

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.016

## 低影响开发设施的调蓄池代用模型研究

林进昌<sup>1</sup>, 李江云<sup>1</sup>, 吕建新<sup>2</sup>, 赵晓灵<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中山市水利水电勘测设计咨询有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** 低影响开发(LID)模型因模拟所需参数较多,工程中一般难以实现。为此,依据主要流量关系相似原理提出 LID 的调蓄池代用模型对排水系统进行概化,在较高精度下实现排水区的雨洪模拟;其次,模拟获得的调蓄容积及出水孔直径,可为 LID 设施的工程效果提供评价依据。为验证 LID 设施概化为调蓄池的实际效果,选用了 3 种典型 LID 设施进行 LID 调蓄能力的等效性实验。针对植草沟、渗透铺装以及雨水花园,分别采用坡度为 1%、3%、5% 和重现期为 1 年、5 年、10 年进行交叉实验,纳什效率系数均在 0.75 以上,均值为 0.9,说明采用调蓄池模型替代 LID 模型进行雨洪模拟是可行的,并给出了评价示例。对于其他未涉及的 LID 设施类型,其调蓄及径流过程在本质上与调蓄池模型相似,因此同样可根据其入流和出流特征概化为调蓄池模型进行模拟,LID 代用模型理论及 LID 设施工程评价方法具有普遍意义。

**关键词:** 低影响开发(LID)设施; LID 的调蓄池代用模型; 概化; 评价方法

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0094-07

## Detention Tank Substitute Model for Low Impact Development Facilities

LIN Jin-chang<sup>1</sup>, LI Jiang-yun<sup>1</sup>, LÜ Jian-xin<sup>2</sup>, ZHAO Xiao-ling<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Zhongshan Water Conservancy and Hydropower Surveying Designing and Consulting Co. Ltd., Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** Low impact development (LID) models are generally difficult to implement in engineering due to the large number of parameters required for simulation. Based on the similarity of main flow relationship, the detention tank substitute model for LID facilities was proposed to generalize the drainage system and simulate stormwater in the drainage area with high precision. Detention volume and outlet hole diameter were obtained by simulation, which could be used to evaluate the performance of LID facilities. In order to verify the actual performance of LID facilities generalized into the detention tank, three kinds of typical LID facilities were selected to conduct the equivalent experiment of LID detention capacity, including vegetative swale, permeable pavement and rainwater garden. Cross experiments were carried out with slopes of 1%, 3%, 5% and return periods of 1 year, 5 years, and 10 years, respectively. Nash-Sutcliffe efficiency coefficients were all above 0.75 and the mean value was 0.9,

indicating that it was feasible to replace LID model for stormwater simulation by detention tank model. In addition, evaluation examples were given. For other types of LID facilities not involved, the detention and runoff processes were similar to the detention tank in nature. Therefore, it was also possible to generalize the characteristics of inflow and outflow into the detention tank model for simulation, and LID substitute model theory and LID facility engineering evaluation method are universal.

**Key words:** low impact development (LID) facility; detention tank substitute model for LID facilities; generalization; evaluation method

基于模型仿真的城市雨洪系统规划设计及运行管理是目前海绵城市建设发展到一定阶段的主要方法和途径,其目的一般分为城市雨洪现状评估及以低影响开发(LID)为理念的海绵城市建设改造方案,如何在资料收集困难甚至缺失的情况下利用现有的工程经验及现象较准确且高效地模拟城市降雨径流过程、选取雨水设施组合方式及量化海绵城市建设标准是亟待解决的问题。LID技术主要包括绿色屋顶、透水铺装、植草沟、下凹绿地、生物滞留池等,其所在的排水区内部资料往往缺失,即便资料齐备,也往往因数据量太大,导致直接针对流域规模的精细化模拟受到计算机软、硬件的限制,如SWMM软件对单个子汇水区的输入参数就多达17个。考虑到LID对水量的控制本质是调蓄作用,在主要流量关系上与一定参数的调蓄池具有相似的原理,主要体现在具有一定高度孔口的调蓄池同样起到错峰滞流的效果,可利用调蓄池孔口出流模拟LID径流,且调蓄池的参数更少。因此,为提高模拟效率,提出采用调蓄池代用模型的方式对排水系统进行总体概化,以完成面积较大的排水区整体模拟。此外,概化参数亦可作为评价指标,实现参数与指标一体化,亦可提高评价效率。

