

唐清竹,徐宗学,王京晶,等. 基于全局和局部方法的城市雨洪模型参数敏感性——以济南市主城区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2022,44(4):713-722.

TANG Qing-zhu, XU Zong-xue, WANG Jing-jing, et al. Parameter Sensitivity of Urban Storm Models Based on Global and Local Optimum Methods—A Case Study in the Main Urban Area of Jinan City, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44 (4): 713-722.

DOI:10.19814/j.jese.2021.09047

# 基于全局和局部方法的城市雨洪模型参数敏感性 ——以济南市主城区为例

唐清竹<sup>1,2</sup>, 徐宗学<sup>1,2\*</sup>, 王京晶<sup>1,2</sup>, 赵刚<sup>3</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 布里斯托大学地理科学学院, 布里斯托 BS8 1TH)

**摘要:**开展模型参数敏感性分析是进行参数率定及提高模型模拟效果的重要前提。以山东省济南市主城区为研究对象, 基于 SWMM 模型构建城市雨洪模型, 从全局和局部角度分别采用 GLUE 方法与修正 Morris 筛选法, 以流域出口流量数据为模型率定依据, 对不同暴雨情景下 SWMM 模型中 11 个参数进行敏感性分析。结果表明:①GLUE 方法筛选出河道糙率系数(RoughnessR)、衰减常数(Decay Constant)、不透水区洼蓄量(S-Imperv)为敏感参数;②采用修正 Morris 筛选法时, 不同暴雨情景下各参数对径流总量的影响大致相同, 对洪峰流量影响不尽相同, 对径流总量表现出中高敏感性的参数有河道糙率系数、排干时间(Drying Time)、衰减常数、最大入渗率(MaxRate)、最小入渗率(MinRate)、透水区洼蓄量(S-Perv)、管道糙率系数(RoughnessP), 对洪峰流量表现出中高敏感性的参数有河道糙率系数、衰减常数、透水区曼宁系数(N-Perv);③两种方法均可准确识别 SWMM 模型参数敏感性, 均显示河道糙率系数与衰减常数对模拟结果的影响较为显著, 具体区别在于 GLUE 方法可考虑参数间相互作用, 判断参数是否为敏感参数, 而修正 Morris 筛选法可对参数敏感性进行量化分级并排序。

**关键词:**SWMM 模型; 参数; 敏感性; GLUE 方法; Morris 筛选法; 暴雨; 流量; 山东

**中图分类号:**TV122<sup>+</sup>.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2022)04-0713-10

## Parameter Sensitivity of Urban Storm Models Based on Global and Local Optimum Methods

—A Case Study in the Main Urban Area of Jinan City, China

TANG Qing-zhu<sup>1,2</sup>, XU Zong-xue<sup>1,2\*</sup>, WANG Jing-jing<sup>1,2</sup>, ZHAO Gang<sup>3</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol BS8 1TH, UK)

**Abstract:** Sensitivity analysis of model parameters is an important prerequisite for urban flood modeling. An urban hydrological model named Storm Water Management Model (SWMM) was

收稿日期:2021-09-24;修回日期:2022-01-26 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)

作者简介:唐清竹(1999-),女,黑龙江鸡西人,工学硕士研究生,E-mail: tangqingzhu@mail.bnu.edu.cn.

\* 通讯作者:徐宗学(1962-),男,山东淄博人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail: zxxu@bnu.edu.cn.

developed in the main urban area of Jinan city, China. The generalised likelihood uncertainty estimation (GLUE) method and the modified Morris method were used for sensitivity analysis respectively from both global and local perspectives, and the discharge series at the watershed outlet was used as the calibration and validation data. The sensitivity of SWMM model parameters under different storm scenarios was analyzed. The results show that ① RoughnessR, Decay Constant, S-Imperv are selected as sensitivity parameters by using the GLUE method; ② the influence of each parameter on the total runoff by using modified Morris method is roughly the same under different storm scenarios, but the influence on the peak flow is different; RoughnessR, Drying Time, Decay Constant, MaxRate, MinRate, S-Perv, and RoughnessP show high sensitivity to the total runoff, and RoughnessR, Decay Constant and N-Perv show high sensitivity to the peak flow; ③ both GLUE and modified Morris methods can accurately identify the high sensitive parameters of SWMM model; the uncertainty of RoughnessR and Decay Constant has a significant influence on the simulation results; the difference is that the GLUE method can be used to determine whether the parameters are sensitive, and the modified Morris method can be used to quantitatively rank the parameter sensitivity.

**Key words:** SWMM model; parameter; sensitivity; GLUE method; Morris method; rainstorm; flow; Shandong

## 0 引 言

随着全球气候的持续变暖和城市化进程的快速推进,城市洪涝问题频发<sup>[1]</sup>。目前,城市洪涝灾害已经成为影响城市经济社会发展和人民生命财产安全的主要自然灾害之一,防灾减灾问题已经引起了中央和地方各级政府的广泛关注和高度重视<sup>[2-3]</sup>。在中国目前大力建设海绵城市以缓解城市内涝的大背景下,城市雨洪过程模拟逐渐成为一种有效的防灾减灾措施与雨水管理非工程措施<sup>[4-5]</sup>。SWMM 模型(Storm Water Management Model)是由美国环境保护署(EPA)于 1971 年开发的一款暴雨洪水管理模型,随着几十年的不断完善,其功能愈发强大,可以进行动态的降雨-径流模拟计算,并因其开源免费、功能强大、简单易学等特点被广泛应用于城市防汛排洪及雨水污水管道系统等规划、设计和评价。模型参数是 SWMM 模型的重要组成部分,对参数敏感性进行准确的识别,是保证模型模拟精度和提高参数率定效率的重要前提<sup>[6]</sup>。

参数敏感性分析是模型模拟中重要的环节,可以对不同情况下模型的参数率定与模型应用提供一定依据<sup>[7-10]</sup>。敏感性分析可以识别不同参数对模拟结果的影响程度,从而筛选出对输出值高敏感和不敏感的参数<sup>[11]</sup>。高敏感的参数在模型率定时需重点关注,不敏感的参数则可以直接选取经验值,这不仅可以提高模型参数率定效率,还能提高模拟结果

