

王建富, 郭豪, 秦祎, 等. 基于 SWMM 模型的排水分区参数率定——以迁安市为例[J]. 净水技术, 2022, 41(5): 122-130.

WANG J F, GUO H, QIN Y, et al. Parameters calibration of drainage zone based on SWMM model——Case of Qian'an City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(5): 122-130.



扫我试试?

## 基于 SWMM 模型的排水分区参数率定——以迁安市为例

王建富<sup>1</sup>, 郭豪<sup>2</sup>, 秦祎<sup>3</sup>, 张超<sup>1</sup>

(1. 北京清华同衡规划设计研究院有限公司, 北京 100083; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

**摘要** 近几年 SWMM 模型逐渐应用到建设海绵城市相关的规划设计中, 如何提高模型参数选择、率定的效率, 以提高模型的应用效果, 是重要的工作之一。文中以迁安典型片区为例, 结合设计资料、人工试验和自然降雨条件下的监测数据, 参考相关文献, 提出参数的选择和率定方法。参考模型手册和相关文献, 明确敏感性高的参数, 并确定参数的先验分布范围, 采用拉丁超立方抽样法(LHS)从中选取参数样本, 对其进行率定和验证, 确定参数的最佳取值范围和最优值。在此基础上, 进一步对 LID 措施的非结构性参数进行率定与验证, 为当地海绵城市建设提供经验, 也为我国 SWMM 模型应用提供参考和借鉴。

**关键词** SWMM 模型 拉丁超立方抽样法(LHS) 率定与验证 效率 借鉴

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)05-0122-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.05.019

## Parameters Calibration of Drainage Zone Based on SWMM Model——Case of Qian'an City

WANG Jianfu<sup>1</sup>, GUO Hao<sup>2</sup>, QIN Yi<sup>3</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>

(1. Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract** In recent years, SWMM model has been gradually applied to the planning and design related to sponge city construction. How to improve the efficiency of model parameter selection and calibration to improve the application effect of the model is one of the important tasks. Taking the typical area of Qian'an as an example, this paper put forward the method of parameter selection and calibration based on the design data, artificial test and monitoring data under natural rainfall conditions, and referring to relevant literatures. With reference to model manual and relevant literature, parameters with high sensitivity were identified and their prior distribution range was determined. Latin hypercube sampling (LHS) was used to select parameter samples, calibrate and verify them, and determine the optimal value range and optimal value of parameters. On this basis, the non-structural parameters of LID measures were calibrated and verified. It provides experience for local sponge city construction, and also provides reference for SWMM model application at home.

**Keywords** SWMM model latin hypercube sampling (LHS) calibration and verification efficiency reference

随着城市化建设的推进, 硬化下垫面不断增加, 导致降雨径流量增大, 加剧污染负荷的产生和转移,

从而产生因城市面源污染负荷增加引起的城市水体污染<sup>[1-2]</sup>。近几年, 在海绵城市建设过程中, 对城市面源污染的重视程度逐渐上升, 采用以“绿色与灰色”“地上与地下”相结合的方式分区治理面源污染, 形成“源头减排-过程控制-系统治理”的全过程治理体系, 提高面源污染治理效果<sup>[1-3]</sup>。区域现状

[收稿日期] 2021-08-12

[作者简介] 王建富(1989—), 男, 硕士, 研究方向为海绵城市、排水防涝、水环境综合治理, E-mail: 964534101@qq.com。

复杂且面积较大,须借助数学模型不断评估现状和方案效果,这增加了整体的工作难度和时间,因此,需要进一步提高数学模型的应用效率<sup>[3-5]</sup>。

目前,通过模型模拟产汇流是研究城市暴雨径流污染管理和控制的重要手段<sup>[6-7]</sup>,其对研究城市面源污染的多边性和复杂性具有一定优势<sup>[6]</sup>。国内外应用的管网模型有 SWAT 模型、SWMM 模型、InfoWorks ICM 模型等<sup>[7-9]</sup>。其中,SWMM 模型是美国环保署(EPA)开发的城市暴雨管理模型,能够模拟城市降雨,广泛应用于我国城市雨水径流污染模拟<sup>[6]</sup>。关于模型应用方面国内外已经进行了许多研究工作,其中,模型参数敏感性分析和率定是研究重点<sup>[6,9-10]</sup>。早期关于 SWMM 模型参数率定的方法较少,以人工试错法和单参数敏感性分析法为主<sup>[11-12]</sup>,主观性强且效率低,近几年随着计算机技术的发展,一系列自动寻优算法<sup>[13-14]</sup>直接被应用在产汇流模型参数识别和率定上,为避免陷入“维数灾难”<sup>[10,14]</sup>,要按参数选择和参数率定这 2 个步骤进行。