目前根据调蓄池的削峰、滞流及出流原理,用以替代原理相似的工程措施(如LID)的研究十分缺乏,但前人对入渗和普通调蓄池模型的研究<sup>[1-3]</sup>可作为代用模型研究的基础。蒋颖龄<sup>[4]</sup>针对中山市某小区在SWMM模拟的基础上初步探索了LID调蓄池概化模型的可行性,但缺乏实验验证、模型数据和计算方法的支持。笔者则从模型实验研究的角度,探究将LID概化为调蓄池的实际效果,并对代用模型设计理论进行阐述及使用方法的基础研究。

## 1 调蓄池概化模型设计

### 1.1 基本原理

根据实验所得LID流量的变化规律,建立LID

调蓄池数学模型。依据连续性方程有:

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式中: $Q_{in}$ 为入流流量; $Q_{out}$ 为出流流量; $dV$ 为调蓄池在 $dt$ 内的蓄水量变化值。

对于每一时段,都可用前一时段 $t$ 结束时所对应的值来推求后一时段 $(t + \Delta t)$ 结束时所对应的值,为方便进行迭代计算,把式(1)表示为有限差分格式,并且分离未知量,整理后可得<sup>[2]</sup>:

$$\left(\frac{V}{\Delta t} + \frac{Q_{out}}{2}\right)_{t+\Delta t} = \left(\frac{V}{\Delta t} + \frac{Q_{out}}{2}\right)_t - Q_{out,t} + \frac{\Delta Q_{in}}{2} \quad (2)$$

$Q_{in}$ 已知,等号右边的 $(V/\Delta t + Q_{out}/2)$ 项假设在演进开始(即 $t=0$ )已知,则其余各个时刻 $(V/\Delta t + Q_{out}/2)_t$ 项将依照上式,通过迭代依次确定。

出流流量 $Q_{out}$ 的变化情况依赖于孔口直径 $D$ 的确定。孔口直径确定后,出流流量为水深 $h$ 的函数。而给定底面积 $A$ ,调蓄池内的蓄水量也可表示为水深 $h$ 的函数。于是 $(V/\Delta t + Q_{out}/2)$ 也是水深 $h$ 的函数。所以可建立 $(V/\Delta t + Q_{out}/2)$ 与 $Q_{out}$ 的函数关系曲线,从而求解 $Q_{out}$ 。

### 1.2 调蓄池容积的确定

#### 1.2.1 LID模型调蓄容积

如图1所示,在给定底面积的情况下,LID模型调蓄容积取决于孔口的高度位置 $H$ ( $H$ 为调蓄池模型的LID调蓄深度, $H=0$ 时为无LID设施情况)。现以出流时间 $t_1$ 作为界限,在 $t_1$ 时刻之前的时间段内,入流的水量 $V_t$ 全部保留在调蓄池底部,将这部分体积定义为LID模型调蓄容积。由质量守恒可知, $V_t$ 包括了 $t_1$ 时刻之前降雨落到地面前面的各种截留作用消耗、落到地面后的土壤下渗量和持水量,以及产流时对洼地和溢流高度的填充水量。需要说明的是,针对底部无盲管出口的LID设施(如本实验中设计的植草沟),其外排下渗流量无法通过排水

管送出去,但降雨足够大的情况下,依旧会有径流外排,此时,调蓄池孔口流量可模拟这部分外排流量,因此,对于底部有无盲管的 LID 设施,均可用调蓄池替代其调蓄及径流外排功能。所以,LID 的储存体积在实验中根据入流流量、产流时间可以确定。值得注意的是,图 1 所示调蓄池代用模型仅保留调蓄池蓄满前的调蓄和削峰特性,没有对溢流特征加以描述。当水位漫过池顶,调蓄和下渗作用消失,相当于所替代的 LID 措施失效的情况,此时,软件按地面漫流特征进行 LID 失效情况下的模拟。因此,图 1 所示调蓄池可不考虑溢流情况。

