

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.018

# 基于室外 LID 渗透试验的绿地仿真建模及改造评估

周倩倩<sup>1</sup>, 张 茜<sup>1</sup>, 任 毅<sup>2</sup>, 李雨航<sup>1</sup>, 陈朝彬<sup>3</sup>, 王和平<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 3. 广州市自来水公司, 广东 广州 510800)

**摘 要:** 采用大型室外低影响开发(LID)渗透试验床和人工降雨装置进行绿地地表构型的试验研究,测定不同降雨情景下绿地不同地表构型指标对应的雨水下渗量和径流外排量。试验得出符合广东地区降雨条件和土壤类型的最佳绿地地表构型,并依据试验结果,在暴雨洪水管理模型(SWMM)中构建对应的 LID 仿真模块,为绿地地表构型的优化和评估提供合理参数设置。改造案例研究发现,绿地地表构型的改良可以减少城市排水系统的溢流量。该项目结合室外试验与仿真建模的研究成果,以为广东地区海绵城市低影响开发措施的大规模规划、布设和评估改造提供科学依据。

**关键词:** 绿地改造; 暴雨洪水管理模型; 地表构型; 径流控制; 海绵城市

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0109-05

## Simulation Modeling and Reconstruction Evaluation of Green Land Based on Outdoor Low Impact Development Infiltration Test

ZHOU Qian-qian<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>, REN Yi<sup>2</sup>, LI Yu-hang<sup>1</sup>, CHEN Chao-bin<sup>3</sup>,  
WANG He-ping<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co. Ltd., Guangzhou 510610, China; 3. Guangzhou Water Supply Company, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** Surface configuration of green land was tested by using a large-scale outdoor low impact development (LID) infiltration bed and an artificial rainfall device. Infiltration and runoff volumes of different green land surface configuration indices under different rainfall scenarios were measured. The optimal surface configuration of green land was obtained by the experiment which met the rainfall conditions and soil types in Guangdong. According to the test results, the corresponding LID simulation module was constructed in storm water management model (SWMM) to provide reasonable parameter settings for optimization and evaluation of green land configuration. The case study showed that the improvement of green land surface configuration could reduce the overflow of urban drainage system. The project combined the research results of outdoor experiment and simulation modeling, and it could provide a scientific basis for large-scale planning, layout and evaluation of LID measures in sponge city construction in Guangdong.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51809049); 广州市科技计划项目(201804010406); 广东省公益研究与能力建设基金资助项目(2017A020219003); 广东省水利科技创新项目(2017-10)

**Key words:** green land reconstruction; storm water management model (SWMM); surface configuration; runoff control; sponge city

随着城市经济的快速发展以及城镇化进程的持续推进,城市下垫面不透水率增加,我国洪涝灾害、径流污染等雨水控制与管理的相关问题日益严重<sup>[1]</sup>,传统管网应对能力有限,因而国内许多城市开始提出转型新思路,将雨洪蓄渗工程技术与城市绿地景观改造相结合,以实现径流控制的目的<sup>[2]</sup>。绿地系统是城市最常见的用地类型之一,是海绵城市体系的主要载体<sup>[3]</sup>。现有绿地大多为坡式构型,当降雨量较大时,其自身蓄水能力不足,径流容易快速聚积,加上大量雨洪调蓄空间被占,导致内涝频发。改良式绿地预期可有效降低暴雨径流的流速和流量,延长滞留时间,在满足基本的游憩娱乐、生态防护和环境美化等要求的同时,还可使绿地对雨水呈现出海绵特性,在快速发展的城市中吸纳、截流和调控雨水径流,对解决目前城市内涝问题具有重要的现实意义和广泛的应用前景。笔者对绿地进行科学合理的改良设计,将坡式绿地与下凹式绿地相结合,利用下凹空间快速蓄积并缓慢释放暴雨径流,提供一套反映绿地构型与渗透系数、径流系数之间关系的技术参数标准。利用大型室外低影响开发(LID)渗透试验床和人工降雨装置,以改良式绿地为研究对象,基于已开发的SWMM-LID植草沟模块,结合系统性试验和计算机仿真建模<sup>[4-5]</sup>,获取影响绿地下渗的关键构型参数和物理过程。通过对水量平衡、水文效能和径流蓄渗过程等方程进行优化描述,使其适用于广东地区典型土壤条件下改良式绿地的精准化模拟<sup>[6]</sup>。在示范区已构建的城市排水管网模型中,增加此LID植草沟模块,评价城市绿地改良前后应对雨洪风险的能力,以期在广东地区海绵城市大规模、大尺度的绿地布设和建造方案提供科学参考和评估工具<sup>[7]</sup>。

