

城市雨洪模型参数不确定性分析及应用

代文江¹, 李江云^{1,2}

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 海绵城市建设水系统
科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对分布式城市雨洪模型的研究现状, 分析讨论了城市雨洪模型及其模拟结果的不确定性问题, 并以深圳市某独立排水片区为例, 采用 GLUE 方法分析 SWMM 模型参数的不确定性。首先构建排水区的 SWMM 模型, 针对敏感性参数随机生成多个参数方案, 通过 MATLAB 编程调用 SWMM 动态链接库多次进行参数率定, 以 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS) 大于 0.8 为阈值进行最佳参数方案的筛选, 得到置信度为 90% 的排水区径流量区间。研究结果表明, GLUE 方法能够分析出模型敏感性参数的不确定性, 此种模型不确定性研究方法可为实际工程提供更加科学的预测。

关键词: 城市雨洪模型; GLUE 方法; 不确定性分析; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)03-0109-05

Analysis and Application of Parameter Uncertainty of Urban Storm Water Model

DAI Wen-jiang¹, LI Jiang-yun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: According to the research status of distributed urban storm water model, the uncertainty of urban storm water model and its simulation results was analyzed and discussed. The uncertainty of SWMM model parameters was analyzed by GLUE method in an independent drainage area of Shenzhen City. The SWMM model in the drainage area was constructed, and multiple parameter schemes were generated randomly for sensitive parameters. Then, the SWMM dynamic link library was called by MATLAB programming for parameter calibration for several times. Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) higher than 0.8 was used as the threshold to screen the optimal parameter scheme, and the runoff interval in the drainage area with a confidence of 90% was obtained. The GLUE method could analyze the uncertainty of model sensitivity parameters, and the proposed research method of model uncertainty provided more scientific prediction for practical engineering.

Key words: urban storm water model; GLUE method; uncertainty analysis; SWMM

水文模型作为一种对自然界水文现象进行概化与描述的工具, 其系统研究开始于 20 世纪 50 年代,

经历了从简单到复杂、从集总式到分布式、从经验模型到机理模型的发展历程, 但由于实际水文现象的

复杂性,水文模型在模拟过程中存在着一定的不确定性。20世纪90年代初,英国水文学家 Beven 对模型不确定性进行了研究^[1]。为了能更好地描述城市降雨径流和排水过程,城市雨洪模型的研究者试图选用更多的参数来得到更精确的模型结构^[2],但由于大量参数影响因素复杂且不易获取,导致了模拟结果的不确定性。因此,通过分析参数的不确定性来解释城市雨洪模型模拟结果的不确定性,一方面有利于模型应用者加深对模型参数的认识,另一方面也有利于提升模型的模拟精度及合理性。

我国当前对城市流域模拟应用较多的水文水力学模型有 SWAT、SWMM、SUSTAIN 及 InfoWorks ICM 模型。将此类分布式模型应用于城市降雨径流模拟面临一系列问题,主要是缺乏对复杂水文水力系统的深刻认识,以及多学科交叉等问题成为模型应用必须面对的难点^[3]。现阶段将分布式模型应用于城市流域主要面临的问题包括非线性问题、尺度问题和不确定性问题。其中,尺度问题主要表现在分布式模型的部分输入数据仅仅是点尺度上的参数化特征,而实际模拟过程中将这样的实测数据直接应用到模型计算单元上必然会产生误差;而非线性、不确定性问题主要表现在由于模型参数众多、物理结构复杂等造成的模拟的非线性和不确定特征。城市雨洪模型的不确定性包括模型输入、模型参数以及模型结构的不确定性^[4],笔者针对参数的不确定性进行了研究。

1 城市雨洪模型的不确定性分析

1.1 模型构建

模拟区域位于深圳市龙岗区东北部,地势属于低山丘陵滨海区,为亚热带海洋性季风气候,年平均降雨量为 1 935.8 mm,年平均降雨天数为 140 d,全年 86% 的雨量出现在汛期(4月—9月)。研究区域占地面积约为 7 hm²,其中有 65% 的生态用地,高程大多分布在 33~38.5 m(黄海高程),呈现北高南低的特点。排水体制为分流制,生活污水处理后全部作为中水回用,雨水排放至区域东部丁山河,区域内包含 1 个雨水排放口,同时有下凹式绿地、雨水花园、植草沟、透水铺装等多种 LID 设施,是典型的小区尺度地块。按照渗透性强弱集水区细分为透水性、半透水性和不透水性子汇水区。在实际情况下,由于半透水水面中包含砖石地面、绿地等,这些均存在不同程度的下渗,因此,在模型中采用不同大小的不