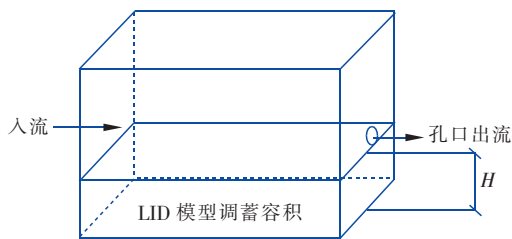


图 1 调蓄池代用模型结构

Fig. 1 Construction of detention tank substitute model

在这里,没有必要描述代用模型的实际形状,在底面积一定的条件下,体积是水位的函数。所以当给定一个底面积  $A$  时,即可由 LID 模型调蓄容积  $V_i$  得到孔口的高度  $H$ 。这里为使  $H$  变化更明显,底面积  $A$  取值宜小不宜大。

### 1.2.2 调蓄池总容积 $V$

调蓄池总容积  $V$  的确定取决于入流过程线和出流过程线。在流量-时间图中,前期一段时间  $t_2$  内,入流流量曲线在出流流量曲线上方,此时调蓄池内水位不断上升直到最大高度  $H_{\max}$ 。当  $t > t_2$  时,出流曲线在入流曲线上方,水位开始下降,因此  $t_2$  时调蓄池水量最大,取该值为调蓄池总容积  $V$ ,则:

$$V = A \times H_{\max} \quad (3)$$

### 1.3 流量计算

调蓄池内流量的变化体现在雨水经入口流入调蓄池的流量  $Q_{\text{in}}$  与池内水量达到排口高度  $h_{\text{out}}$  从而外排的流量  $Q_{\text{out}}$  两者间的关系。在调蓄池底面积一定的情况下,池内水量变化体现为池内水深的变化,即  $H(t)$ 。 $Q_{\text{in}}(t)$  为降雨模型的流量时间序列,本研究选用深圳暴雨强度公式:

$$i = \frac{8.701(1 + 0.594 \lg P)}{(t + 11.13)^{0.555}} \quad (4)$$

式中: $i$  为平均暴雨强度,  $\text{mm}/\text{min}$ ;  $P$  为设计降雨重现期,  $a$ ;  $t$  为暴雨历时,  $\text{min}$ 。采用芝加哥雨型拟合降雨过程,峰值系数  $r$  取 0.417,降雨历时取 2 h。

$Q_{\text{out}}(t)$  则取决于调蓄池内水深情况及孔口的几何特征。如图 2 所示,调蓄池中的流量控制主要依靠其右上部排出口来完成。当水流淹没孔口时:

$$Q_{\text{out}} = C_d A_0 \sqrt{2gH_e} \quad (5)$$

式中: $C_d$  为孔口流量系数,取 0.6;  $A_0$  为孔口面积,  $\text{m}^2$ 。

当孔口未被充满时,借用堰流公式:

$$Q_{\text{out}} = C_w L (H_1 - Z_0)^{1.5} \quad (6)$$

式中: $C_w$  为堰流系数;  $L$  为等效堰顶长度,  $\text{m}$ ;  $Z_0$  为孔板开口底部的标高,  $\text{m}$ 。

其中,当水流刚好淹没孔口时,  $C_w L$  的计算方法如下:

$$C_w L = \frac{C_d A_0 \sqrt{g}}{\omega Y_{\text{full}}} \quad (7)$$

式中: $Y_{\text{full}}$  为淹没时水流位于孔口的高度,即为孔径,  $\text{m}$ ;  $\omega$  为孔口开度,取 1。

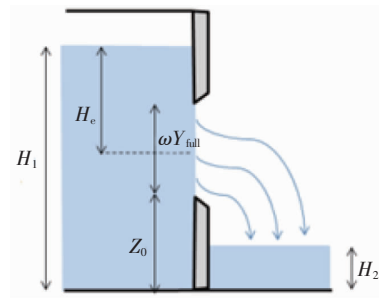


图 2 SWMM 软件中调蓄池出流模型示意

Fig. 2 Schematics of detention tank discharge model

## 1.4 调蓄池模型孔口的确定

### 1.4.1 LID 孔口位置

对于没有添加 LID 的地块,在利用调蓄池等效模拟时,通过直接在调蓄池底部设置孔口来达到与实际模拟相同的效果。

添加 LID 设施后的地块,降雨后会在 LID 设施中储存一部分径流。在调蓄池等效模拟时,通过把孔口设置在离底部一定距离的边壁上,将这部分径流储存在调蓄池中。给定底面积  $A$ ,即可得到孔口位置高度  $H = V_i/A$ 。