## 1 试验方法

本研究采用大型分仓式LID模拟渗透试验床进行人工降雨试验,该试验床是华南地区少数可用于室外海绵城市技术测试的大型模拟演示装置。通过设置多组不同构型绿地的对比试验,测试不同绿地构型条件下的雨水下渗量和径流外排量,并记录相应的径流过程,探究径流总量的控制效果。具体试验装置如图1所示,图1(a)为大型分仓式LID模拟

渗透试验床和人工降雨装置的整体结构俯视图,一共分为15个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的格子,上部平行布置两组降雨喷头,喷头高度为9 m,试验时自上而下均匀降雨,均匀性达到85%,用于模拟自然状态下的降雨;图1(b)为改良式绿地构造示意图,凸起部分模拟自然状态下绿地的坡度(用突起高度定量描述),下凹部分模拟下凹式绿地的改造(用下凹深度定量描述);图1(c)为绿地构型近视图,从图中可以看到地表构型起伏,量筒用来校核实际雨量。供试土壤经测定,其黏粒含量为38.41%,粉粒含量为39.74%,砂粒含量为21.85%,属于广东地区典型的黏壤土。

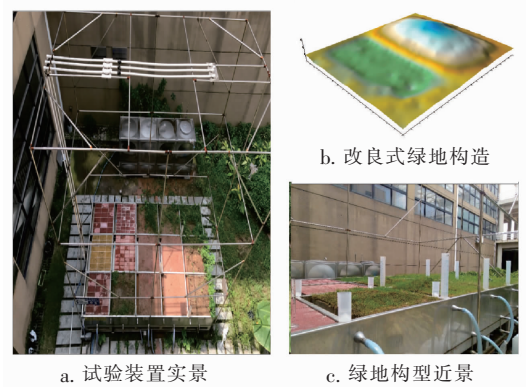


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

## 2 SWMM 模型构建

### 2.1 LID 植草沟模型

本研究采用暴雨洪水管理模型(SWMM)中的植草沟模块对试验设置的改良式绿地构型进行模拟。植草沟是一个可用于绿地模拟的典型LID模块,上部坡面有植被覆盖,下部为地表浅沟,缓慢向下输送收集到的雨水径流。LID控制通过竖向属性层(土壤表层、土壤层和储水层)的组合表示,其水流路径如图2(a)所示。具体模块构建包含5个参数,分别是护堤高度 $H$ 、植被容积分数 $N$ 、表面粗糙系数 $n$ 、表面坡度 $I$ 和洼地边坡 $R$ [如图2(b)所示]。其中,护堤高度 $H$ 为试验中绿地下凹部分的深度;表面坡度 $I$ 为绿地凸起部分的坡度,数学上表示为突起高度 $h$ 除以凸起部分地形宽度 $M$ ;洼地边坡 $R$ 则代表下凹式绿地的断面边坡,数学上表示为洼地的长度 $L$ 除以下凹深度 $H$ 。