本文以迁安市海绵城市建设研究范围作为模拟对象,对 SWMM 模型的水文、水质与 LID 措施参数进行选择,通过设计资料、人工试验、模型手册等确定参数来源,并根据相关文献<sup>[14-16]</sup>确定敏感度高的参数。参考模型手册和相关文献,采用拉丁超立方抽样(LHS)选取参数样本,进行参数率定和验证,确定参数最佳取值范围和最优值<sup>[17]</sup>,提高参数率定的效率,为海绵城市建设和 SWMM 模型应用提供参考和借鉴。

## 1 研究范围概况

本次研究范围为迁安市海绵城市建设典型片区,其面积为 25.24 km<sup>2</sup>,新、老城区结合,排水体制为合流制与分流制共存,其中,合流制区域为老城区,面积为 2.6 km<sup>2</sup>,现状排水管网标准偏低,区域仅存一条排水出路(三里河),如图 1 所示。地处平原区域,地势平坦,属温带半湿润大陆性气候,雨热同期,雨季分明,降雨集中,6 月—9 月降雨量占全年降水量的 80%以上。

模型范围纳入典型片区外的老城区,整体概化为 465 个子汇水区、10 个排水分区、管网 756 段(雨、污水)、节点 705 个(雨、污水),模型搭建情况如图 2 所示。在区域出口采用流速面积法和在线流量计监测流量,并采集水样进行水质监测,布设雨量



图 1 研究范围

Fig. 1 Research Scope

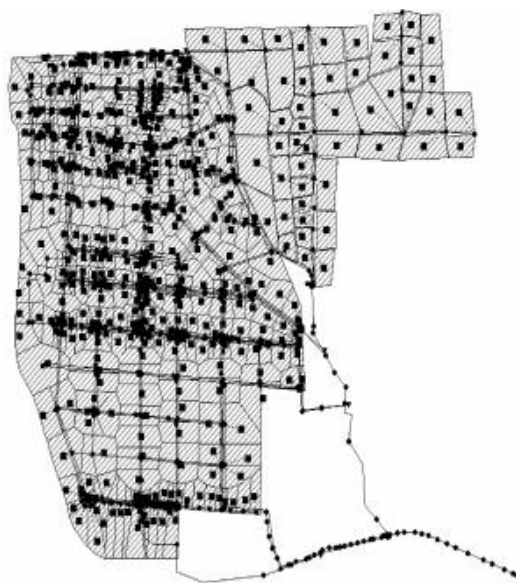


图 2 模型构建图

Fig. 2 Model Building Diagram

计记录降雨数据,设置流量监测点共 253 个,水质监测点共 122 个(包括在线 SS 监测),雨量监测点共 4 个。其中,涉及参数率定区域为排水分区 4、5、6,主要监测点(图 3)包括旱季污水流量监测点(分区 4~6 的污水井 1~4 号)、雨季监测点(分流制雨水井 5 号、合流制排口 6 号)、典型项目丽都景苑监测点 7 号。LID 设施面积为 3 201 457 m<sup>2</sup>,包括透水铺装、



图 3 参数率定区域监测布点图

Fig. 3 Monitoring Points of Parameters Calibration in the Area

下沉式绿地、生物滞留设施等。

选取 2018 年 4 月 21 和 6 月 19 日自然降雨进行水文模块参数率定和验证,降雨事件基本特征如表 1 所示,水质模块累积冲刷参数采用人工降雨试验数据进行计算和率定。

表 1 降雨事件监测的基本特征

Tab. 1 Basic Characteristics of Rainfall Events Monitoring

降雨日期	降雨量 /mm	降雨历 时/min	平均雨强 /(mm·min <sup>-1</sup> )	最大雨强 /(mm·min <sup>-1</sup> )	雨峰时 间/min
2018-04-21	40.2	891	0.05	0.2	176
2018-06-19	10.1	312	0.03	0.36	29

## 2 参数选取与率定方法

### 2.1 参数选择

水文、水质参数与 LID 模型参数,参考模型手册推荐参数范围,通过设计资料、率定验证、人工降雨试验初步获得,如表 2~表 3 所示。

### 2.2 参数率定方法

模型参数繁多,部分参数具有不确定性或概化结果不具实测意义的特征,无法直接通过测量得到,一般通过寻找一系列适合的模型参数,即优先分析参数的敏感性,并对敏感性强的参数赋值,使得模型的预测结果接近监测数据<sup>[14]</sup>。根据参数敏感性分

表 2 水文和水质模块参数来源

Tab. 2 Source of Hydrology and Water Quality Module Parameters

参数类别	参数名称和单位	数据来源
汇水区特征参数	Imperv	设计资料
	Width, m	率定验证
	S_Imperv, mm	相关文献 <sup>[4-5, 9-10]</sup>
	S_Perv, mm	
曼宁系数	Zero_Imperv	
	N_Imperv	率定验证
	N_Perv	
	N_Dry	
下渗参数	N_Wet	
	MaxRate, mm/h	人工降雨试验
	MinRate, mm/h	
累积过程参数	Decay, h <sup>-1</sup>	
	单位面积最大累积量, 0.1 g/m <sup>2</sup>	人工降雨试验、率定验证
冲刷过程参数	累积速率常数, d <sup>-1</sup>	
	冲刷系数 C <sub>1</sub>	人工降雨试验、率定验证
	冲刷指数 C <sub>2</sub>	

