

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.017

降雨径流模型的参数敏感性分析与方法比较

赵 月¹, 张建丰¹, 李 涛¹, 夏 威²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 水利部珠江水利委员会技术咨询
中心, 广东 广州 510611)

摘 要: 参数的识别是决定模型模拟结果质量的主要因素,为了识别 SWMM 模型中 12 个主要参数的敏感性强弱,以西安理工大学金花校区为例,采用 Morris 局部敏感性分析和 GULE 全局敏感性分析两种方法,对 SWMM 模型的参数进行不确定性分析。结果表明,采用 Morris 局部敏感性分析方法,管道糙率与不透水率为高敏感性参数;透水区曼宁糙率、透水区洼蓄量以及 Horton 入渗方程相关的系数都为不敏感性参数。在 GULE 全局敏感性分析方法中,不透水率与管道糙率两个参数对模型的敏感性较高,其余参数均具有弱敏感性。Morris 局部敏感性分析方法能够定量分析敏感性强弱,GULE 全局敏感性分析方法以统计的方法定性分析可避免“唯一最优”,以上两种方法对 SWMM 模型的参数识别以及识别方法的选择具有参考意义。

关键词: SWMM; 参数敏感性; 局部分析法; 全局分析法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0114-07

Parameter Sensitivity Analysis and Method Comparison of Rainfall Runoff Model

ZHAO Yue¹, ZHANG Jian-feng¹, LI Tao¹, XIA Wei²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Technical Consulting Center of Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Parameter identification is the main factor that determines the quality of the simulation results. In order to identify the sensitivity of 12 main parameters in storm water management model (SWMM) in Jinhua campus of Xi'an University of Technology, the uncertainty of parameters in SWMM was classified by Morris local sensitivity analysis method and GULE global sensitivity analysis method. The results of Morris local sensitivity analysis indicated that Con-Mann and Imperv were high sensitive parameters, while N-perv, Dstore-perv and coefficients related to Horton infiltration equation were all insensitivity parameters. The results of GULE global sensitivity analysis indicated that two parameters (Imperv and Con-Mann) had higher sensitivity to the model, and the other parameters had weak sensitivity. Morris local sensitivity analysis method can quantitatively analyze the sensitivity, while GULE global sensitivity analysis method can avoid the “only optimal” by statistical qualitative analysis. The above two methods have reference significance for parameter identification of SWMM and selection of

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51609197); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JL084);
中国科学院“西部之光”西部青年学者人才培养计划项目(XAB2016AW06)

通信作者: 张建丰 E-mail: 269892317@qq.com

identification methods.

Key words: SWMM; parameter sensitivity; local analysis method; global analysis method

暴雨径流管理模型(SWMM)是美国环保署研制的动态分布式水文模型,能够对城市水系统进行综合模拟,主要模拟过程包括区域的产、汇流过程以及污染物的累积、冲刷过程,因此被国内外学者广泛使用。由于SWMM在现实环境中对降雨径流模拟具有多个过程耦合的复杂性,其参数很多且具有分布性,参数之间也表现出复杂的相关性,使得模拟结果的准确性随之降低。如何快速、准确地识别参数是SWMM在实际应用中首要解决的问题,对参数后期调整工作与提高模型预测可靠性有重要意义。

敏感性分析作为识别参数的有效辅助工具,可进一步提高模型预测的可靠性。局部敏感性与全局敏感性分析是SWMM模型参数识别的主要方法^[1-2]。其中,Morris筛选法^[2]作为局部敏感性分析方法的代表,表征单因子变量对模型整体的影响程度,最大的优点是计算复杂度较低、运用方便^[3-4]。全局敏感性分析运用参数采样覆盖整个参数的手段来表征多因子变量协同对模型整体的影响程度,主要包括多元回归法^[5]、Sobol法^[6]、傅里叶幅度灵敏度检验法(FAST)^[7]和最大似然法(GLUE)^[8],其中最大似然法应用不确定性理论,在一定程度上可以避免决策风险。尽管目前应用以上两种方法对模型参数进行了较多的分析,但在方法比较上略显不足,未能突出各自优点及适用性。为此,笔者基于SWMM,构建研究区域降雨径流系统,主要进行以下研究:①采用局部敏感性分析法(Morris筛选法)与全局敏感性分析法(GLUE)对SWMM中的12个主要参数进行敏感性分析;②针对Morris筛选法进行参数敏感性排序;③对比两种方法的分析结果,总结两种方法的优点及适用条件。