准确性。目前,参数敏感性分析主要分为全局敏感性分析和局部敏感性分析。①全局敏感性分析是综合考虑参数整体作用对模型输出结果的总体影响,从而得到全局最优解<sup>[12]</sup>。常用的全局敏感性分析方法主要有普适似然不确定性估计方法(GLUE)、Sobol 方差分析法、区域灵敏度分析法(HSY)以及多元逐步回归分析法等<sup>[13-14]</sup>,其中 GLUE 方法可以更明确地认识降雨径流模型的局限性<sup>[15]</sup>,通过提供模型参数的后验分布,定性分析出模型结果不确定性范围,能够很好地解释“异参同效”现象,避免单一最优参数组合造成的洪水预警预报风险<sup>[16-17]</sup>。②局部敏感性分析也叫单参数分析,其原理是控制其他参数不变,依次对某一个参数在一定范围内按照固定步长进行人工扰动,分析单个参数对模拟结果的影响。目前国内应用最多的局部敏感性分析方法是修正 Morris 筛选法<sup>[18-20]</sup>,该方法较于原始 Morris 筛选法来说,操作简便、容易计算且计算结果精度更高,可定量筛选出对模型结果影响显著的参数。全局敏感性分析和局部敏感性分析的原理差异较大,目前大多数研究主要着重关注某一种方法的参数敏感性分析结果,而对比研究两种方法的参数敏感性分析结果相对较少。

本文从全局和局部角度出发,分别采用 GLUE 方法和具有明显优势的修正 Morris 筛选法对构建的 SWMM 模型中 11 个参数进行敏感性分析,得出对模型模拟结果影响显著的参数并进行排序,对比

两种方法的敏感性分析结果,分析总结这两种方法的优缺点及适用条件,为山东省济南市主城区及其他相似区域洪水模拟和流域水资源管理提供科学依据。

# 1 研究区概况

山东省济南市主城区面积约为 322 km<sup>2</sup>,属温带季风气候,四季分明、雨热同期,年平均气温约为 13.8 ℃,多年平均降雨量约为 647 mm。降水时空分布极不均匀,6 月至 9 月为主汛期,降水量约占全年降水量的 75%。市域水量丰沛,小清河在中北部横穿城市,流域内地形复杂。济南市属于典型的山前平原型城市,地势南高北低,南北高差百余米,其数字高程模型(DEM)如图 1 所示。济南市主城区河流湖泊众多,主要包含黄河、小清河两大水系和大

明湖、白云湖等湖泊。研究区主要属于小清水水系,是城区唯一的排洪干道,流域内共有 5 座雨量站,流域唯一出口断面设置有黄台桥水文站,用于监测降水径流等水文数据。降水数据用于驱动 SWMM 模型,实测流量数据用于校验模型,流域水系如图 1 所示。

济南市洪涝灾害频发,暴雨高度集中、强度大、历时短、降水时空变化剧烈。老城区雨水管网系统建造时间较早,设计标准低,泄洪能力较差,同时由于近 20 年高度城市化导致下垫面发生剧烈改变,下渗能力低,汇水区自然调蓄能力弱<sup>[21]</sup>。加之南高北低、落差大的地形特点,在遭遇短历时、高强度降水时,南部山区下泄洪水直接汇入主城区,导致雨洪猛涨缓落,极易在短时间内在低洼区域形成大面积严重积水,排泄不及,极易引发城市洪涝灾害<sup>[22-23]</sup>。

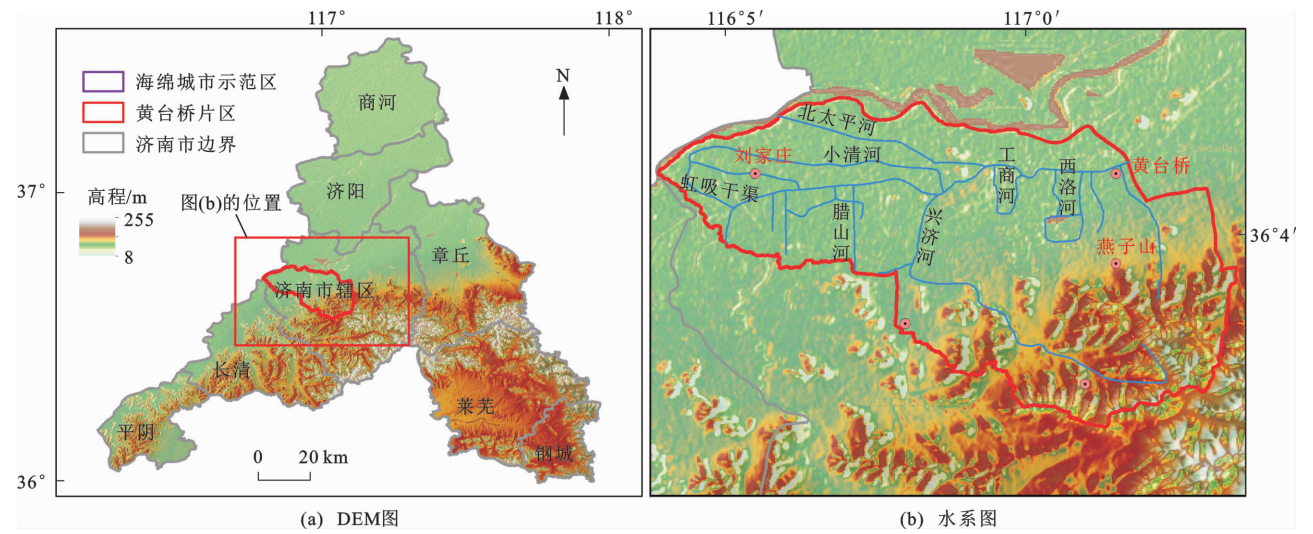


图 1 山东省济南市地形及水系概况  
Fig. 1 Topography and Water System Maps of Jinan City, Shandong Province