### 1.4.2 LID 孔口大小

根据式(6)和式(7),当水流刚好淹没孔口时,某时刻的出流流量仅为孔口直径的函数,即  $Q_{\text{out}} =$

$Q_{out}(D)$ 。孔口具体确定过程如图3所示。

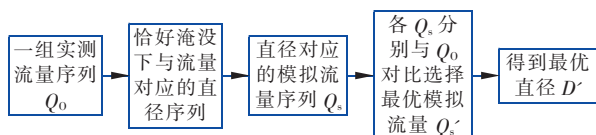


图3 孔口计算流程

Fig. 3 Calculation flow chart of orifice diameter

## 2 代用模型实验研究

为验证调蓄池概化模型的实际功能,并提供原LID模型模拟的替代方案,本研究选用3种典型LID设施进行实验,包括以转输为主的植草沟、以渗滞为主的渗透铺装以及以调蓄为主的雨水花园。实验分为LID材料滤柱实验阶段和LID与调蓄池代用模型等效实验阶段(简称模型实验)两部分。

### 2.1 材料滤柱实验

#### 2.1.1 实验装置与方法

滤柱实验阶段旨在摸清材料下渗、持水力等水力学特性,以筛选适合表征LID设施的实验材料,摸索可以进行不同LID实验的控制条件,为模型实验中LID土壤结构的设计与调节提供参考与指导。

##### ① 实验装置

滤柱实验装置如图4所示。

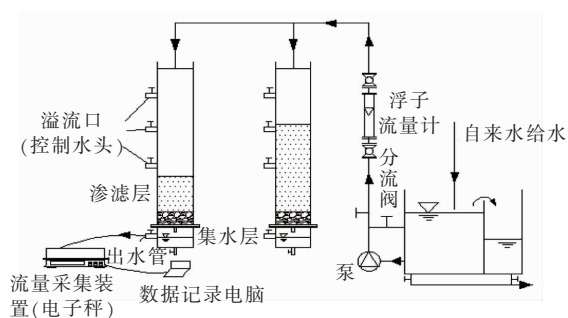


图4 材料滤柱实验装置

Fig. 4 Device of material filter column experiment

##### ② 实验方法

###### a. 测量材料的持水量

模拟自然环境,忽略表面蒸发前提下测定装置内基质持水量。首先按照各材料在LID模型中的压实程度 $I$ (按单位质量所占有的体积)来控制各材料在相同体积下的质量,装置开始运行后,根据进水实际下渗状况逐渐调节进水流量,渗滤柱表层保持湿润且溢流口无水溢出。当装置达到稳定状态时,记录自进水到开始出水渗滤柱所容纳的水量,即为该材料的持水量。

###### b. 测量材料的下渗速度

根据持水量实验,筛选出具有一定条件符合LID结构层性能的材料进行下渗实验。渗滤柱横截直径为10 cm,控制每种材料厚度为12 cm,采用和持水量实验相同的压实程度。该实验采用定水头法(8 cm, 1 cm = 98 Pa)测定渗滤柱基质的渗透速度。

实验自开始布水持续运行,采用溢流堰控制恒定水位,在渗滤柱末端出水口采用电子秤流量计测定出水速度,设置记录仪器每隔3 s记录一次出水总量,得到出水量和时间( $T-V$ )的关系图,不同材料滤速在不同水头下随时间的变化关系( $T-Q$ )。渗滤柱出水速度在 $T$ 时刻为定值,说明土壤入渗已经达到稳定,对 $T$ 以后的读数取平均值,即为各材料的稳渗率。