1 研究区域与模型概化

1.1 研究区域概况及监测方法

研究区域选取西安理工大学金花校区,总面积约为259 647 m²,其中,绿地、屋面、交通道路、水域、广场道路分别约占总面积的20.18%、29.68%、9.88%、0.16%、40.10%,经统计可得不透水率约为79.66%。研究区共有两个雨水排放口,位于西门排放口的排水管网采用雨污合流,北门以西附近的排放口的管网采用雨污分流。采用旋杯式流速仪监测

排放口断面的流速,并根据排放口宽度和断面水深计算流量。选取2017年9月27日的场次降雨用于敏感性分析,其降雨量为39.5 mm。

1.2 模型概化及参数取值

根据研究区域的土地、管网、地形等实际情况与资料,将其概化为35个子汇水区、46个排水井点、47条排水管线、2个排放口,综合排水系统概化结果见图1。其中,红色管渠GQ30~GQ47采用雨污合流,蓝色管渠GQ1~GQ29采用雨污分流。

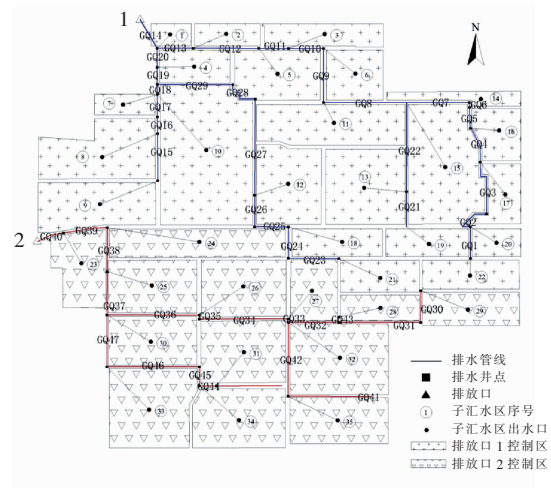


图1 研究区域的管网概化示意

Fig.1 General diagram of research area pipe network

SWMM模型参数主要分为两种,一种是确定性参数,可以直接测量、计算获得,包括坡度、排水管道管径和管长、汇水区面积等;另一种是不确定性参数,又可分为纯经验参数和具有一定意义的经验参数,其中纯经验参数主要包括曼宁糙率、洼地蓄积量等,这些参数无法直接测量,需根据实测资料查询并结合其取值范围来获得,而具有一定意义的经验参数主要包括渗透参数、冲刷系数、污染物增长等,这些参数因地而异,需根据相关实测资料进行推理拟合获取。本研究主要分析SWMM中的12个参数,其中确定性参数不透水率、坡度、特征宽度不进行率定,根据各个汇水区实测资料通过面积加权平均获得,3个参数的取值分别为73.72%、1.136%、50.93 m;其余参数以实测资料为准进行率定,使模拟结果与实测结果有较好的拟合度。参数的具体分类、获取方法以及率定值如表1所示。

表1 SWMM 模型的主要参数取值

Tab.1 Main parameters value of SWMM model

参数	率定值	取值范围	取值方法
不透水率 (Imperv)/%	—	40 ~ 100	CAD 图圈定
坡度 (Slope)/%	—	0 ~ 5.7	
特征宽度 (Width)/m	—	20 ~ 110	
不透水区曼宁糙率 (N - imperv)	0.011	0.01 ~ 0.033	参考文献、经验值
透水区曼宁糙率 (N - perv)	0.41	0.1 ~ 0.8	
不透水区注蓄量 (Dstore - imperv)/mm	2.54	0.2 ~ 10	
透水区注蓄量 (Dstore - perv)/mm	5.08	2 ~ 10	
无注蓄不透水区比例 (Zero - imperv)/%	25	5 ~ 30	依据实际管道属性
管道糙率 (Con - Mann)	0.012	0.011 ~ 0.015	
Horton 最大入渗率 (MaxRate)/(mm · h ⁻¹)	76.2	20 ~ 80	结合实测资料拟合
Horton 最小入渗率 (MinRate)/(mm · h ⁻¹)	0.5	0 ~ 10	
Horton 渗透衰减系数 (Decav)/h ⁻¹	4	2 ~ 7	