# 2 模型构建

利用济南市主城区现有河道及排水管网数据,基于管网空间拓扑关系,利用 ArcGIS 软件对管道长度、流向、糙率和最大水深等数据进行处理和整理,将研究区内复杂的河道水系及管网资料进行合理概化。研究区排水管网经过概化共得到 160 个节点、1 个排水口、156 条管线。选用划分精度更高的泰森多边形法,结合人工修正方法划分各个子汇水区。首先,利用 ArcGIS 软件对整个研究区进行泰森多边形的自动划分,初步形成各个子汇水区域;然后,结合研究区流域水文特征与数字高程模型,依据研究区用地类型、街道建筑分布手动进行局部调整,从而进一步细划子汇水区。按照上述方法,共将济

南市主城区流域排水系统划分为 112 个由河道和排水管网共同控制的子汇水区,流域出口位于黄台桥水文站。同时,提取 SWMM 模型所需的参数数据(如子汇水区面积、子汇水区平均坡度和子汇水区特征宽度等),将子汇水区、管道、节点文件以及各个属性数据通过 inp. PINS 软件输入模型中,添加刘家庄雨量站、东红庙雨量站、兴隆雨量站、燕子山雨量站和黄台桥水文站,并添加处理好的降雨数据,输入各个子汇水区所对应的控制雨量站与排水节点,从而构建济南市主城区 SWMM 模型,最终建立的 SWMM 模型结构如图 2 所示。

SWMM 模型参数较多,根据获取方法可分为物理参数和过程参数两大类<sup>[24]</sup>,其中物理参数主要依据实测资料或者通过 ArcGIS 软件进行计算与提

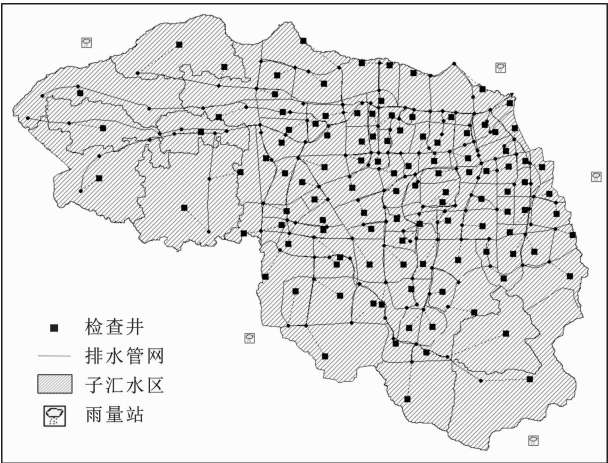


图 2 SWMM 模型概化

Fig. 2 Generalization of SWMM Model

取,而过程参数则需要通过城市雨洪模拟进行率定及验证得到。本研究中,参数敏感性分析对象为 11 个过程参数,通过参考相关文献结果<sup>[14,21,25-26]</sup>及 SWMM 模型用户手册<sup>[27]</sup>确定其取值范围,相关过程参数取值范围见表 1。

表 1 SWMM 模型参数取值范围

Table 1 Parameter Ranges of SWMM Model

序号	参数名称	物理意义	取值范围
1	N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.01~0.05
2	N-Perv	透水区曼宁系数	0.1~0.5
3	S-Imperv	不透水区注蓄量/mm	0.1~50.0
4	S-Perv	透水区注蓄量/mm	0.1~50.0
5	PctZero	无注蓄不透水区占比/%	10~30
6	MaxRate	最大入渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	50~100
7	MinRate	最小入渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	0~50
8	Drying Time	排干时间/d	0~10
9	Decay Constant	衰减常数/(L·h <sup>-1</sup> )	0.5~1.5
10	RoughnessR	河道糙率系数	0.01~0.20
11	RoughnessP	管道糙率系数	0.01~0.09

3 分析方法

3.1 全局敏感性分析

GLUE 方法是英国水文学家 Beven 等于 1992 年提出的水文模型参数不确定性估计方法<sup>[28-29]</sup>,其评估的是参数集,而不是参数的单一值,可通过设定敏感性阈值,筛选出多个高敏感性参数组合,使模型模拟结果达到最优。本研究中,全局敏感性分析步骤如下:①首先,采用拉丁超立方法在确定的 11 个参数取值范围内进行 10 000 次均匀随机抽样,将参数组代入 SWMM 模型得出模拟值;②然后,选择合适的似然目标函数,本文以纳什效率系数(Nash-

Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)为目标函数估算模拟值与实测值的拟合程度,得出似然度值;③接着,根据贝叶斯理论指定参数空间的先验分布为均匀分布,以计算的参数似然度值为后验分布,每个参数集实现的后验似然度值将反映所有参数之间的相互作用<sup>[30]</sup>;④最后,筛选出符合一定似然度(纳什效率系数大于 0)的结果进行分析,将散点数进行统计,根据各个参数的取值范围合理划分单位区间,统计各单位区间中有效参数组合个数,计算各参数空间分布概率及累计概率。

3.2 局部敏感性分析

Morris 筛选法是任意选取某个参数  $x_i$ ,在合理范围内进行随机扰动,得出相应输出结果  $y(x) = y(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,用影响值  $e_i$  判断输出值对各个参数的响应。其中,  $i=1, 2, \dots, n$ 。影响值  $e_i$  计算公式为

$$e_i = (y_i - y) / \Delta_i \tag{1}$$

式中:  $y_i$  为参数  $i$  变化后的模型输出值;  $y$  为参数变化前的模型输出值;  $\Delta_i$  为参数  $i$  的变化幅度值。

本文采用修正 Morris 筛选法对参数进行特定百分率的扰动,运行模型得到参数的敏感性系数序列,序列的平均值即为参数敏感性的判别因子。敏感性的判别因子( $D_{SN}$ )计算公式为

$$D_{SN} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} \frac{(Y_{j+1} - Y_j) / Y_0}{(P_{j+1} - P_j) / 100} \tag{2}$$

式中:  $m$  为模型运行次数;  $Y_j$  为模型第  $j$  次运行输出值;  $Y_0$  为初始参数运行得到的初始输出值;  $P_j$  为第  $j$  次运行参数相对于初始参数值的变化百分率。