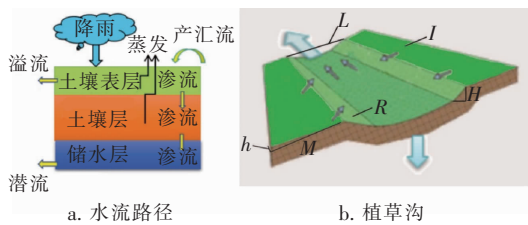


图2 LID水流路径和植草沟

Fig. 2 Water flow path and vegetative swale of LID

## 2.2 SWMM 基础参数设置

在SWMM模型中以霍顿入渗公式来表示土壤入渗状况<sup>[8]</sup>。霍顿公式在SWMM模型中由5个参数进行描述,分别是最大下渗速率 $v$ (MaxRate)、最小下渗速率 $\gamma$ (MinRate)、衰减常数 $K$ (Decay)、土壤排干时间 $T$ (DryTime)和土壤下渗容积 $V$ (MaxInf)。霍顿入渗参数的选择见表1,其中,最小下渗速率 $\gamma$ 依据试验测定结果,采用测得的土壤稳定下渗排水速率进行表示;其余参数根据SWMM用户使用手册选取范围进行参数率定得到;构建模块时表1中未提及的参数采用SWMM软件默认值。

表1 LID 模块参数选择

Tab. 1 Parameter selection of LID module

LID 参数设置		基础参数设置	
植草沟参数	参数选择标准	霍顿入渗参数	参数选取原则
护堤高度 $H$	对于草洼,它是梯形断面的高度 <sup>[9]</sup>	衰减常数 $K$	典型数值范围为 $2 \sim 7 \text{ h}^{-1}$ , 本研究中由模型率定得到
植被容积分数 $N$	由模型率定得到	最大下渗速率 $v$	根据手册取经验值
表面粗糙系数 $n$	曼宁 $n$ 值取 $0.13$ <sup>[10]</sup>	最小下渗速率 $\gamma$	等价于土壤的稳定下渗排水率 <sup>[4]</sup>
表面坡度 $I$	屋面、路面或者草洼的坡度 <sup>[9]</sup>	最大下渗容积 $V$	根据手册取 0
洼地边坡 $R$	草洼断面边坡(长度 $L$ 与下凹深度 $H$ 之比) <sup>[10]</sup>	排干时间 $T$	典型数值范围为 $2 \sim 14 \text{ d}$ , 本研究中由模型率定得到

## 3 测试结果与仿真建模分析

在不同降雨情景下进行LID渗透试验测试,得到不同改良式绿地构型条件下的稳定径流强度,如图3所示。其中,a、b、c、d对应的下凹深度分别为0.03、0.06、0.09、0.12 m,凸起绿地高度均为0.12 m,代表地表凹凸比为25%、50%、75%、100%的地形构造。测试表明,4种地形构造的稳定径流强度均随着降雨量的增大而不断增大,当凹凸比为100%时,改良式绿地稳定径流强度随降雨强度的变

化始终最小,说明其径流控制效果最好。在上述最佳绿地改造情景下,根据广东地区已有的暴雨重现期资料,试验中设置1年一遇暴雨重现期(55 mm/h)时的稳定下渗强度为30 mm/h,由此确定搭建SWMM模型的参数。根据表1的参数选取原则,结合试验结果进行SWMM建模分析,经过多次参数率定,使SWMM模拟下渗曲线与实测下渗曲线形状基本一致,见图4。具体参数选取结果如下: $H=120 \text{ mm}$ ,  $N=0.0005$ ,  $n=0.13$ ,  $I=26.7\%$ ,  $R=3.75$ ;  $v=50.8 \text{ mm/h}$ ,  $\gamma=30 \text{ mm/h}$ ,  $K=3 \text{ h}^{-1}$ ,  $T=5 \text{ d}$ ,  $V=0$ 。