选取 2017 年的两场降雨输入模型,同时对排放口 1 的流量变化过程进行监测,用于模型的校准,结果见图 2。并通过计算模拟结果与实测结果的平均相对误差来考察模拟精度,两场降雨的平均相对误差分别为 13.27%、16.97%,符合水文水力模块偏差控制在 20% 以内的要求;排放口 2 的汇流区域为雨污合流制,流量难以监测,本研究采用刘兴坡^[9]提出的基于径流系数的模型参数校准方法,两场降雨模拟与实际综合径流系数差异性计算结果分别为 4.88%、-1.47%,计算偏差值在 ±5% 以内。以上表明所建 SWMM 模型具有良好的预测精度。

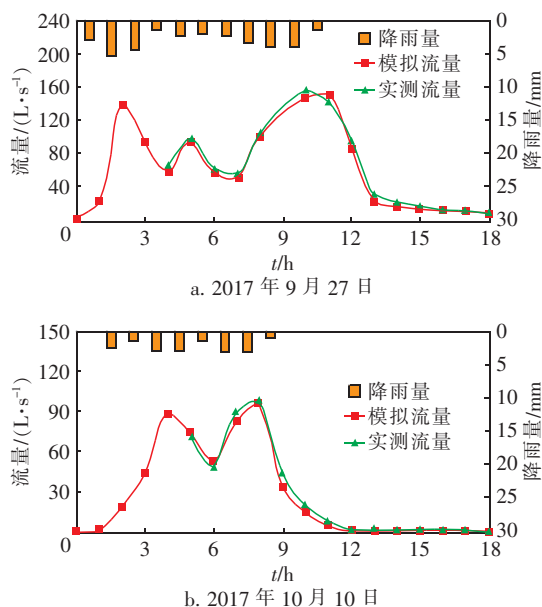


图2 2017年9月27日和10月10日的流量过程线

Fig.2 Outlet 1 flow duration curve on Sep. 27 and Oct. 10, 2017

2 分析方法

2.1 局部敏感性分析方法

Morris 筛选法是局部敏感性分析法的典型代表,其原理是在其他参数保持不变的基础上,选取一个参数在其取值区间内上下随机扰动,分析该参数代入目标函数中运行的结果变化对目标函数的影响,可将该参数的局部敏感性量化为如下公式:

$$e_i = (Y^* - Y) / \Delta_i \quad (1)$$

式中: Y 为参数改变前目标函数的计算值; Y^* 为参数改变后目标函数的计算值; Δ_i 为参数的改变量; e_i 为 Morris 系数,用来衡量参数的敏感性指标。

相比 Morris 筛选法,将待分析参数以固定步长增减是修正后 Morris 筛选法的主要改进之处,同时引入模型率定模拟结果,计算参数多次变化对目标函数影响的均值,最后得出参数的敏感性指标 S :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} (Y_{i+1} - Y_i) / Y_0 / (P_{i+1} - P_i) / 100 / (n - 1) \quad (2)$$

式中: Y_i 、 P_i 分别为模型运行至第 i 次的输出值及参数较初始参数值的调整比率; Y_{i+1} 、 P_{i+1} 分别为模型运行至第 $i+1$ 次的输出值及参数较初始参数值的调整比率; n 为模型运行次数。

采用修正后 Morris 筛选法基于参数的初步率定值,对表 1 中的某一参数以 10% 的步长进行扰动。洪峰流量和洪水总量是 SWMM 模型中表征地表径流变化过程的重要指标,同时对于应用模型进行预测和评价也十分重要^[10]。因此,本研究选择 2017 年 9 月 27 日的一场独立降雨,以两个排放口的洪峰流量和平均流量为目标值,分析各参数对于研究区

地表径流变化过程的敏感程度。

将各参数扰动后的模拟值分别代入式(1)和式(2),循环求出每个待分析参数的 Morris 系数值 e_i 以及敏感性指标 S_i ,评判指标依据 Lenhart^[11] 和 Knighton^[12] 等人的灵敏性分级标准,即:① $|S_i| > 1$,高敏感性参数;② $0.2 < |S_i| < 1$,敏感性参数;③ $0.05 < |S_i| < 0.2$,中等敏感性参数;④ $0 < |S_i| < 0.05$,不敏感性参数。