参数的敏感性可根据  $D_{SN}$  的大小分为 4 类: I 类,  $|D_{SN}| \geq 1$ , 参数极敏感; II 类,  $0.2 \leq |D_{SN}| < 1$ , 参数高敏感; III 类,  $0.05 \leq |D_{SN}| < 0.2$ , 参数中等敏感; IV 类,  $0 \leq |D_{SN}| < 0.05$ , 参数不敏感。

本研究以特定步长 10% 对已率定好的各个参数进行扰动。在其他参数不变的情况下,改变某一待分析的参数,取值分别为初始值的 -30%、-20%、-10%、10%、20%、30%,运行模型得出目标函数值(表 2)。选取在城市暴雨模拟中具有重要意义的 2 个输出值(径流总量和洪峰流量)作为目标函数,根据上述扰动结果,分析 3 场暴雨情景下径流总量和洪峰流量对 11 个参数的敏感性响应程度。

本研究采用研究区域实际监测的 3 场降雨数据进行模型模拟,分别发生于 2019 年 6 月 21 日、2018 年 8 月 14 日和 2018 年 6 月 25 日,暴雨过程数据完整,降雨量分别为 51 mm(暴雨)、61 mm(暴雨)、154



表 2 SWMM 模型 11 个参数扰动结果

Table 2 Perturbation Results of 11 Parameters in SWMM Model

参数名称	初始值	不同扰动情况下的参数值					
		−30%	−20%	−10%	10%	20%	30%
N-Imperv	0.033 5	0.023 4	0.026 8	0.030 1	0.036 8	0.040 2	0.043 5
N-Perv	0.495 2	0.346 6	0.396 2	0.445 7	0.544 7	0.594 2	0.643 8
S-Imperv	0.131 6	0.092 1	0.105 3	0.118 4	0.144 8	0.157 9	0.171 1
S-Perv	8.955 0	6.268 0	7.164 0	8.060 0	9.851 0	10.746 0	11.64 2
PctZero	28.840 0	20.190 0	23.070 0	25.960 0	31.720 0	34.610 0	37.490 0
MaxRate	93.940 0	65.760 0	75.150 0	84.550 0	103.330 0	112.730 0	122.120 0
MinRate	0.403 5	0.282 5	0.322 8	0.363 2	0.443 9	0.484 2	0.524 6
Drying Time	6.170 0	4.320 0	4.940 0	5.550 0	6.790 0	7.400 0	8.020 0
Decay Constant	0.630 8	0.441 6	0.504 6	0.567 7	0.693 9	0.757 0	0.820 0
RoughnessR	0.046 9	0.032 8	0.037 5	0.042 2	0.051 6	0.056 2	0.060 9
RoughnessP	0.011 4	0.008 0	0.009 1	0.010 3	0.012 6	0.013 7	0.014 9

mm(大暴雨)。依据国家气象部门对于 24 h 降雨量划分降雨类型的规定,3 场降雨均为暴雨(其中有 1 场为大暴雨),但雨型不同,代表暴雨的随机不确定性,且 3 场暴雨过程模拟效果较好,可以很好地研究模型参数对于不同暴雨情况的响应程度,从而进行模型参数敏感性的分析。

4 结果分析与讨论

4.1 全局敏感性分析

通过将拉丁超立方方法随机抽取的 10 000 组参数代入 SWMM 模型,对济南市主城区 2019 年 6 月 21 日、2018 年 8 月 14 日和 2018 年 6 月 25 日的 3 场暴雨进行模拟,实现运用 GLUE 方法对 SWMM 模型参数进行全局敏感性分析的过程,分析结果见图 3。以纳什效率系数为目标函数,筛选出纳什效率系数大于 0 的有效参数组合共 4 008 组,其中纳什效率系数大于 0.8 的参数组合共 154 组。不同参数组合能达到同样的模拟效果,表明 SWMM 模型具有较为明显的“异参同效”现象。

图 3 展示了 3 种暴雨情景下 11 个参数的概率及累计概率。从图 3 可以看出,在各自取值区间内似然度值有明显变化的参数有 RoughnessR、Decay Constant、S-Imperv 共 3 个参数,RoughnessR 后验概率呈正态分布,S-Imperv 和 Decay Constant 呈梯形分布。其中,RoughnessR 是变化最为明显的参数,为高敏感参数。当取值范围为 0.02~0.13 时,纳什效率系数存在显著的高峰,纳什效率系数大于 0 的累计概率密度达 0.962,且非该取值范围内的参数值所对应的纳什效率系数均小于 0.4,当参数取值为 0.05 左右时,纳什效率系数达到最大值

(0.89),故本研究中 RoughnessR 的取值范围可由 0.01~0.20 缩小至 0.02~0.13。Decay Constant 和 S-Imperv 后验分布与先验分布的累计概率存在细微差异,为较敏感参数。Decay Constant 和 S-Imperv 取值范围分别缩小至 1.2~1.5 和 0~40 时,纳什效率系数大于 0 的累计概率密度均可超过 0.9。其余 8 个参数在取值范围内似然度值几乎没有变化,均呈均一分布,后验分布与先验分布基本相同,几乎无敏感性。赵月等采用 GLUE 方法对模型参数进行敏感性分析的研究结果表明 RoughnessR、S-Imperv、RoughnessP 为敏感参数<sup>[6,17]</sup>。本文研究结果中 RoughnessP 与其分析结果不同,这与地表汇流、管道特性息息相关。暴雨条件下,地表快速汇流使得雨水来不及下渗完全通过管道排走,当管网的排水能力达到饱时会产生溢流,因此,改变参数几乎不会对模型模拟结果产生影响。

4.2 局部敏感性分析

基于扰动结果,在 MATLAB 软件中以输入文件为驱动调动 SWMM 模型计算程序,并读取输出文件,实现运用修正 Morris 筛选法定量计算参数敏感性的过程,从而探究济南市主城区 2019 年 6 月 21 日、2018 年 8 月 14 日和 2018 年 6 月 25 日的 3 场暴雨情景下 11 个参数的单一变化对径流总量和洪峰流量 2 个目标函数的影响。这 3 场暴雨情景下,参数对径流总量和洪峰流量的敏感性分析结果见表 3 和表 4,敏感性判别因子柱状图见图 4 和图 5。

