

由表 2 可知,低影响开发模式相比传统开发模式,蒸发量增加了 94.9%,径流量减少了 59.0%,渗透损失减少了 20.5%。渗透损失量的减少主要是因为生物滞留池建在绿地上,设置有不透水底板,使得绿地的下渗量减少。

参照《指南》中对年径流总量控制率的定义,计算得到传统开发和低影响开发两种模式下的年径流总量控制率分别为 41.1% 和 52.9%。由此可知,在高地下水位、不能考虑下渗而且土地开发强度比较高的情况下,即使在接近最大可能性条件下设置 LID 方案,也难以达到《指南》提出的年径流总量控制率大于 75% 的考核要求。如果将经 LID 设施净化、滞蓄后排放的水量也算为已得到控制的径流量,LID 系统的年径流总量控制率为 75.8%,这样可达到《指南》的要求。

3 结论

① 在南方平原地下水位高、水资源禀赋条件好、土地开发强度比较高的城市,适用的 LID 技术对径流总量的控制效果不理想,在设计次降雨与典型年长期模拟两种条件下,在上海按照接近最大可能性的条件布置 LID 设施,评价区域的年径流总量控制率均难以达到《指南》的考核要求。

② 建议参照《指南》中“对于水资源丰沛的城市或地区,可侧重径流污染及径流峰值流量控制目标”的要求,在南方平原地区将滞蓄型 LID 设施排水管道的出水量计入受到控制的水量范围,以体现不同区域雨水管理目标的差别。

参考文献:

- [1] EPA-841-B-00-005, Low Impact Development (LID): A Literature Review[S]. Washington: US EPA, 2000.

- [2] EPA-841-F-07-006, Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices[S]. Washington: US EPA, 2007.
- [3] 王溯,李田,冯沧,等. 排水系统地下水渗入量的水力学模型辅助评估[J]. 中国给水排水,2010,26(10):13-18.
- [4] 谭琼,李田,周永潮,等. 城市雨水管网模型参数的率定与评价[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(1):31-35.
- [5] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. 环境科学,2008,29(6):1495-1501.
- [6] 朋四海,李田,黄俊杰. 合肥地区生物滞留设施的合理构型和设计参数[J]. 中国给水排水,2014,30(17):145-149.
- [7] 陈昱霖,李田,顾俊青. 粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响[J]. 环境科学,2014,35(11):4157-4162.



作者简介:韩松磊(1991-),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事城市雨水管理、面源污染控制、低影响开发等方面的研究工作。

E-mail: hansonlei@163.com

收稿日期:2016-06-12