渗透区域百分比来处理这部分区域。

基于研究区域的实际情况建立 SWMM 模型,最终概化的模型包含 52 个子流域和 79 条排水管渠。模型概化过程中单独提取各个用地类型来计算面积和设置参数,对于提取后的不同类型用地,采用上海慧水科技有限公司的 HS-Data CAD 插件进行提取并计算其面积。结合《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中推荐的各汇水面综合径流系数参考值转化为不透水面积百分比,同时结合实际研究区域情况来确定各类型用地面积及不透水面积所占比例,具体如下:公共绿地面积为 2.162 hm²,不透水面积比例为 15%;居住用地面积为 0.235 hm²,不透水面积比例为 60%;工业用地面积为 0.445 hm²,不透水面积比例为 40%;商业金融用地面积为 1.178 hm²,不透水面积比例为 40%;行政办公用地面积为 0.479 hm²,不透水面积比例为 60%;市政道路及景观用地面积为 2.521 hm²,不透水面积比例为 10%。

选择 2018 年 8 月 11 日和 15 日的两场降雨进行研究,降雨数据来源于课题组在研究区域获得的数据,同时有相对应的径流数据,能够满足计算要求。其中,8 月 11 日的降雨为小雨,降雨量为 6.6 mm,降雨历时为 2 h,平均降雨强度为 3.3 mm/h;8 月 15 日的降雨为大雨,降雨量为 29.2 mm,降雨历时为 2 h,平均降雨强度为 14.6 mm/h。

1.2 GLUE 方法

GLUE 普适似然不确定性估计方法是由 Beven 和 Binley 于 1992 年提出的,其目的是用于分析水文模型参数的不确定性^[1]。GLUE 方法的基本思想为:在模型参数的先验分布范围内,利用随机采样的方法随机获取模型参数组合,利用选择的参数驱动模型进行模拟计算。模拟得到该参数组对应的模拟结果,选定似然函数并计算模型模拟结果与观测值之间的似然函数值,得到各参数组合的似然值。当用似然值表示预报概率时,在所有似然值中,根据经验设定一个阈值,低于该阈值的所有参数组对应的似然值被重新定义为零,表示这些参数组不能用于模型;高于阈值参数组对应的似然值则表示这些参数组能用于模型。对高于阈值的参数组,按照似然函数值由大到小排序,将结果标准化,得到某置信度下模型预报的不确定性范围。具体步骤如下:

步骤 1:定义似然函数。似然函数是判断模拟

值与实测值接近程度的函数,本研究选择 Nash - Sutcliffe 效率系数作为似然函数,表达式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (R_{obs,t} - R_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^T (R_{obs,t} - \overline{R_{obs}})^2} \quad (1)$$

式中: NS 为模拟流量序列的 Nash - Sutcliffe 效率系数; t 为模拟流量序列的时间; $R_{sim,t}$ 为模拟流量序列; $R_{obs,t}$ 为观测流量序列; $\overline{R_{obs}}$ 为观测流量序列的平均值。

步骤 2: 确定参数取值范围及先验分布函数。参数的先验分布越接近实际,模拟结果的收敛质量越好,但一般难以获得,因此在缺少资料的情况下可采用均匀分布作为参数的先验分布,结合模型手册和已有文献^[5],模型参数先验分布取值范围见表 1。

表 1 SWMM 模型水文水力参数及取值范围

Tab. 1 Hydrologic and hydraulic parameters of SWMM model and their value ranges

项 目	物理意义	取值范围
N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.005 ~ 0.02
N-Perv	透水区曼宁系数	0.05 ~ 0.45
S-Imperv/mm	不透水区注蓄量	0.1 ~ 2.5
S-Perv/mm	透水区注蓄量	2 ~ 8
PctZero/%	不透水区无注区所占比例	0 ~ 100
Max Rate/(mm · h ⁻¹)	最大渗透速率	25.4 ~ 100
Min Rate/(mm · h ⁻¹)	最小渗透速率	0.5 ~ 25.4
Infiltration Decay/h ⁻¹	渗透衰减系数	2 ~ 7
Manning-N	管道曼宁系数	0.005 ~ 0.02

步骤 3: 利用流域降雨、下垫面透水性等模型输入资料,在参数先验分布范围内随机选择参数组,计算输出参数并对比输出值和实测值,代入式(1)得到该参数组下的 NS(似然函数),基于阈值判断该参数组是否保留。