表 3 和图 4 展示了 3 场暴雨情景下 11 个参数对径流总量敏感性判别因子的计算结果。从表 3 和图 4 可以看出,不同暴雨情景下每个参数对径流总

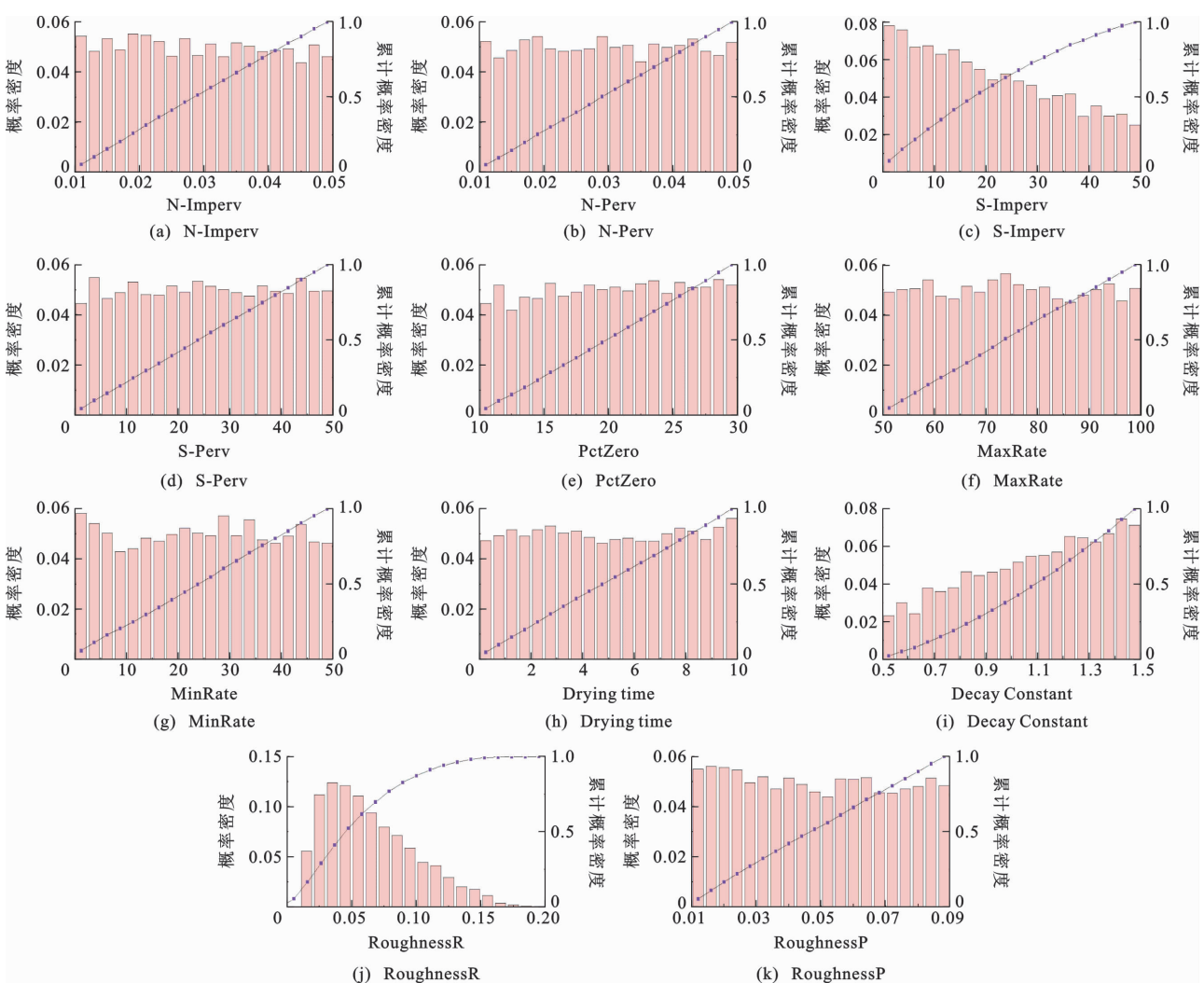


图3 SWMM 模型 11 个参数概率及累计概率

Fig. 3 Probability and Cumulative Probability of 11 Parameters in SWMM Model

表 3 径流总量敏感性分析结果

Table 3 Sensitivity Analysis Results of Total Runoff

参数名称	2019 年 6 月 21 日暴雨		2018 年 8 月 14 日暴雨		2018 年 6 月 25 日大暴雨	
	敏感性判别因子	等级	敏感性判别因子	等级	敏感性判别因子	等级
N-Imperv	0.035 7	Ⅳ	0.012 7	Ⅳ	−0.004 1	Ⅳ
N-Perv	0.031 9	Ⅳ	0.127 4	Ⅲ	0.191 1	Ⅲ
S-Imperv	−0.001 4	Ⅳ	−0.000 4	Ⅳ	−0.000 2	Ⅳ
S-Perv	−0.099 4	Ⅲ	−0.076 7	Ⅲ	−0.067 7	Ⅲ
PctZero	0.000 5	Ⅳ	0.000 1	Ⅳ	0.000 0	Ⅳ
MaxRate	−0.166 1	Ⅲ	−0.122 5	Ⅲ	−0.129 1	Ⅲ
MinRate	−0.116 5	Ⅲ	−0.196 1	Ⅲ	−0.110 7	Ⅲ
Drying Time	0.183 8	Ⅲ	0.153 1	Ⅲ	0.134 3	Ⅲ
Decay Constant	0.234 7	Ⅱ	0.122 1	Ⅲ	−0.073 5	Ⅲ
RoughnessR	−0.285 4	Ⅱ	−0.362 4	Ⅱ	−0.482 6	Ⅱ
RoughnessP	−0.056 8	Ⅲ	−0.067 0	Ⅲ	−0.061 9	Ⅲ