该阶段对黏性混合土、鲜花泥、蛭石、种植土和石英砂等多种材料进行实验,以鲜花泥为例,其下渗过程如图5所示。

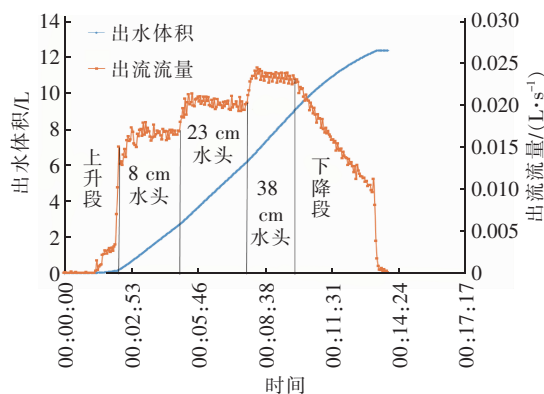


图5 鲜花泥下渗过程的 $T-V$ 、 $T-Q$ 关系曲线

Fig. 5  $T-V$  and  $T-Q$  relationship graph of infiltration process in flower mud

###### 2.1.2 实验结果及分析

实验测得不同材料的持水度如下:鲜花泥为55.0%、蛭石为42.3%、种植土为40.4%、珍珠岩为25.0%、黏性混合土为20.0%、麦饭石(粒径为2~4 mm)为14.5%、水晶砂为12.8%、火山岩为12.3%、细沙为10.6%、石英砂为10.1%、赤玉土为6.2%、绿沸石为3.9%、小陶粒为2.42%、小白石为1.1%。

根据持水度结果,选取符合条件的材料进一步测定其稳渗率,结果如下:绿沸石为0.050 L/s、水晶砂为0.048 L/s、石英砂为0.044 L/s、细沙为0.038 L/s、鲜花泥为0.017 L/s、黏性混合土为0.007 L/s。

根据测得的各材料持水度和稳渗率,同时考虑



实验过程调节相关参数以满足优化 LID 设施的需要, LID 实验结构中, 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)》(简称《指南》)

南》)中各结构层搭配, 选用与自然土相近的黏性混合土作为基质层, 其他结构层的筛选材料及其布置如表 1 所示。

表 1 LID 设施实验结构层设计

Tab. 1 Experimental structural layer design of LID facilities

| LID 设施               | 结构层    | 结构层材料   | 设计结构层厚度/cm | 《指南》取值范围/cm |
|----------------------|--------|---------|------------|-------------|
| 透水铺装<br>(高度为 40 cm)  | 透水面    | 鹅卵石     | 7          | 6 ~ 8       |
|                      | 透水面找平层 | 中砂      | 2          | 2 ~ 3       |
|                      | 透水基层   | 粒料或级配碎石 | 12         | 10 ~ 15     |
|                      | 透水底基层  | 级配砂砾或碎石 | 15         | 15 ~ 20     |
|                      | 垫层     | 中砂      | 4          | —           |
| 植草沟<br>(高度为 40 cm)   | 蓄水层    | 黏性混合土   | 10         | —           |
|                      | 溢流高度   | —       | 5          | 5 ~ 10      |
|                      | 基质层    | 黏性混合土   | 20         | —           |
|                      | 集水层    | 砂砾      | 5          | —           |
| 生物滞留池<br>(高度为 80 cm) | 蓄水层    | —       | 20         | 20 ~ 30     |
|                      | 溢流高度   | —       | 5          | 5 ~ 10      |
|                      | 基质层    | 黏性混合土   | 30         | 25 ~ 120    |
|                      | 集水层    | 砾石      | 25         | 25 ~ 30     |