步骤 4: 重复步骤 3,得到一系列保留下来的似然值及对应的参数组,将保留下来的参数组分别代入模型进行模拟,得到这些参数组对应的累积径流分布,利用径流分布确定出一定置信水平下的置信区间,并对累积径流区间进行评价,反映出模型参数的不确定性。

根据上述步骤,利用 SWMM 模型提供给用户核心代码的动态链接库(DLL),用户可调用该动态链接库进行产汇流模拟计算。本研究采用 MATLAB 调用 SWMM 模型动态链接库,建立 SWMM 软件的 MATLAB 接口程序进行模拟计算。算法流程见图 1。

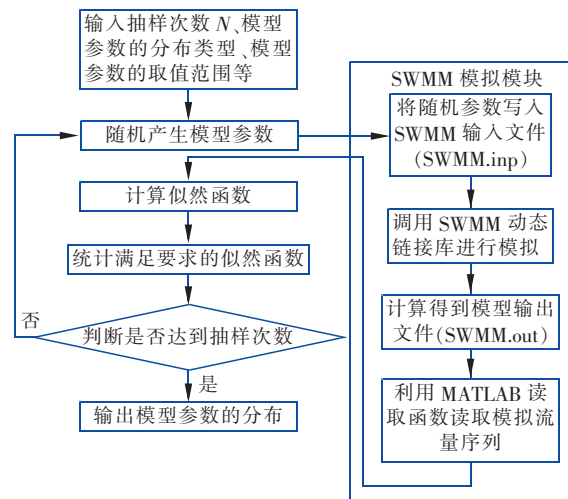


图 1 GLUE 方法应用于 SWMM 模型过程

Fig. 1 GLUE method applied to SWMM model process

2 计算结果与分析

2.1 参数敏感性分析

由于 SWMM 模型包含 9 个经验参数,对所有参数进行不确定性分析会大幅增加计算量,且对非敏感性参数进行不确定性分析也没有实际意义。因此在进行参数的不确定性分析之前,本研究先采用 Morris 筛选法进行参数敏感性分析,然后针对筛选出的敏感性参数进行不确定性分析及校核。本研究基于 MATLAB 平台,在实测降雨条件下,以总径流过程为输出变量,分析 SWMM 模型的参数敏感性,如图 2 所示。在小降雨情况下,敏感性排序前四的参数依次为最小渗透率、透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数及最大渗透率;在大降雨情况下,敏感性排序前四的参数依次为透水区曼宁系数、管道曼宁系数、最小渗透率及不透水区曼宁系数。在这些敏感性参数中,最小渗透率和最大渗透率为 Horton 产流模型的参数。

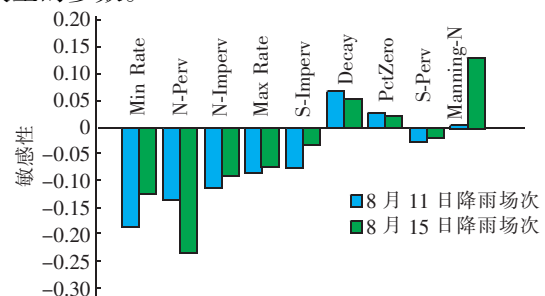


图 2 不同降雨场次下 SWMM 模型的参数敏感性

Fig. 2 Parameter sensitivity of SWMM for different rainfalls

2.2 参数不确定性分析

对筛选出的敏感性参数进行参数不确定性分析,利用随机采样方法获取模型参数组进行模拟,保留大于零的似然值所对应的参数组,分别作出不同场次降雨下参数与似然值的对应散点图,如图3和图4所示(1 500个参数组)。