2.2 全局敏感性分析方法

全局敏感性分析方法选取以贝叶斯理论为基础的最大似然法(GLUE),其基本原理为:基于随机采样,利用模型模拟在参数取值范围内获取的随机参数组合值,并根据目标函数计算随机参数组合的模拟值与实测值的似然度值和累积似然度值。

本研究中全局敏感性分析采用拉丁超立方作为采样方法,以 Nash-Sutcliffe 系数(简称 NS 值)作为目标函数来估计模拟值与实测值的吻合程度,并将吻合程度进行归一化处理。当 $NS < 0$ 时,认为模拟值与实测值无关联;当 NS 值越趋近 1 时,表明模拟值与实测值的吻合程度越高,反之则越差。

针对表 1 中的 12 个参数,对各个参数在取值范围内进行 1 000 次随机抽样,并打乱样本值,随机组成 1 000 组模拟参数组,对符合一定似然度的结果($NS \geq 0$)进行分析,进而对各个函数的取值范围合理划分单位区间,对符合似然度结果的散点数进行统计,并计算各区间内散点的概率及概率密度,根据贝叶斯理论并结合黄国如等人^[13]的研究方法,以均一分布为先验分布,计算的参数似然度为后验分布,绘制各参数的概率密度图和累积概率密度图。

3 结果分析

3.1 局部敏感性分析

局部敏感性分析根据式(2)计算得到的敏感性指标 S 如表 2 所示(扰动值为 10%)。管道糙率与不透水率对排放口洪峰流量和平均流量的影响都较大,其敏感性指标 S 均大于 0.2,属于敏感性参数,尤其是对于排放口 1 的洪峰流量,管道糙率对其影响最大, $S > 1$,属于高敏感性参数,分析原因,排放口 1 的汇流区域采用的是雨污分流制,管壁受到降雨径流过程中产生少量沉淀物的影响较小,因此管道糙率在此过程中为高敏感性参数。这与陈馨^[14]在重庆交通大学南岸的研究结果不同,其研究表明不透水率为不敏感性参数、不透水区曼宁糙率为敏感

性参数,造成敏感性分析结果不同的原因是其选用的下渗模型为 Green-Ampt 模型,而本研究采用的是 Horton 模型,证明不同下渗模型的选择对敏感性分析结果影响很大,这也提醒研究者在进行参数敏感性分析时注意不同下渗模型之间的差异。

表 2 局部敏感性分析法中各参数的敏感性指标

Tab. 2 Sensitivity parameters of local sensitivity analysis

项 目	排放口 1		排放口 2	
	洪峰流量	平均流量	洪峰流量	平均流量
特征宽度	0.122 5	-0.176 0	0.235 6	-0.144 0
管道糙率	-1.574 7	-0.568 7	-0.450 5	-0.514 5
坡度	-0.000 1	-0.085 2	0.107 9	-0.075 6
不透水率	0.485 2	0.749 1	0.453 4	0.793 2
不透水区曼宁糙率	-0.113 2	0.148 8	-0.141 1	0.131 1
透水区曼宁糙率	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
不透水区注蓄量	0.000 3	-0.080 5	-0.112 0	-0.086 0
透水区注蓄量	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
无注蓄不透水区比例	-0.000 3	0.045 7	0.014 4	0.054 9
入渗衰减系数	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
最大入渗率	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
最小入渗率	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

不透水区曼宁糙率与特征宽度对两个排放口洪峰流量和平均流量的影响仅次于管道糙率与不透水率, S 均大于 0.05,属于中等敏感参数,这与黄金良等人^[2]对 2005 年 11 月 14 日的降雨研究结果相似,而与其他两场降雨(2005 年 8 月 24 日和 2006 年 4 月 28 日)的研究结果不同,这是因为 2005 年 11 月 14 日的降雨强度与本次试验的降雨强度相近,其他两场降雨强度相差较大,这也反映了降雨强度对于研究区域降雨径流模型模拟结果造成的影响是很大的,表明城市降雨径流模拟在现实环境中具有复杂性和综合性,印证了 Drechsler^[15]的相关研究。

透水区曼宁糙率、透水区注蓄量及 Horton 入渗方程相关的系数(最大入渗率、最小入渗率和入渗衰减系数),对排放口 1 和 2 均为不敏感参数,其敏感性指标均为 0,这与黄金良等^[2]在 2005 年 11 月 14 日的降雨中运用 Morris 筛选法分析的结果相似。