## 2.2 LID 模型实验

### 2.2.1 实验装置设计

LID 模型实验装置如图 6 所示。

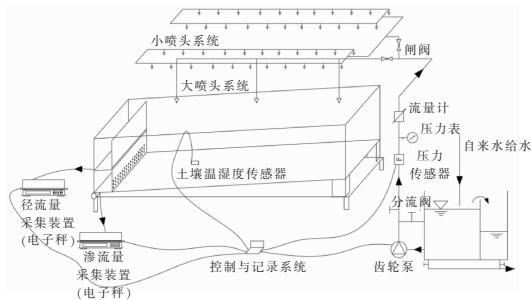


图 6 LID 模型实验装置示意

Fig. 6 Schematics of model experimental equipment

LID 模型实验装置由 LID 床、人工降雨装置以及数据采集和控制系统组成, 其中 LID 床包括底架、结构层容器 (1.4 m<sup>2</sup>)、径流收集槽和下渗收集槽, 可进行不同高度的 LID 实验和实现纵向坡的控制; 人工降雨装置包括蓄水箱、齿轮泵、雨型控制系统及大小两套喷头系统, 可实现均匀的降雨和对雨型的控制; 数据采集系统包括压力传感器、电磁流量计、电子秤、土壤温湿度传感器及自动记录系统, 实现管道压力、流量、土壤温湿度以及径流和下渗等数据的实时记录。实验时, 径流通过溢流堰溢流入上方的径流收集槽, 下渗流量通过下游的花墙流入下渗收集槽, 流量在收集槽中均通过槽底部的管道排出至

电子秤上方的容器, 用重力法测流。

### 2.2.2 实验工况设计

改变 LID 类型 (植草沟、渗透铺装、生物滞留池)、重现期 (1、5、10 a) 以及地面纵坡 (1%、3%、5%), 探究 LID 设施在不同工况下的调蓄功能。

实验由齿轮泵向人工降雨装置供水, 编程控制泵速以调节雨量大小, 出流数据通过电子秤按步长读取并由计算机储存, 再根据  $Q = \Delta V / \Delta t$  即可计算出步长内的平均流量。其中, 根据实验情况选择电子秤及齿轮泵相关参数如下: 电子秤型号为 ACS-30-AWT, 量程为 30 kg, 分度值为 10 g, 工作温度为 10 ~ 40 ℃; 齿轮泵型号为 MG 317/DC24W, 额定压力为 5 bar (500 kPa), 流量为 0.8 ~ 6 L/min, 工作温度为 -10 ~ 50 ℃, 流体黏度为 0 ~ 3 000 mPa · s。

## 2.3 代用模型概化及 LID 评价指标

### 2.3.1 实验结果及代用分析

不同 LID 在不同工况下的径流实测值与代用模型模拟的径流过程对比情况如图 7 所示 (以坡度为 5% 的植草沟和雨水花园为例)。在前期过程中, 植草沟和渗透铺装的模拟曲线均略大于实测值, 这是因为调蓄池代用模型只考虑前期下渗能力较大时的下渗损失, 而实际土壤在出流后仍然保有一定的下渗能力, 土壤可以继续持水从而削减一部分出流。而在后期, 由于土壤达到饱和, 下渗能力逐渐减弱, 代用模型模拟值与实测值趋于一致。在雨水花园