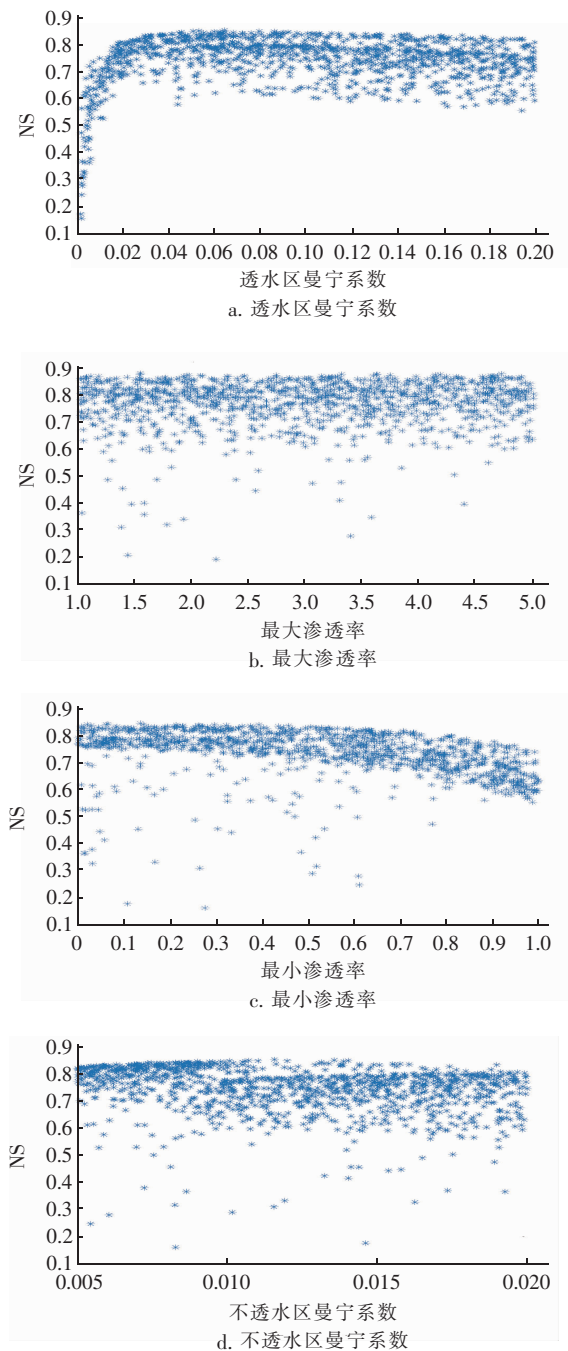


图3 8月11日场次降雨下参数与似然值的对应散点图
Fig.3 Scatter diagram of parameters and likelihood values under rainfall of August 11th

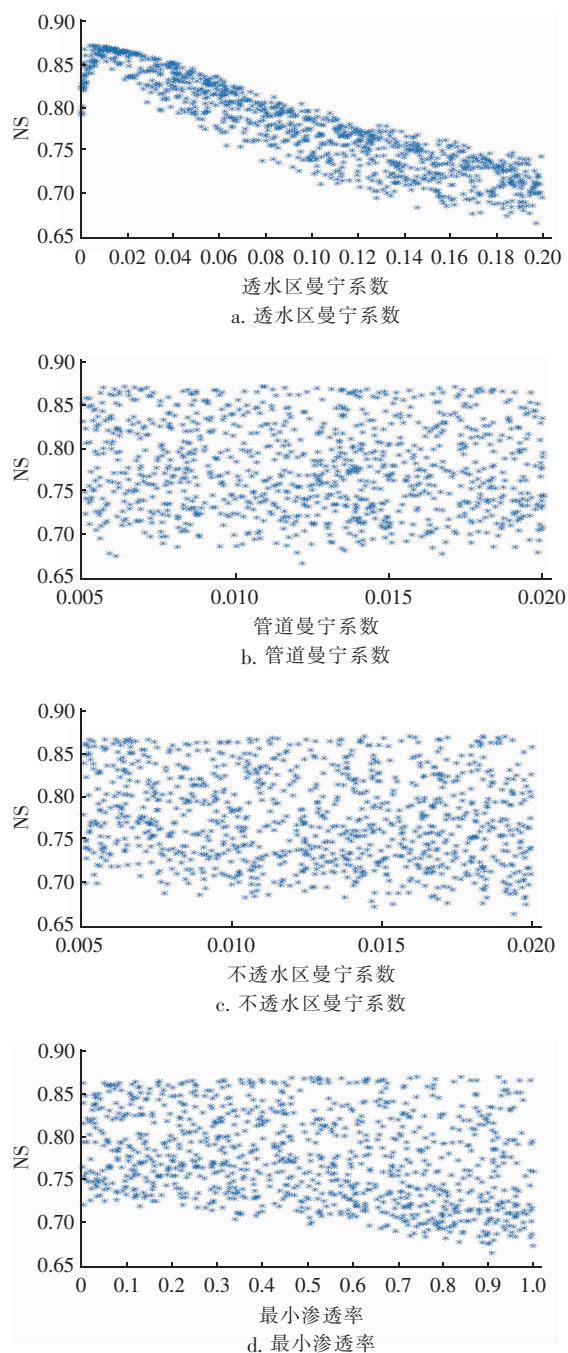


图4 8月15日场次降雨下参数与似然值的对应散点图
Fig.4 Scatter diagram of parameters and likelihood values under rainfall of August 15th