量的影响大体相同。对径流总量表现出中高敏感度的参数有 RoughnessR、Drying Time、Decay Constant、MaxRate、MinRate、S-Perv、RoughnessP 等 7 个参数,其余 4 个参数敏感性较差。其中,影响最大

表 4 洪峰流量敏感性分析结果

Table 4 Sensitivity Analysis Results of Peak Flow

参数名称	2019 年 6 月 21 日暴雨		2018 年 8 月 14 日暴雨		2018 年 6 月 25 日大暴雨	
	敏感性判别因子	等级	敏感性判别因子	等级	敏感性判别因子	等级
N-Imperv	-0.023 3	Ⅳ	-0.013 7	Ⅳ	0.004 7	Ⅳ
N-Perv	-0.147 6	Ⅲ	-0.118 7	Ⅲ	-0.163 9	Ⅲ
S-Imperv	-0.006 9	Ⅳ	-0.001 2	Ⅳ	0.000 0	Ⅳ
S-Perv	-0.062 7	Ⅲ	-0.052 5	Ⅲ	-0.026 5	Ⅳ
PctZero	0.002 9	Ⅳ	0.000 5	Ⅳ	0.000 0	Ⅳ
MaxRate	-0.104 2	Ⅲ	-0.081 9	Ⅲ	-0.044 1	Ⅳ
MinRate	-0.016 4	Ⅳ	-0.014 3	Ⅳ	-0.010 3	Ⅳ
Drying Time	0.109 8	Ⅲ	0.097 7	Ⅲ	0.046 3	Ⅳ
Decay Constant	0.460 8	Ⅱ	0.285 3	Ⅱ	0.147 2	Ⅲ
RoughnessR	-0.870 6	Ⅱ	-0.891 0	Ⅱ	-0.592 4	Ⅱ
RoughnessP	-0.090 4	Ⅲ	-0.059 3	Ⅲ	-0.038 8	Ⅳ

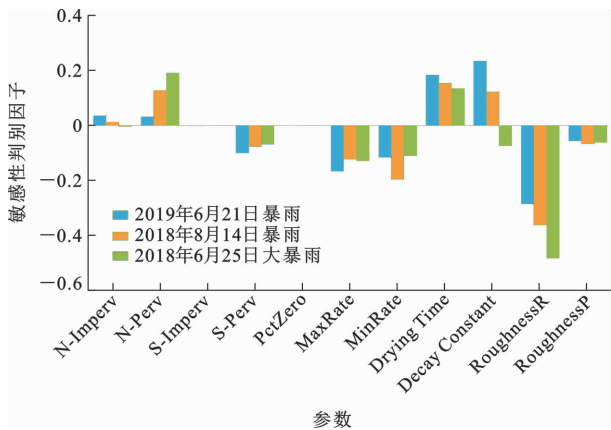


图 4 11 个参数对径流总量的敏感性判别因子分布

Fig. 4 Histogram of Sensitivity Discriminant Factors of 11 Parameters to the Total Runoff

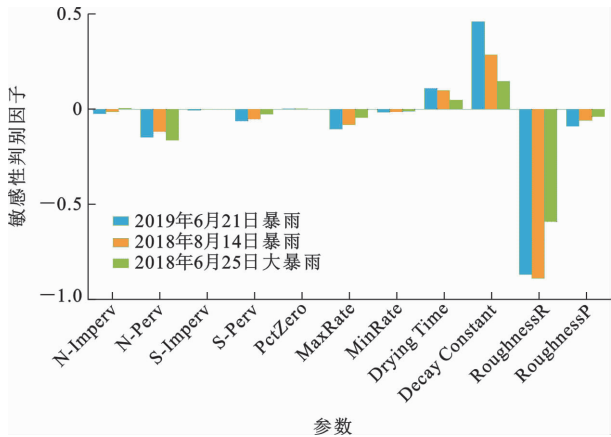


图 5 11 个参数对洪峰流量的敏感性判别因子分布

Fig. 5 Histogram of Sensitivity Discriminant Factors of 11 Parameters to the Peak Flow

的参数为 RoughnessR, 灵敏度为  $-0.482\ 6\sim-0.285\ 4$ ;随着降雨量的增加,该参数对径流总量的负响应越大。其原因是在暴雨情景下,地表快速

汇流导致雨水来不及下渗,往往会通过河道排走,此时 RoughnessR 越大,产生的径流总量就越小。Drying Time 为第二敏感性参数,灵敏度为  $0.134\ 3\sim0.183\ 8$ ;随着降雨量的增加,该参数对径流总量的正响应越小。Horton 入渗模型的 3 个参数 Decay Constant、MaxRate、MinRate 也均为中高敏感性参数,其原因是在暴雨情景下产流速率明显高于下渗速率,超渗产流更容易形成,降雨对径流的贡献更大<sup>[4,31-32]</sup>。

表 4 和图 5 展示了 3 场暴雨情景下 11 个参数对洪峰流量敏感性判别因子的计算结果。从表 4 和图 5 可以看出,不同暴雨情景下每个参数对洪峰流量的影响不尽相同。暴雨情景(2019 年 6 月 21 日和 2018 年 8 月 14 日暴雨)下敏感性分布相对一致,某些中高敏感性参数在大暴雨情景(2018 年 6 月 25 日大暴雨)下则变为不敏感参数。在不同暴雨情景下,对洪峰流量均表现出中高敏感性的参数有 RoughnessR、Decay Constant、N-Perv 等 3 个参数;在暴雨情景下表现出中等敏感性而在大暴雨情景下不敏感参数有 Drying Time、MaxRate、S-Perv、RoughnessP、N-Imperv 等 5 个参数;其余 3 个参数不论在何种暴雨情景下均无敏感性。与径流总量一样,RoughnessR 也是洪峰流量第一敏感参数,其灵敏度为  $-0.870\ 6\sim-0.592\ 4$ ;随着降雨量的增加,该参数对洪峰流量的负响应越小。这种现象可能是 SWMM 模型中运用运动波演算所致<sup>[4,32]</sup>。第二敏感参数为 Decay Constant,第三敏感参数为 N-Perv。但本研究中 3 场暴雨情景下 MinRate 均无敏感性,原因可能是 MinRate 决定下渗形成地下径流的量,在 3 场暴雨情景下土壤处于饱和状态,入渗