中,其出流类型是底部的下渗出流,当有出流量时,土壤已经达到了最大持水度,故无上述下渗损失。值得注意的是,雨水花园实验的后期,由于重力作

用,原先含在土中的水分开始有部分“释水”,这在代用模型中是固定包含在 LID 储存容积中的水流,故实测值此时会略大于模拟值。

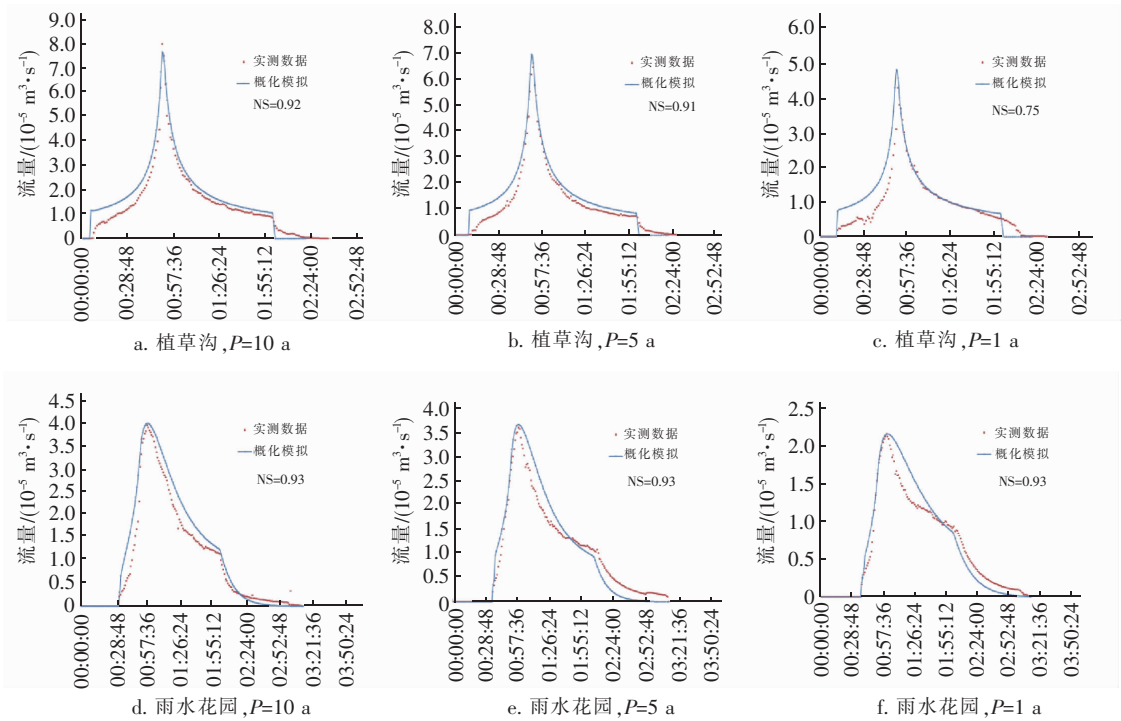


图 7 植草沟、雨水花园的径流过程实测值与代用模型模拟值对比

Fig. 7 Comparison of runoff process between experiment and substitute model of vegetative swale and rain garden

由以上概化结果可以看出,利用调蓄池代用模型对植草沟、渗透铺装、雨水花园等 LID 设施在不同工况下的等效程度均较高,纳什效率系数(NS)均在 0.75 以上,均值为 0.9,以上误差在工程研究的接受范围内,在模型实验层面上证明了调蓄池模型替代 LID 设施来分析流量关系是可行的。对于其他未涉及的 LID 类型,由于其水量变化原理和过程相同,故同样可以根据其入流和出流特征概化为调蓄池模型

加以评价,因此 LID 的调蓄池代用模型理论具有一定普适性。

2.3.2 LID 的调蓄池代用模型评价

依据调蓄池模型的流量变化原理,选择调蓄池模型的调蓄容积和孔口直径作为对其评价的指标,间接对被概化的 LID 设施进行评价。表 2 为上述方法计算所得的 LID 设施在不同工况下的调蓄池概化模型的调蓄容积和孔口直径。

表 2 LID 调蓄池代用模型的调蓄容积和孔口直径

Tab. 2 Storage volume and orifice diameter of detention tank substitute model for LID facilities

| 项 目       |       | 植草沟   |       |        | 渗透铺装  |       |        | 生物滞留池 |       |        |
|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
|           |       | P=1 a | P=5 a | P=10 a | P=1 a | P=5 a | P=10 a | P=1 a | P=5 a | P=10 a |
| 模型调蓄容积/L  | 坡度=1% | 15.66 | 16.28 | 17.38  | 16.39 | 20.69 | 22.28  | 21.78 | 24.80 | 27.92  |
|           | 坡度=3% | 8.84  | 11.01 | 5.36   | 15.66 | 17.96 | 20.25  | 21.78 | 24.80 | 27.92  |
|           | 坡度=5% | 4.33  | 4.24  | 3.96   | 13.60 | 17.11 | 18.31  | 20.86 | 24.80 | 27.92  |
| 模型孔口直径/mm | 坡度=1% | 90    | 120   | 210    | 136   | 100   | 153    | 4.0   | 4.8   | 4.9    |
|           | 坡度=3% | 290   | 250   | 260    | 137   | 141   | 152    | 4.2   | 4.8   | 4.9    |
|           | 坡度=5% | 340   | 360   | 370    | 140   | 148   | 163    | 4.1   | 4.9   | 4.9    |