根据表 2 可以得到各参数的敏感性排序:管道糙率 > 不透水率 > 特征宽度 > 不透水区曼宁糙率 > 不透水区注蓄量 > 坡度 > 无注蓄不透水区比例 > 透

水区曼宁糙率 = 透水区注蓄量 = 最大入渗率 = 最小入渗率 = 入渗衰减系数。

3.2 全局敏感性分析

图3为SWMM模型中主要参数的似然度分布

散点图,除了不透水率与管道糙率以外,其余10个参数的似然度分布散点图类似,限于篇幅,本研究仅列出不透水率、管道糙率和特征宽度的似然度分布散点图。

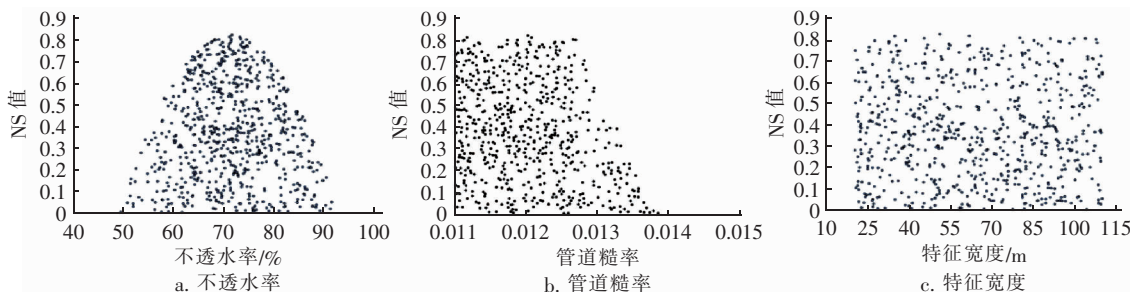
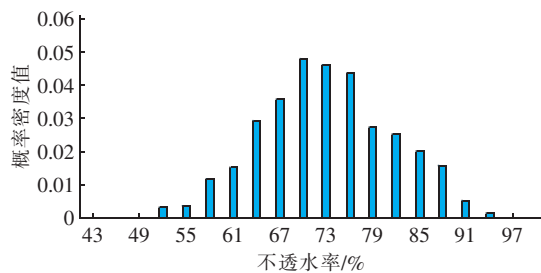


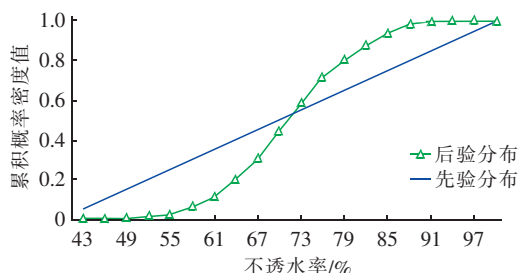
图3 SWMM模型参数的似然度分布

Fig. 3 Parameter likelihood distribution of SWMM model

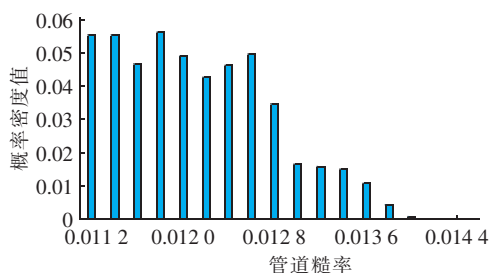
分析各参数的似然度分布图发现,先验分布与后验分布除不透水率和管道糙率的差异较大外,其余参数大致相同,限于篇幅,本研究仅列出不透水率、管道糙率、特征宽度的概率密度和累积概率密度分布图,如图4所示。