形成的地下径流汇流速度远远小于地面径流,地下径流产生的径流峰值会滞后,因此对地面汇流形成的洪峰流量几乎没有影响。

#### 4.3 全局与局部敏感性分析比较

本研究中采用 GLUE 方法与修正 Morris 筛选法对济南市主城区 SWMM 模型 11 个参数进行全局与局部敏感性分析。通过 GLUE 方法筛选出 RoughnessR、Decay Constant、S-Imperv 为敏感参数,其中 RoughnessR 为最敏感参数。通过修正 Morris 筛选法得出对径流总量表现出中高敏感性的参数有 RoughnessR、Drying Time、Decay Constant、MaxRate、MinRate、S-Perv、RoughnessP 等 7 个参数,对洪峰流量表现出中高敏感性的参数有 RoughnessR、Decay Constant、N-Perv 等 3 个参数。上述两种方法均能筛选出 RoughnessR、Decay Constant 为中高敏感性参数,说明两种方法对 SWMM 模型进行参数敏感性分析具有某种程度的一致性。

从分析结果来看,分析方法的选择对模型参数的敏感性有一定影响<sup>[33]</sup>。GLUE 方法采用不确定性理论,使其得出的敏感性结果是多组具有“异参同效”特征的参数组合,即对于选定的模型结构,多个参数组合均可达到相同且最优的模拟结果;这种方法优于修正 Morris 筛选法得出的确定性单一最优结果,在应用时可避免使用单一参数组合带来的洪水预报决策风险,更具实际意义。

从分析方法来看,GLUE 方法是以统计的方法定性分析出敏感性参数,从而确定参数的最优取值范围;修正 Morris 筛选法则是定量计算出各个参数的敏感性判别因子并进行等级划分与排序。两种方法均可以提高后续的参数率定工作效率,具体选择哪一种分析方法依据研究目的而定。

## 5 结 语

本文以山东省济南市主城区为研究对象构建 SWMM 模型,分别采用 GLUE 方法和修正 Morris 筛选法对模型参数进行敏感性分析,并对对比分析两种方法异同点。

(1)采用 GLUE 方法的全局敏感性分析和采用修正 Morris 筛选法的局部敏感性分析均能准确识别出 SWMM 模型的敏感参数。两种方法均表明 RoughnessR 与 Decay Constant 为敏感参数,其余参数敏感性则根据研究对象与暴雨强度的不同而变化。敏感参数对模型模拟结果影响显著,应在率定时重点关注。

(2)GLUE 方法可得出多组模拟效果相同且较好的参数组合,说明模型模拟结果的好坏并不取决于单个参数,而是由参数组合决定的,体现出参数间相互作用对模型模拟结果的影响,这能够很好地解释模型“异参同效”现象。

(3)修正 Morris 筛选法可对 SWMM 模型参数的局部敏感性进行精确识别,量化排序各参数敏感性等级,但该方法忽略了参数间的相互作用,仅考虑了单个参数的作用效果。

(4)在实际应用中,如果只需判断哪些参数为敏感参数,建议使用 GLUE 方法;如果需要得出参数敏感性的细化分类以及高低排序,修正 Morris 筛选法则具有较大的优势。两种方法各有优点,均可作为参数率定环节及后续模型应用阶段提供理论依据。

SWMM 模型中参数经过率定后,如在各个子汇水区均采用统一的参数值,会使模型产生一定的系统误差。目前的研究缺乏细化城市下垫面的相关工作,在较大的研究区内,各个水文响应单元应根据不同的城市地表特性对参数分别进行率定和验证,以进一步提高模型模拟结果的准确性。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 徐宗学,叶陈雷.从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20.  
XU Zong-xue, YE Chen-lei. From “Looking at Sea in City” to “Looking at River in City”: Simulation and Risk Analysis of Flood and Waterlogging Process in Fuzhou City Under Extreme Rainstorm Scenarios[J]. China Flood and Drought Management, 2021, 31(9): 12-20.
- [2] 徐宗学,李 鹏.城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J].水资源保护,2022,38(1):7-17.  
XU Zong-xue, LI Peng. Progress on Hydrological Response to Urbanization: Mechanisms, Methods and Solutions[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17.
- [3] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等.城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J].水资源保护,2020,36(6):1-6.  
HUANG Guo-ru, LUO Hai-wan, LU Xin-xiang, et al. Study on Risk Analysis and Zoning Method of Urban Flood Disaster[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6.
- [4] 周晓喜.城市雨水管网模型参数优化及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.