表 3 不同层中设施参数来源

Tab. 3 Source of Facility Parameters in Different Layers

海绵层	设施参数	模型体现	参数确定依据
表层	层高	StorHt	设计图纸
	植被覆盖比例	VegFrac	设计图纸
	坡度	Slope	设计图纸
路面层	表面曼宁系数	Rough	参数率定
	层高	Thick	设计图纸
	孔隙率	Vratio/(1+Vratio)	设计图纸
	表面不透水比	FracImp	设计图纸
土壤层	下渗速率	Perm	灵敏度分析, 参数率定
	阻碍因子	Vclog	按照实际情况, 取 0
	层高	Thick	设计图纸
	孔隙率	Por	设计图纸
	田间持水量	FC	参数率定
	凋萎点	WP	参数率定
	传导速率	Ksat	种植土数据
传导坡度	Kcoeff	参数率定	

(续表3)

海绵层	设施参数	模型体现	参数确定依据
	吸水水头	Suct	参数率定
储水层	层高	Height	设计图纸
	孔隙率	Vratio	设计图纸
	传导速率	Filt	参数率定
	阻碍因子	Vclog	按照实际情况,取0
地下排水层	排水系数	Coeff	参数率定,是否有暗管
	排水指数	Expon	参数率定
	排水偏移高度	Offset	设计图纸

析的相关文献<sup>[14-16,18]</sup>,明确对曼宁系数、污染物累积冲刷参数等敏感度高的参数进行率定。在模型参数率定过程中,参考模型手册和相关文献,明确参数的先验分布范围,从中选择不同数值,直接进行参数率定和验证,或利用人工降雨试验数据,基于 Matlab 遗传算法模块,对模型进行参数率定<sup>[15]</sup>,框架结构如图4所示。根据模型手册和文献<sup>[14-15]</sup>,若选取的参数范围值过大,参数值离散度高,难以用简单回归的方法计算<sup>[19]</sup>,因此,在参数的先验分布范围中,不断缩小取样范围,确定参数最优范围,再从中选取参数进行率定,得到参数最优值。



图4 遗传算法率定参数框架结构

Fig. 4 Framework Structures of Genetic Algorithm Calibration Parameters

研究范围是新老城区并存、合流制与分流制并存的区域,老城区现状管网陈旧、排水系统运行条件复杂,如监测数据或本底条件变化,易引起模型模拟工作量庞大、调节参数困难、推翻先验分布范围等情

况出现,因此,找到更高效率、更精准的选参方法是十分必要的。常用的参数取样法包括蒙特卡洛法、单纯的分层抽样、LHS。

LHS 是一种多维分层抽样方法,通过划分概率相等的间隔,从每个间隔中选取一个样本点<sup>[17]</sup>。其工作原理如下:(1)定义参与运行的抽样数目(N);(2)把每一次输入等概率地分为N列,把每一次输入等概率地分成N列, $X_{i0} < X_{i1} < X_{i2} < X_{i3} < \dots < X_{in} < \dots < X_{iN}$ ,且有  $P(X_{in} < X < X_{in+1}) = 1/N$ ; (3)对每一列仅抽取一个样本,各列中样本 bin 的位置是随机的。

相比蒙特卡罗模拟法的简单随机采样,LHS 产生样本的空间覆盖率更高,样本的标准差较小,更高效和精准。相对于单纯的分层抽样,LHS 的最大优势就在于任何大小的抽样数目都能容易地产生,效率更高<sup>[17]</sup>,因此,采用 LHS 选取参数。

根据监测数据,判断模型模拟结果的准确性,选定精度判别指标纳什效率系数(NSE)<sup>[11]</sup>,计算相应指标值,从而综合判断模型模拟的准确性。该指标是对结果总体误差的量化表示,不能捕捉局部的结果<sup>[6]</sup>,NSE 计算如式(1)。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (X_0^t - X_m^t)^2}{\sum_{i=1}^t (X_0^t - \bar{X}_0)^2} \quad (1)$$

其中: $X_0^t$ ——第t时刻监测流量, $m^3/s$ ;  
 $X_m^t$ ——第t时刻模拟流量, $m^3/s$ ;  
 $\bar{X}_0$ ——监测流量的平均值, $m^3/s$ ;  
 $\bar{X}_m$ ——模拟流量的平均值, $m^3/s$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 参数率定与验证

搭建完整的产汇流模型,分别对水文、水质、LID措施参数进行率定与验证,技术路线如图5所示。

##### 3.1.1 水文模块参数

###### (1) 旱季率定

研究范围内涉及合流制区域,因此,需要对旱季污水管网曼宁系数  $N\_Dry$  进行率定与验证。考虑数据获取难易度,采用2017年11月28日—2017年12月4日流量数据,涉及3个片区(图6),覆盖部分城区。参考模型手册确定管材  $N\_Dry$  的先验分布为0.010~0.020,采用LHS法从中取样1000次,同