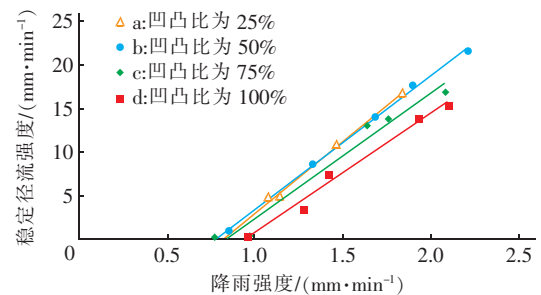


图3 稳定径流强度随降雨强度变化的关系

Fig. 3 Relationship between stable runoff and rainfall intensity

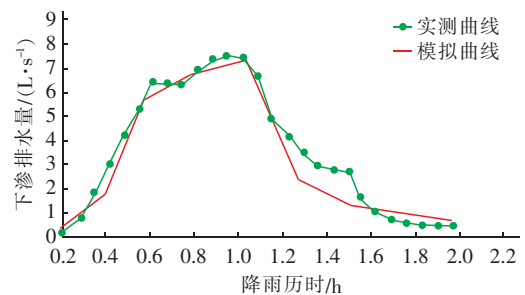


图4 模拟与实测下渗曲线对比

Fig. 4 Comparison of measured and simulated infiltration curves

## 4 示范区改造及评估

以广东省Z市的实际案例作为示范性工程,探究改良式绿地对降雨径流的调控能力,以期进一步优化设计方法和计算模型,提高绿地建设的科学性和准确度。研究区域位于广东省中南部,地处珠江出海口,属亚热带季风气候区域,其改造总面积为132 hm<sup>2</sup>。研究区域被划分为2个排水分区,共55个子汇水区、57个节点、57段管渠。研究区域的用地类型如图5所示,分为建筑、路网、绿地、行政办公、住宅、商住、交通设施这7类。结合城市总体规划,采用雨污分流系统,按照多点分散、就近排放的原则,借助ArcGIS(地理信息系统)和SWMM构建



城市排水管网模型。

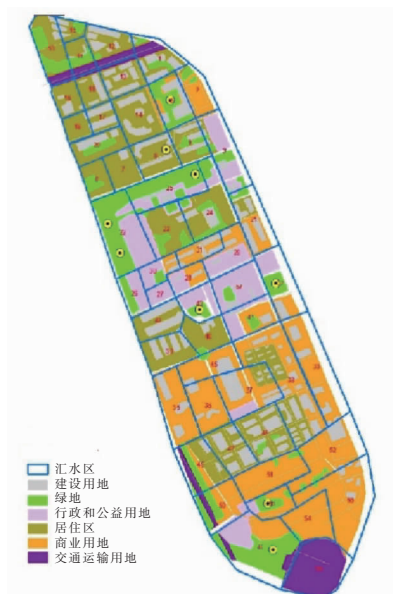


图5 研究区域的用地类型

Fig.5 Land type of study area

研究区域改造前后的排水管网溢流情况如图6所示。

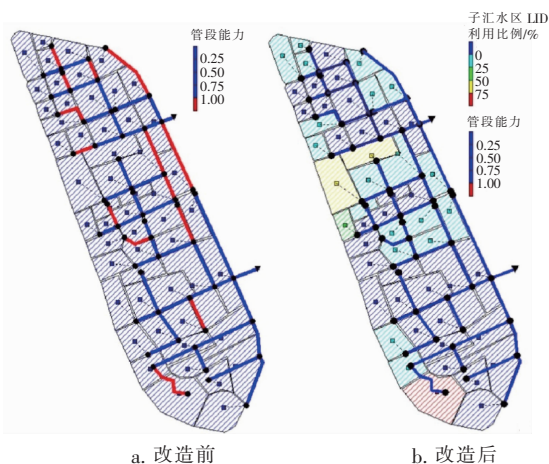


图6 研究区域改造前后的管网溢流情况

Fig.6 Pipe network overflow situation of study area before and after renovation

由图6(a)可知,在5年一遇的降雨情景下,原系统共有38个节点的水位发生超载,产生溢流现象(管线标红部分)。对原城市排水模型进行改造,根据研究区域的地域条件和用地类型有针对性地布设植草沟模块,并采用改良后的土壤入渗系数对模型进行修正。由图6(b)可知,同样在5年一遇的降雨情景下,改造后管段溢流情况已全部得到有效控制,未出现水位超载节点,这说明改变绿地构型能够有效