由表 2 可见:①除了对坡度不敏感的雨水花园外<sup>[5]</sup>,相同重现期下,随着坡度的增大,LID 调蓄容

积变小,孔口直径增大。原因是坡度增大使雨水还未及时下渗就产生径流,出流量增加,出流时间缩

短。②不同 LID 设施在相同坡度下,下垫面未饱和时,重现期越大,其代用模型 LID 的储存容积就越大,孔口直径越大。原因是重现期的加大使得下渗速率和滞留水量增大,同时每种 LID 设施的下渗功能有一定限度,在来不及下渗情况下重现期增大,势必会引起出流量的增大。③对于不同 LID 设施,相同工况下,其调蓄能力为雨水花园>渗透铺装>植草沟,其错峰能力为雨水花园>植草沟>渗透铺装。

综上,模型的调蓄容积越大,对应 LID 的调蓄量就越大,同时出流时间越延后,其反映了 LID 的流量控制效果;其次,模型孔口直径的大小影响着出流过程,孔口越小,出流量越小,峰值越靠后,出流时间越长,出流曲线越平缓,因此孔口直径反映了削峰和错峰效果。

### 3 结论

① 对 3 种 LID 设施在不同重现期及下垫面坡度下的出流特性进行了测试,出流曲线与特定参数的调蓄池模型吻合度较高,平均纳什效率系数为 0.9,说明利用调蓄池代用模型代替具体的 LID 设施进行模拟是可行的。同时,也通过实验表明了该理论对有无底部盲管的 LID 设施均适用。

② 提出了可反映 LID 设施有效性的 2 个指标,即模型调蓄容积(在一定底面积下意义等同于孔口高度)、出流孔直径。典型降雨条件下,出流孔直径越小,出流曲线越平缓,LID 的调蓄削峰效果越好;调蓄体积越大,LID 的调蓄效果越好,即出现外排时间越滞后。因此,调蓄池代用模型的关键参数可较全面地反映 LID 的径流控制效果,可为 LID 措施的优化设计提供便利,为海绵城市建设的验收提供新标准。

③ 在相同降雨条件及下垫面特征下,LID 的调蓄能力为:雨水花园>渗透铺装>植草沟;错峰能力为:雨水花园>植草沟>渗透铺装。

④ 在后期实验中,将对上述 LID 组合设施的搭配规律进行进一步研究,同时对不同排水区尺度上的模拟情况进行量化研究,以提高本研究成果的工程实用价值,更好地指导工程应用。

### 参考文献:

- [1] 张勤,陈思飘,蔡松柏,等. LID 措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. 中国给水排水,2018,34(9): 134-138.

Zhang Qin, Chen Siyao, Cai Songbai, et al. Simulation of LID measures combined with stormwater detention tank [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 134-138 (in Chinese).

- [2] 王兆亮. 雨水调蓄池理论技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
Wang Zhaoliang. Study on the Theory and Technology of Rainwater Storage Tank [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [3] 左伟. 考虑调蓄池入渗特征的洪峰调节模型及其对海绵城市建设的影响研究[J]. 重庆建筑,2018,17(7): 5-9.  
Zuo Wei. Flood crest regulation model considering infiltration characteristics of storage tank and its influence on sponge city construction [J]. Chongqing Architecture, 2018, 17(7): 5-9 (in Chinese).
- [4] 蒋颖龄. 低影响开发措施的调蓄池概化模型研究[D]. 武汉:武汉大学,2019.  
Jiang Yingling. A Study on the Generalized Model of Storage Tank for Low Impact Development Measures [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (in Chinese).
- [5] 周倩倩,苏炯恒,王雁. 海绵城市建设下 LID 模拟研究综述及案例分析[J]. 广东工业大学学报,2019,36(1): 93-99.  
Zhou Qianqian, Su Jiongheng, Wang Yan. Review and case analysis of LID modeling research for sponge city construction [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2019, 36(1): 93-99 (in Chinese).



作者简介:林进昌(1995-),男,海南海口人,硕士研究生,研究方向为海绵城市建设与管网优化。

E-mail: 8466236521@qq.com

收稿日期:2020-01-16