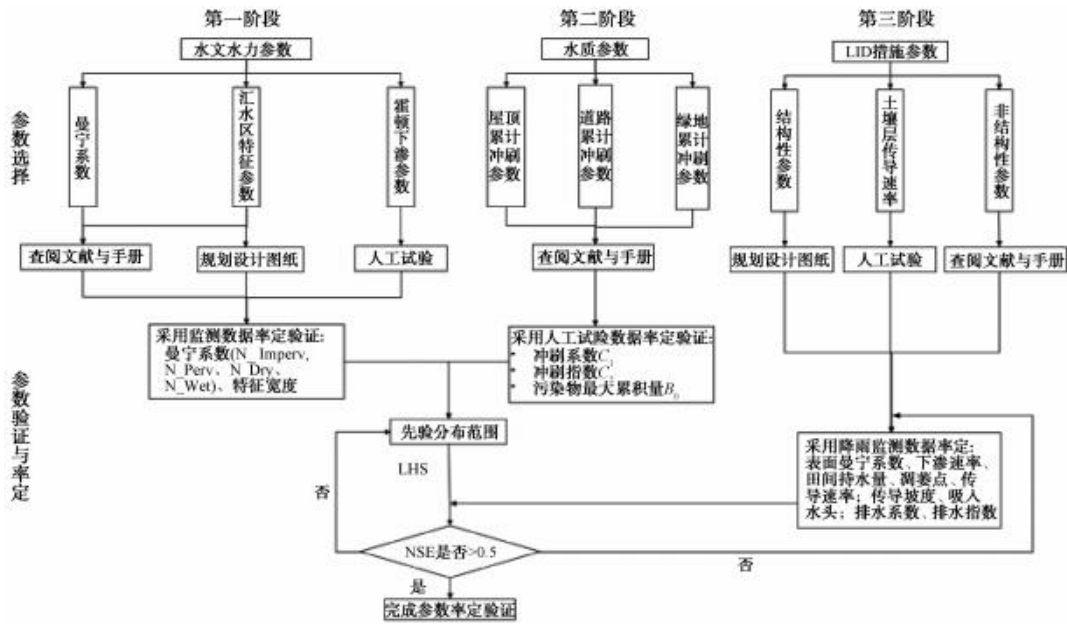


图 5 模型参数选择与率定流程图

Fig. 5 Flow Chart of Model Parameter Selection and Calibration

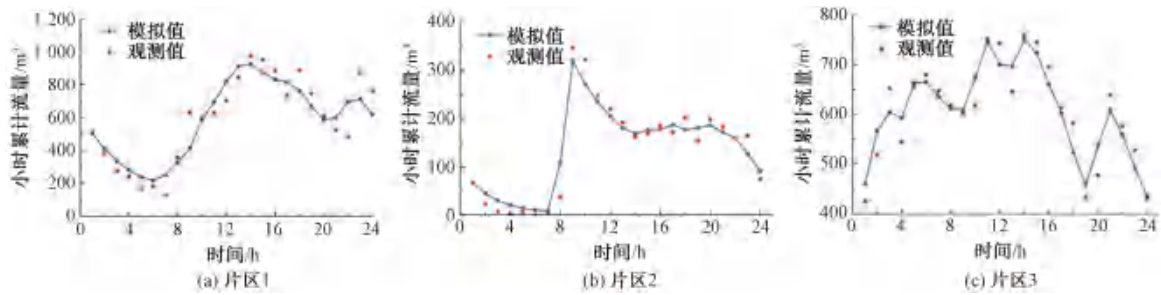


图 6 旱季率定径流量模拟值与观测值对比图

Fig. 6 Comparison between Simulated and Observed Values for Runoff in Dry Seasons

时模拟 1 000 次,计算 NSE,取排名前 2% 的采样点,对应的  $N_{Dry}$  为最优取值范围。结果表明,最优参数取值为  $[0.9017, 0.9019]$ ,确定  $N_{Dry}$  取值为 0.012 时,NSE 为 0.9,参数满足模型应用要求。

采用典型天的半点总流量数据进行旱季参数的验证,观测值和模拟值形状相似,主峰值出现时刻基本相同,如图 7 所示。验证 NSE 为 0.944 8,取值可靠。

(2) 雨季率定

率定、验证特征宽度  $k_{Width}$ 、不透水面曼宁系数  $N_{Imperv}$ 、透水面曼宁系数  $N_{Perv}$ 、雨季管网曼宁系数  $N_{Wet}$ 。根据文献、模型手册,确定参数的先验取值范围(表 4)。由于老、新城区的产汇流条件差异性大,需要采用 2018 年 4 月降雨事件分别率定。参考模型手册确定 4 个参数的先验取值范围,