效改善该区域的内涝情况。因此,将试验测试与仿真模型进行结合,可以提高仿真模拟的准确性和可实施性,为大规模海绵城市建设的低影响开发提供科学支持。

## 5 结论

① 以绿地为研究对象,结合水量平衡理论和绿地试验模型,研究绿地地形起伏变化时地表径流及其下渗过程的变化规律,分析不同构型下的绿地对径流总量的控制效果。根据LID渗透试验床和人工降雨系统测试结果,对传统绿地进行坡式和下凹式改造,可以延长径流下渗路径,同时收集部分雨水,达到有效控制径流的目的。

② 将试验结果运用到计算机仿真技术并进行参数率定,使基于LID理念构建的模型更加精准地适用于试验条件的水文评估。基于试验搭建的LID模块,对研究区域的城市排水管网模型进行改造,验证得到改良后研究区域的雨洪应对能力明显优于原系统,说明改变绿地构型能够有效改善该区域的内涝情况。

③ 此试验结果与分析方法可以为城市绿地在不同空间尺度、下垫面条件和雨洪情景下的推广提供科学支持,从而实现城市水资源的综合利用,为广东地区大规模海绵城市建设做出贡献。

## 参考文献:

- [1] 王英达,李洵. 城市绿道建设中的雨水调蓄设计[J]. 市政技术,2015,33(6):115-117.  
Wang Yingda, Li Xun. Rainwater storage design of urban greenway construction [J]. Municipal Engineering Technology, 2015, 33(6): 115-117 (in Chinese).
- [2] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等. 基于PCSWMM模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究[J]. 南方建筑,2017(3):38-45.  
Huang Guoru, Mai Yeping, Li Biqi, et al. Study on hydrological effect of typical community sponge transformation based on PCSWMM in Guangzhou [J]. South Architecture, 2017(3): 38-45 (in Chinese).
- [3] 武云甫,任晓燕,章慧慧. 城市宜大力规划建设下凹式绿地[J]. 给水排水,2001,27(10):67.  
Wu Yunfu, Ren Xiaoyan, Zhang Huihui. Concave green surface in urban area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(10): 67 (in Chinese).
- [4] 郭凤,陈建刚,杨军,等. SWMM模拟植草沟功能的参

- 数敏感性分析[J]. 中国给水排水,2016,32(9):131-134,139.
- Guo Feng, Chen Jiangang, Yang Jun, *et al.* Parameter sensitivity analysis of SWMM model for simulation of grass swales[J]. China Water and Wastewater,2016,32(9):131-134,139(in Chinese).
- [5] Zhou Q, Mikkelsen P S, Halsnæs K, *et al.* Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits[J]. J Hydrol,2012,414/415:539-549.
- [6] 梅胜,许苗苗,周倩倩. 城市化对排水系统的影响及自适应改造研究[J]. 中国给水排水,2016,32(21):147-151.
- Mei Sheng, Xu Miaomiao, Zhou Qianqian. Impact of urbanization on urban drainage systems and adaptation measures[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21):147-151(in Chinese).
- [7] 戴矜君,程金花,张洪江,等. 植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J]. 水土保持学报,2016,30(2):44-49.
- Dai Jinjun, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, *et al.* The changing law of overland flow resistance under vegetation covers[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(2):44-49(in Chinese).
- [8] 陈晓燕,张娜,吴芳芳,等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水,2013,29(4):4-7.
- Chen Xiaoyan, Zhang Na, Wu Fangfang, *et al.* Stormwater management model (SWMM):principles, parameters and applications [J]. China Water & Wastewater,2013,29(4):4-7(in Chinese).
- [9] 张胜杰,宫永伟,李俊奇. 暴雨管理模型 SWMM 水文参数的敏感性分析案例研究[J]. 北京建筑工程学院学报,2012,28(1):45-48.
- Zhang Shengjie, Gong Yongwei, Li Junqi. Case study of hydrological parameters sensitivity analysis using SWMM [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2012,28(1):45-48(in Chinese).
- [10] Sieber A, Uhlenbrook S. Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure [J]. J Hydrol,2005,310(1):216-235.



作者简介:周倩倩(1984- ),女,浙江乐清人,博士,副教授,研究方向为市政排水。

E-mail:qiaz@foxmail.com

收稿日期:2019-10-14