- ZHOU Xiao-xi, Research on Parameter Optimization and Application of Urban Stormwater Pipe Network Model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [5] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61.
- XU Zong-xue, CHENG Tao. Basic Theory for Urban Water Management and Sponge City: Review on Urban Hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61.
- [6] 赵月,张建丰,李涛,等.降雨径流模型的参数敏感性分析与方法比较[J].中国给水排水,2021,37(7):114-120.
- ZHAO Yue, ZHANG Jian-feng, LI Tao, et al. Parameter Sensitivity Analysis and Method Comparison of Rainfall Runoff Model[J]. China Water and Wastewater, 2021, 37(7): 114-120.
- [7] TANG Y, REED P, VAN WERKHOVEN K, et al. Advancing the Identification and Evaluation of Distributed Rainfall-runoff Models Using Global Sensitivity Analysis[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): 1-14.
- [8] YOGI F, PENSA CORREA C J, ARRUDA E M, et al. Sensitivity Analysis of Rainfall-runoff Parameters Models to Estimate Flows[J]. Applied Water Science, 2021, 11(2): 25.
- [9] LI M, DI Z, DUAN Q. Effect of Sensitivity Analysis on Parameter Optimization: Case Study Based on Streamflow Simulations Using the SWAT Model in China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126896.
- [10] LI N, KINZELBACH W, LI H, et al. Improving Parameter and State Estimation of a Hydrological Model with the Ensemble Square Root Filter[J]. Advances in Water Resources, 2021, 147(4): 103813.
- [11] 邓陈宁.不同空间尺度城市低影响开发的环境水文效应模拟[D].西安:西安理工大学,2018.
- DENG Chen-ning. Simulation of Environmental Hydrological Effects of Urban LID in Different Spatial Scales[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [12] CHEN Y, LIU G, HUANG X, et al. Development of a Surrogate Method of Groundwater Modeling Using Gated Recurrent Unit to Improve the Efficiency of Parameter Auto-calibration and Global Sensitivity Analysis[J]. Journal of Hydrology, 2020, 598: 125726.
- [13] 宋晓猛,张建云,占车生,等.水文模型参数敏感性分析方法评述[J].水利水电科技进展,2015,35(6): 105-112.
- SONG Xiao-meng, ZHANG Jian-yun, ZHAN Che-sheng, et al. Review of Methods of Parameter Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 105-112.
- [14] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等.基于Sobol方法的SWMM模型参数敏感性分析[J].水力发电学报,2018,37(3):59-68.
- CHANG Xiao-dong, XU Zong-xue, ZHAO Gang, et al. Sensitivity Analysis on SWMM Model Parameters Based on Sobol Method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 59-68.
- [15] FREER J, BEVEN K, AMBROISE B. Bayesian Estimation of Uncertainty in Runoff Prediction and the Value of Data: An Application of the GLUE Approach[J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2161-2173.
- [16] 王京晶,徐宗学,赵刚,等.基流分割对城市雨洪过程模拟的影响研究——以济南市主城区为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):776-783.
- WANG Jing-jing, XU Zong-xue, ZHAO Gang, et al. Effect of Baseflow Separation on Simulation of Urban Rainfall Runoff Processes: Case of the Metropolitan Area, Jinan[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 776-783.
- [17] 史蓉,赵刚,庞博,等.基于GLUE方法的城市雨洪模型参数不确定性分析[J].水文,2016,36(2): 1-6.
- SHI Rong, ZHAO Gang, PANG Bo, et al. Uncertainty Analysis of SWMM Model Parameters Based on GLUE Method[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 1-6.
- [18] 李伟雨.基于SWMM模型的悦来会展城雨洪模拟研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- LI Wei-yu. Study on Stormwater Simulation in Convention and Exhibition City of Yuelai Based on SWMM[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [19] 史蓉,庞博,赵刚,等. SWMM模型在城市暴雨洪水模拟中的参数敏感性分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(5):456-460.
- SHI Rong, PANG Bo, ZHAO Gang, et al. Analyzing Parameter Sensitivity for the SWMM Model in Urban Storm Water Simulation[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(5): 456-460.
- [20] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等.暴雨洪水管理模型参数

- 敏感性分析方法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6):11-21.
- LIAO Ru-ting, XU Zong-xue, YE Chen-lei, et al. Study on Parameter Sensitivity Analysis Method of Storm Water Management Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6):11-21.
- [21] 赵彦军, 徐宗学, 赵 刚, 等. 城市化对济南小清河流域产汇流的影响研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10):35-46.
- ZHAO Yan-jun, XU Zong-xue, ZHAO Gang, et al. Impact of Urbanization on Regional Rainfall-runoff Processes in Xiaoqing River Basin, Jinan[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10):35-46.
- [22] 冯仕远. 城市增长背景下济南市城区洪涝模拟研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
- FENG Shi-yuan. Flood Simulation and Impact Assessment Under Future Urban Sprawl in Jinan City[D]. Jinan: Jinan University, 2019.
- [23] 程 涛, 徐宗学, 洪思扬, 等. 济南市山前平原区暴雨内涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2):246-253.
- CHENG Tao, XU Zong-xue, HONG Si-yang, et al. Simulating Rainstorm Waterlog in Piedmont Plains in Jinan City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2):246-253.
- [24] 张宝祥. 雨洪管理目标下的既有住区室外空间设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- ZHANG Bao-xiang. Study on Outdoor Space Design of Existing Settlements Under the Target of Storm-water Management; Taking Dalian as an Example [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [25] 黄国如, 冯 杰, 刘宁宁, 等. 城市雨洪模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- HUANG Guo-ru, FENG Jie, LIU Ning-ning, et al. Urban Storm Water Model and Its Application[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2013.
- [26] 常晓栋, 徐宗学, 赵 刚, 等. 山前平原型城市雨洪模拟与应用: 以济南市为例[J]. 水力发电学报, 2018, 37(5):107-116.
- CHANG Xiao-dong, XU Zong-xue, ZHAO Gang, et al. Simulation of Urban Rainfall-runoff in Piedmont Cities; Case Study of Jinan City, China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(5):107-116.
- [27] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0 [M]. Cincinnati: EPA, 2010.
- [28] BEVEN K, BINLEY A M. The Future of Distributed Models; Model Calibration and Uncertainty Prediction [J]. Hydrological Processes, 1992, 6(3):279-298.
- [29] BEVEN K, FREER J. Equifinality, Data Assimilation, and Uncertainty Estimation in Mechanistic Modelling of Complex Environmental Systems Using the GLUE Methodology[J]. Journal of Hydrology, 2001, 249(1/2/3/4):11-29.
- [30] PAPPENBERGE F, BEVEN K, DE ROO A D, et al. Uncertainty Analysis of the Rainfall Runoff Model LisFlood Within the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation(GLUE)[J]. International Journal of River Basin Management, 2004, 2(2):123-133.
- [31] 苏海龙. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- SU Hai-long. Urban Rain Flood Simulation Research Based on SWMM Model; A Case Study of Xiaozhai District in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [32] 付 超. 基于 SWMM 模型的邯郸某区城市内涝模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- FU Chao. Simulation of Urban Waterlogging of Certain District in Handan Based on SWMM Model[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [33] TANG Y, REED P, WAGENER T, et al. Comparing Sensitivity Analysis Methods to Advance Lumped Watershed Model Identification and Evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(2):793-817.