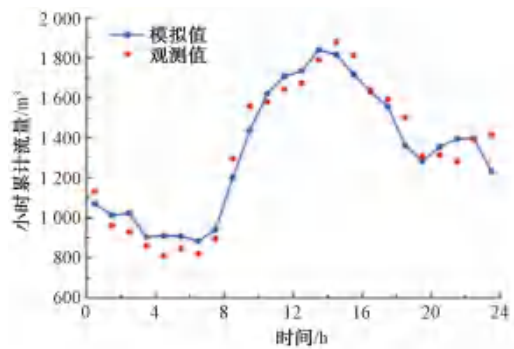


图 7 旱季参数的验证径流量模拟值与观测值对比图(片区 1)  
Fig. 7 Comparison between Simulated and Observed Values of Dry Seasons Model Parameter Validation (Area One)

然后采用 LHS 从中对 4 个参数取样 1 000 次,同时模拟 1 000 次,取 NSE 排名前 2% 的采样点,其对应

的参数值为最优取值范围(表4),与先验取值范围进行对比,N\_Imperv 和 N\_Perv 参数的最优区间跨度大,参数并不敏感,而 k\_Width 和 N\_Wet 参数呈

现了敏感特性,这与黄金良等<sup>[16]</sup>的研究成果相同,在参数最优取值范围内取靠近中间值为最优值(表4),流量过程模拟和观测值作图(图8)。

表4 雨季率定的最优参数区间和取值  
Tab. 4 Optimal Parameters Range and Value of Calibration in Rainy Season

城区	参数名称	先验取值范围	最优取值范围	最终参数取值
老城区	k_Width	[1.00,20.00]	[3.30,4.39]	4.00
	N_Imperv	[0.010,0.030]	[0.012,0.027]	0.020
	N_Perv	[0.100,0.800]	[0.120,0.796]	0.400
	N_Wet	[0.010 0,0.020 0]	[0.010 2,0.013 2]	0.012
	NS	/	[0.742 4,0.748 4]	/
新城区	k_Width	[1.00,20.00]	[1.15,2.38]	2.00
	N_Imperv	[0.010,0.030]	[0.010,0.028]	0.020
	N_Perv	[0.100,0.800]	[0.126,0.783]	0.400
	N_Wet	[0.010 0,0.020 0]	[0.010 0,0.013 2]	0.012 0
	NS	/	[0.583 3,0.590 8]	/

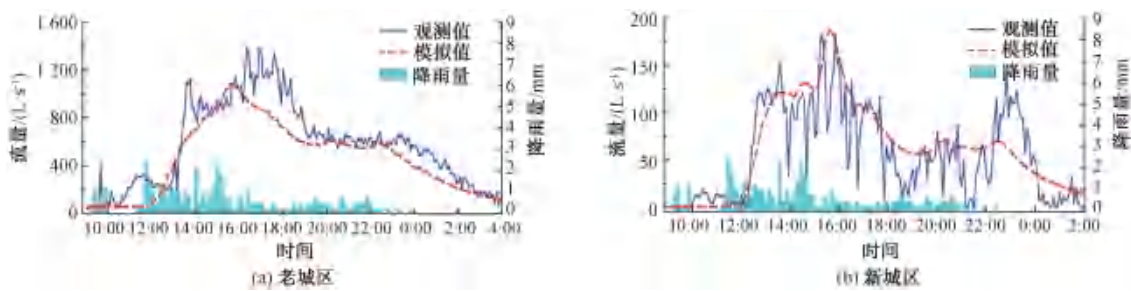


图8 雨季模型参数率定的模拟值与观测值对比

Fig. 8 Comparison between Simulated and Observed Values of Parameters Calibration of Rainy Season Model

采用2018年6月19日降雨事件验证,观测值和模拟值形状相似,主峰值出现时刻基本相同,如图9所示。验证NSE为0.5584,处于合理范围内,取值基本合理。

### 3.1.2 水质模块参数

根据冲刷函数,冲刷负荷计算如式(2)。

$$W = C_1 q^{C_2} B_0 \quad (2)$$

其中:W——冲刷负荷,g/h;

q——单位面积的径流速率,mm/h;

B<sub>0</sub>——污染物最大累积量,g。

冲刷负荷W可以由流量数据和污染物浓度数据计算得出,径流速率q可以由流量数据得到。根据屋顶、道路和绿地的人工降雨的试验结果,得到多场降雨的径流量和污染物浓度数据,明确累积冲刷方程中的冲刷系数C<sub>1</sub>、冲刷指数C<sub>2</sub>和污染物最大累积量B<sub>0</sub>。将径流速率q的观测值作为自变量,计算出每一组参数对应的模拟值(W<sub>sim</sub>),与冲刷负荷W的观测值(W<sub>obs</sub>)进行对比,使得所有W的观测