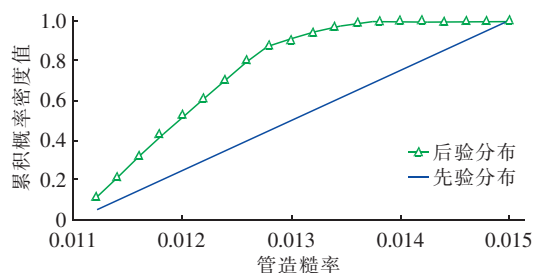
a. 不透水率的概率密度



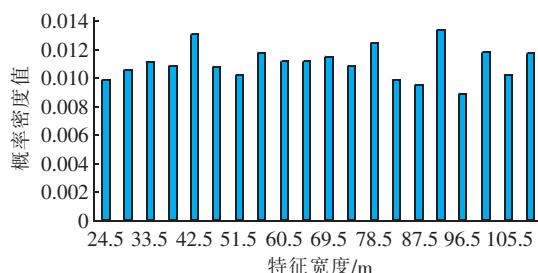
b. 不透水率的累积概率密度



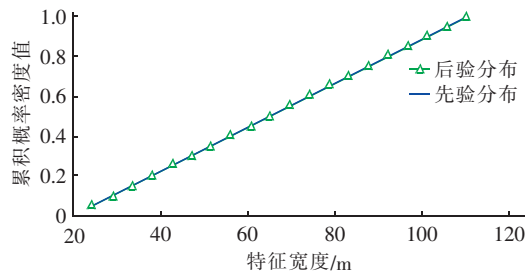
c. 管道糙率的概率密度



d. 管道糙率的累积概率密度



e. 特征宽度的概率密度



f. 特征宽度的累积概率密度

图4 参数的概率密度及累积概率密度

Fig. 4 Probability density diagram and cumulative probability density diagram of parameters

从图4可见,不透水率的概率密度呈正态分布,管道糙率呈梯形分布,并且在累积概率密度图中,两

者的后验分布与先验分布差异很大,为高敏感性参数。其余10个参数呈均一分布,且后验分布和先验分布基本一致,均为低敏感性参数。史蓉^[16]和赵冬泉^[8]等采用GLUE方法对SWMM参数的敏感性分析结果显示,不透水区注蓄量、不透水率及管道糙率为强敏感性参数,其他参数为低敏感性或不敏感参数,本研究中不透水区注蓄量与其分析结果不同,这主要是因为参数的敏感性强弱会随着研究区土地利用类型、所划分功能区和降雨的变化而变化。

通过分析两个高敏感性参数不透水率、管道糙率的敏感性分析区间发现,当不透水率取值在区间(58%, 88%)内、管道糙率取值在区间(0.011, 0.013)时,两者NS值>0的累积概率密度分别可达0.924与0.906。不透水率取值在该区间以外对应的NS值均小于0.4,其取值范围可由(40%, 100%)缩小至(58%, 88%);管道糙率取值在该区间以外对应的NS值均小于0.5,其取值范围可由(0.011, 0.015)缩小至(0.011, 0.013)。这在参数率定工作时,可为高敏感性参数的取值范围提供更加精准的数据,有助于提高建模效率。

通过对NS值>0.8的高似然度区间所包括的参数组进行统计,发现共有8组具有“异参同效”的参数组合,比传统方法的单一最佳参数组更具有实际意义。

3.3 局部与全局敏感性分析比较

本研究中局部敏感性分析与全局敏感性分析分别采用Morris筛选法与GLUE法,对SWMM水力模块的12个参数进行了敏感性分析,采用Morris筛选法得出管道糙率与不透水率为高敏感性参数,特征宽度与不透水区曼宁糙率为中等敏感性参数,采用GULE方法得到敏感性较强的参数为管道糙率和不透水率,两种方法同时确定出管道糙率与不透水率为高敏感性参数,而特征宽度和不透水区曼宁糙率仅在局部分析法中为中等敏感性参数,这主要是由于GULE法采用了不确定性理论以及概率统计的方法,使其得出的敏感性结果不是一组单一的最优参数,这种方法优于Morris筛选法得出的确定性的唯一最优结果,在应用时可避免使用最优参数带来的决策风险。

相比Morris筛选法,采用GULE全局敏感性分析法还可以缩小参数的取值范围,降低参数率定的工作量,参数更加精准的取值范围可应用至率定工

作或者再一次的全局敏感性分析中,进一步提高建模的效率与精度。

根据两种方法的敏感性分析结果,都可以简明直观地看出各个参数是否具备敏感性,但是GULE全局敏感性分析法只能对参数的敏感性作出定性分析,定量的比较则需要借助Morris筛选法计算敏感性指标S。

4 结论

① 采用GULE的全局敏感性分析法和采用Morris筛选的局部敏感性分析法均可以有效地分析SWMM模型参数的不确定性,并确定出其高敏感性参数,为参数率定环节提供了依据。

② 在SWMM模型中根据修正后的Morris筛选法的研究结果,管道糙率与不透水率为高敏感性参数,特征宽度、不透水区曼宁糙率为中等敏感性参数;在GULE方法中管道糙率与不透水率具有较强的敏感性。这些参数对模型的结果输出影响较大,因此在参数率定环节应仔细识别。