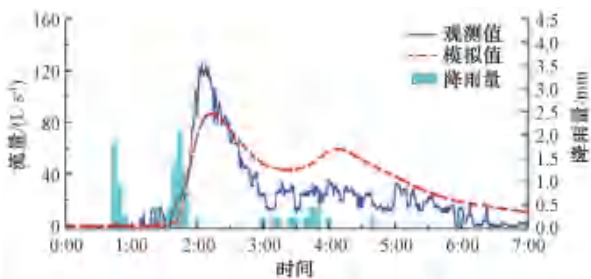


图9 雨季模型参数验证的模拟值与观测值对比

Fig. 9 Comparison between Simulated and Observed Values of Rainy Season Model Parameter Validation

值与模拟值最为接近的一组参数即为最优的参数。将不同下垫面类型的所有场次降雨的数据同时进行计算,其中屋顶和道路分别有 5 场降雨(55 个  $W$  观测值),绿地有 2 场降雨(18 个  $W$  观测值)。参考模型手册和相关文献,确定 3 个参数的先验分布范围(表 5),采用 Matlab 遗传算法模块完成计算的工作<sup>[15,17]</sup>,对于每一组参数进行 10 000 次采样,计算  $W$  的模拟值,与观测值进行比对计算 NSE,选出最佳的参数。

表 5 累积冲刷参数先验分布范围  
Tab. 5 Prior Distribution Range of Cumulative Scouring Parameters

参数	含义及单位	先验范围
$C_1$	冲刷系数	0.01~0.20
$C_2$	冲刷指数	0.1~2.0
$B_0$ -氨氮	氨氮最大累积量	0~10 g
$B_0$ -TN	TN 最大累积量	0~100 g
$B_0$ -TP	TP 最大累积量	0~10 g
$B_0$ -COD <sub>Cr</sub>	COD <sub>Cr</sub> 最大累积量	0~500 g
$B_0$ -SS	SS 最大累积量	0~500 g

以屋顶为例,各污染物的参数最优组如表 6 所示,显示最优参数对应的 NSE,基本合格,观测值与模拟值对比(图 10)。采用上述方法确定道路、绿地的污染物累积冲刷参数取值(表 6)。

### 3.1.3 LID 措施参数

对于非结构参数进行整体率定,根据 SWMM 手册与种植土试验数据,结合监测数据确定参数。选取 2018 年 7 月份的监测数据进行率定,8 月份监测数据进行验证。经计算,NSE 分别为 0.83、0.79,验证 NSE 分别为 0.66、0.62,均大于 0.50,表明参数基本合理,如表 7 所示。典型项目模型参数率定与验证结果如图 11 所示。

## 3.2 模型评估结果

根据《迁安市海绵城市试点区建设系统化方案》得到海绵城市建设指标和建设项目信息,采用典型年(2003 年)分级降雨数据进行模拟分析,评估海绵城市建设前、后面源污染和径流量的产生情况,进而确定面源污染控制率和年径流总量控制率,经评估,面源污染削减率达到 48.3%,年径流总量控制率达到 76.6%,满足海绵城市建设目标。

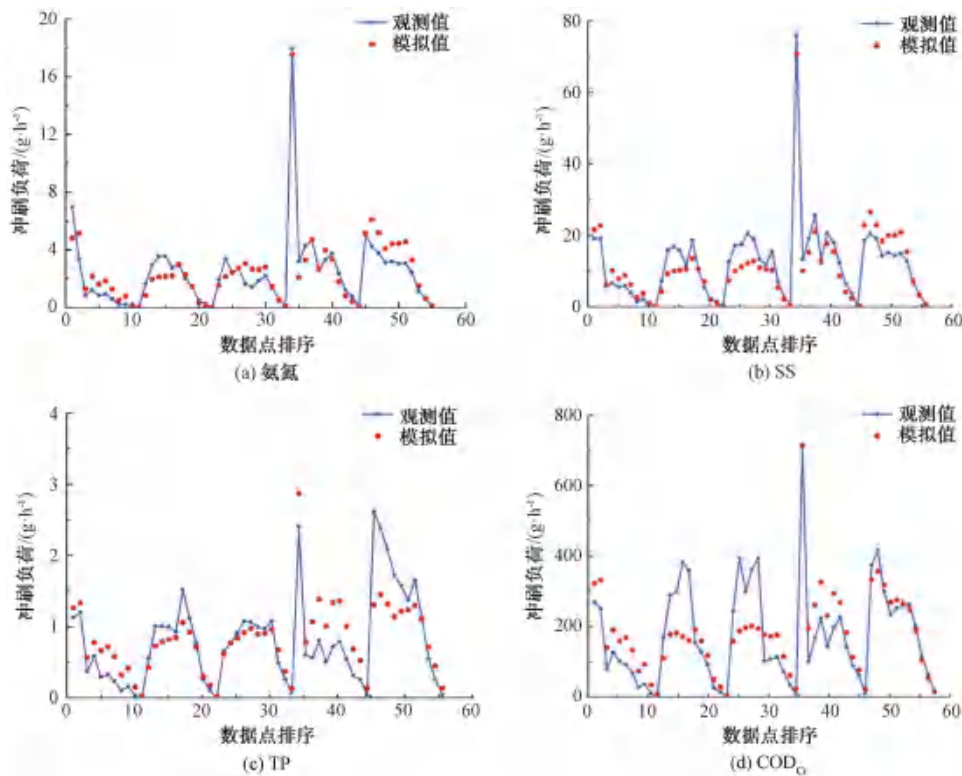


图 10 污染物冲刷负荷的观测值与模拟值

Fig. 10 Observed and Simulated Values of Pollutant Scouring Load

表6 污染物累积冲刷参数取值

下垫面类型	污染物	最大累积 /(0.1 g·m <sup>-2</sup> )	累积速率 /d <sup>-1</sup>	冲刷系数 C <sub>1</sub>	冲刷指数 C <sub>2</sub>
屋顶	SS	45.38	0.998	0.020	0.808
	COD <sub>Cr</sub>	35.16	0.998	0.063	0.734
	TN	2.34	0.998	0.016	1.101
	TP	0.43	0.998	0.020	0.737
	氨氮	0.44	0.998	0.014	1.194
	SS	19.73	0.998	0.025	1.095
道路	COD <sub>Cr</sub>	28.19	0.998	0.069	0.760
	TN	6.76	0.998	0.012	1.054
	TP	0.10	0.998	0.073	0.853
	氨氮	0.20	0.998	0.053	1.211
	SS	6.16	0.998	0.051	1.210
	COD <sub>Cr</sub>	4.55	0.998	0.064	1.211
绿地	TN	1.53	0.998	0.040	0.993
	TP	0.03	0.998	0.163	0.813
	氨氮	0.08	0.998	0.027	1.275

表7 非结构参数率定值

参数名称	率定范围	率定值
表面曼宁系数	0~0.100	0.011
下渗速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	200~400	300
田间持水量	0.062~0.378	0.100
凋萎点	0.024~0.250	0.050
传导速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	0.254~120.400	20.00
传导坡度	0~20	10
吸入水头/mm	0~100	50
排水系数/(mm·h <sup>-1</sup> )	0~0.5	0(无暗管) 0.1(有暗管)
排水指数	0~1.0	0.5

### 4 结论

通过对迁安典型片区 SWMM 模型参数的率定和验证,得到以下几点结论。

(1)结合设计资料、人工试验和自然降雨条件下的监测数据,参考相关文献,提出水文、水质、LID

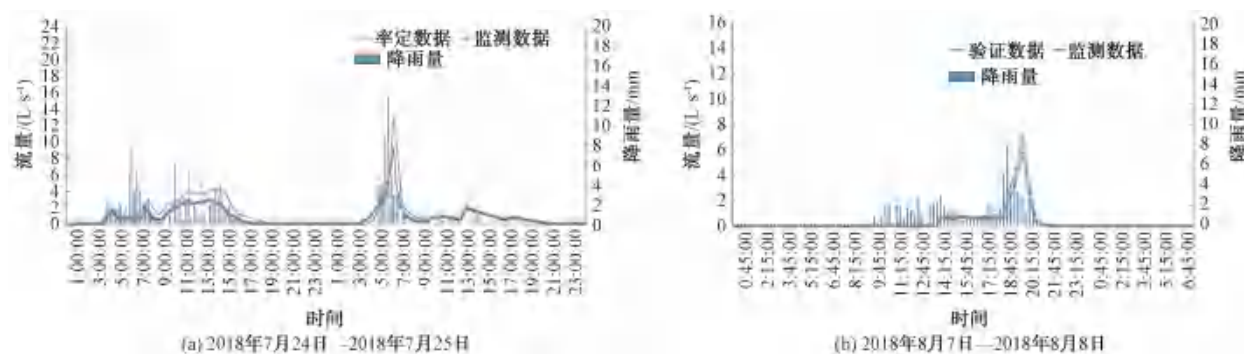


图 11 非结构参数率定与验证结果

Fig. 11 Results of Unstructured Parameter Calibration and Verification

措施模型参数率定验证的方法和技术路线,给出各参数的选取依据与路径,明确对曼宁系数、污染物累积冲刷参数等敏感性高的参数进行率定和验证。

(2)在参数先验分布范围内,采用 LHS 选取参数样本,进行率定和验证,确定参数最佳取值范围和最优值,相比于人工选取、蒙特卡洛法和传统单层抽样法,提高了参数率定的效率。

(3)以迁安典型片区为例,确定了水文、水质、LID 措施参数的最佳范围和最优值,为本地的海绵城市建设和国内 SWMM 模型应用提供了借鉴。但

仍然存在值得深入研究的内容,如将 LHS 与 Matlab 遗传算法模块进一步结合,提出模型参数自动率定方法,以提高模型应用效率;研究参数取值与地势、管网运行状况等条件的规律,为北方平原城市的海绵城市建设提供借鉴。

### 参考文献

[ 1 ] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1634-1644.  
[ 2 ] 李定强, 刘嘉华, 袁再健, 等. 城市低影响开发面源污染治