③ GULE法的全局敏感性分析法在综合优化方面有着显著优点,可以缩小参数的取值区间,为参数率定提供更准确的取值范围,提高建模精度,但未能对参数进行量化分析。

④ 修正后的Morris筛选法在量化敏感性参数方面有着巨大优势,可以对各个参数按照敏感性高低进行排序。

⑤ 在实践应用中,如需明确的参数排序,建议使用修正后的Morris筛选法的局部敏感性分析方法;如只需判断参数是否为敏感性参数,推荐使用GLUE法的全局敏感性分析方法。以上两种方法各有优点,可为SWMM模型的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 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 Institute of Civil Engineering and Architecture, 2012, 28(1): 45-48 (in Chinese).
- [2] 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,2007,27(4):549-553.

- HUANG Jinliang, DU Pengfei, HE Wanqian, *et al.* Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modeling [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 549 – 553 (in Chinese).
- [3] 张麟, 黄华兵, 王先伟, 等. 城市内涝模型参数灵敏度分析与方法比较[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(3): 129 – 134.
- ZHANG Lin, HUANG Huabing, WANG Xianwei, *et al.* Sensitivity analysis of urban flooding model parameters using local and global approaches [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(3): 129 – 134 (in Chinese).
- [4] 武欣然, 冯燕, 姬鹏杰, 等. 基于 SWMM 模型的参数灵敏度分析[J]. *中国水运(下半月)*, 2018, 18(4): 77 – 78.
- WU Xinran, FENG Yan, JI Pengjie, *et al.* Parameter sensitivity analysis based on SWMM model [J]. *China Water Transport*, 2018, 18(4): 77 – 78 (in Chinese).
- [5] 王浩昌, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(8): 725 – 729.
- WANG Haochang, DU Pengfei, ZHAO Dongquan, *et al.* Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(8): 725 – 729 (in Chinese).
- [6] 任启伟, 陈洋波, 周浩澜, 等. 基于 Sobol 法的 TOPMODEL 模型全局敏感性分析[J]. *人民长江*, 2010, 41(19): 91 – 94, 107.
- REN Qiwei, CHEN Yangbo, ZHOU Haolan, *et al.* Global sensitivity analysis of TOPMODEL parameters based on Sobol method [J]. *Yangtze River*, 2010, 41(19): 91 – 94, 107 (in Chinese).
- [7] VARELLA H, GUÉRIF M, BUIS S. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: the case of soil parameters and a crop model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(3): 310 – 319.
- [8] 赵冬泉, 董鲁燕, 王浩正, 等. 降雨径流连续模拟参数全局灵敏度分析[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 717 – 723.
- ZHAO Dongquan, DONG Luyan, WANG Haozheng, *et al.* Global sensitivity analysis of a rainfall-runoff model using continuous simulation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4): 717 – 723 (in Chinese).
- [9] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. *给水排水*, 2009, 35(11): 213 – 217.
- LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(11): 213 – 217 (in Chinese).
- [10] 夏威. 基于 LID 的非点源污染调控效果研究——以西安理工大学为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- XIA Wei. Based on the Control Effect Research of LID in Non-point Source Pollution—Illustrated by the Case of Xi'an University of Technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002, 27(9/10): 645 – 654.
- [12] 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.
- [13] 黄国如, 解河海. 基于 GLUE 方法的流域水文模型的不确定性分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(3): 137 – 142, 149.
- HUANG Guoru, XIE Hehai. Uncertainty analyses of watershed hydrological model based on GLUE method [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(3): 137 – 142, 149 (in Chinese).
- [14] 陈馨. 基于 SWMM 的水文参数敏感性分析[J]. *科技风*, 2016(9): 191 – 192.
- CHEN Xin. Sensitivity analysis of hydrological parameters based on SWMM [J]. *Technology Wind*, 2016(9): 191 – 192 (in Chinese).
- [15] DRECHSLER M. Sensitivity analysis of complex models [J]. *Biological Conservation*, 1998, 86(3): 401 – 402.
- [16] 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 (in Chinese).

作者简介: 赵月(1995 –), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事雨水利用方面的研究。

E-mail: 1145950064@qq.com

收稿日期: 2019 – 11 – 04

修回日期: 2020 – 04 – 28

(编辑: 刘贵春)