- 理措施研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2110-2118.
- [ 3 ] 王建富, 赵轩, 薛祥山, 等. 海绵城市规划工程体系间协调与统一性的研究——以南宁为例[J]. 给水排水, 2019, 55(s1): 72-76.
- [ 4 ] 段明印, 李传奇, 韩典乘, 等. 基于暴雨管理模型(SWMM)的水生态小区低影响开发(LID)技术效果模拟及评估[J]. 净水技术, 2018, 37(2): 31-37.
- [ 5 ] 石雷, 赵翎亦, 于路港. 基于 SWMM 模型的透水路面径流削减效果评估[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 51-55.
- [ 6 ] 康得军, 孙健, 匡帅, 等. 暴雨洪水管理模型(SWMM)研究应用及发展趋势[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 45-50.
- [ 7 ] KNIGHTON J, LENNON E, BASTIDAS L, et al. Stormwater detention system parameter sensitivity and uncertainty analysis using SWMM[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(8): 05016014. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001382.
- [ 8 ] RAI P K, CHAHAR B R, DHANYA C T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events[J]. Hydrology Research, 2017, 48(2): 384-394.
- [ 9 ] 苟德菲, 杨辉, 周午阳, 等. 基于 InfoWorks ICM 的广州市 H 区流域排水系统模型验证[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 67-73.
- [ 10 ] 李传奇, 崔佳伟, 孙策, 等. 基于偏秩相关-逐步回归法的 SWMM 模型全局敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 51-55, 62.
- [ 11 ] 王建富, 薛祥山, 刘改妮, 等. 基于数字模型的西部平原城镇雨水系统规划优化[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 128-134.
- [ 12 ] 李月玉, 李磊. 免疫粒子群算法与支持向量机在枯水期月径流预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 124-128, 135.
- [ 13 ] 魏胜. 基于模拟退火算法支持向量机在枯水期月径流预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 135-138.
- [ 14 ] 王汉明, 李传奇, 熊剑智, 等. 基于互信息的 SWMM 模型参数全局敏感性分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 22-26, 93.
- [ 15 ] 马彦斌, 盛旺, 李江云, 等. 基于遗传算法的 SWMM 模型参数率定研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 46-49, 53.
- [ 16 ] 黄金良, 杜鹏飞, 何万谦, 等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析[J]. 中国环境科学, 2007(4): 549-553.
- [ 17 ] 伍国军, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 基于拉丁超立方抽样的有限元可靠程序开发及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 550-554.
- [ 18 ] 吴亚男, 熊家晴, 任心欣, 等. 深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究[J]. 给水排水, 2015, 51(11): 126-131.
- [ 19 ] 陈文学, 何胜男, 穆祥鹏, 等. 一种 SWMM 模型参数的高精度率定方法与流程:CN201910884426.0[P]. 2019-12-31.

(上接第 115 页)

平衡分析法,统计水量差值。其次,监控各区块最小夜间流量,以及二次供水的流量、压力、液位、水质等数据,根据模型计算及时发现渗漏区域及管段,控制漏损。直埋管线不采用其他探测技术,入廊管线采用管廊环境监测系统进行渗漏监测,根据调试和竣工半年的管网运行情况,漏损率低于 5%,整体管网 DMA 分区计量运行良好,管廊环境监测数据准确可靠,入廊管线比采用 DMA 漏损控制为主的直埋管线更迅速、准确地发现渗漏点。

该工程建设规模较小,且管网运行时间短、数据积累少,仅利用管廊环境监测数据进行管网渗漏探测,其余管网未使用渗漏探测技术。通过技术、经济综合考虑,采用较合理的一次设计、分期建设的方式实施智能管网渗漏探测技术。

## 6 结语

通过科技创新,建立智慧管网渗漏监测系统,结合量化的 DMA 区块流量、压力等数据,使用智能渗漏探测技术,利用物联网及云平台建立智能漏损监测及分析系统模型,结合人工检测方法及严格的管

理措施,进行渗漏监测,能有效提高渗漏检测速度,提升漏损管理质量,降低误报率和综合漏损率。

## 参考文献

- [ 1 ] 住房和城乡建设部. 城市建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-11) [2022-02-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/document/file>.
- [ 2 ] 徐强, 张佳欣, 王莹, 等. 智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4234-4239.
- [ 3 ] 刘昌. 石化企业供水管网的腐蚀与管道测漏技术[C]. 上海: 过程工业节水减排和污水回用技术国际研讨会论文集, 2006.
- [ 4 ] 杜豫川, 潘宁, 蒋盛川, 等. 一种基于动态红外热像图处理的地下管廊渗漏检测方法: 109743879[P]. 2019-05-10.
- [ 5 ] 韦展彪. 基于分布式光纤传感的自来水管道泄漏检测系统的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [ 6 ] 刘欣怡, 谢佳桃. 智能化大型管网渗漏监测系统[J]. 中国西部, 2017(8): 97-98.
- [ 7 ] 赵丽娜, 朱新民, 黄涛. 红外热成像技术在埋地管道渗漏检测中的应用[C]. 北京: 中国建筑学会, 2015.