由图3和图4可以看出,除了透水区曼宁系数(N-Perv)在不同取值下NS系数有较大变化外,其他参数在不同取值下NS系数都没有明显的集中区域,由于参数的先验分布是均匀取值,而在后验分布中除了透水区曼宁系数外其他参数没有明显的高似然值对应取值集中区域,说明其他参数存在着一定

的异参同效性,在模型实际模拟过程中,作用的不是单个参数,而是参数的组合。

选择似然值 > 0.8 的第 284 组和第 341 组参数方案分别对两场降雨进行模拟,得到这些高似然值所对应的流量数据,求出置信度为 90% 的流量分布区间,如图 5 所示。

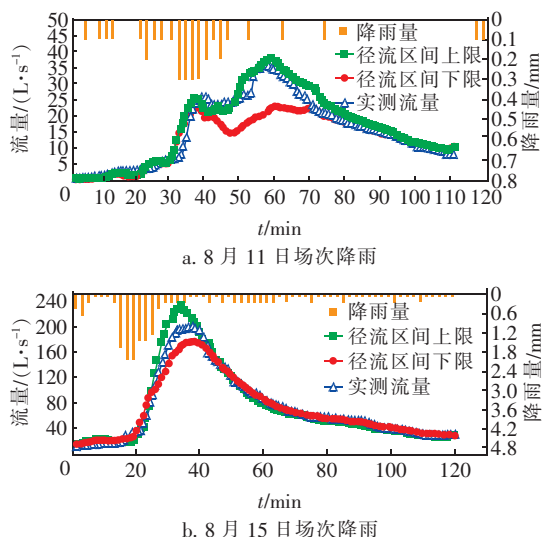


图5 不同场次降雨的模拟流量 90% 置信区间分布

Fig.5 90% confidence interval distribution of simulated flow under different rainfalls

本研究采用平均相对区间宽度 (ARIL) 来评估后验分布 90% 置信区间的优良性,平均相对区间宽度的计算方法如式(2)所示,ARIL 表征模拟结果的可靠性,ARIL 值越小,表明模拟结果越精确。

$$ARIL = \frac{1}{n} \sum \frac{Limit_{Upper,t} - Limit_{Lower,t}}{R_{obs,t}} \quad (2)$$

式中: n 为流量的时间序列长度; $Limit_{Upper,t}$ 、 $Limit_{Lower,t}$ 分别为 90% 置信区间的上、下边界。

结果显示,在似然值阈值为 0.8 时,也就是在 80% 的置信水平下,8 月 11 日场次降雨下的 90% 置信区间相对宽度为 14.93%,8 月 15 日场次降雨下的 90% 置信区间相对宽度为 10.57%,说明在 8 月 15 日场次降雨下的计算结果相对于 11 日场次降雨下的模型参数确定性更高,模拟结果更确定。

3 结论

分析了城市雨洪模型的研究进展和应用中存在的问题,通过 GLUE 方法和应用案例分析了 SWMM 模型在不同降雨下的参数不确定性,通过不确定性参数组的后验分布模拟得到径流过程的后验分布,

计算出模拟流量的 90% 置信区间,并采用平均相对区间宽度对置信区间的优良性进行了评估,结果表明,GLUE 方法可用于模型参数的不确定性分析,并能够实现概率预报下的不确定性区间。

参考文献:

- [1] Beven K, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrol Process, 1992, 6(3): 279-298.
- [2] 宋晓猛, 占车生, 孔凡哲, 等. 大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 396-406.
- [3] Song Xiaomeng, Zhan Chesheng, Kong Fanzhe, et al. A review on uncertainty analysis of large-scale hydrological cycle modeling system[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 396-406 (in Chinese).
- [4] Beven K. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer[M]. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012.
- [5] 王浩, 李扬, 任立良, 等. 水文模型不确定性及集合模拟总体框架[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 21-26.
- [6] Wang Hao, Li Yang, Ren Liliang, et al. Uncertainty of hydrological model and general framework of ensemble simulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 21-26 (in Chinese).
- [7] 盛旺. 基于 SWMM 模型参数敏感性分析及优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [8] Sheng Wang. Research on Parameter Sensitivity and Optimization Based on SWMM Model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (in Chinese).



作者简介: 代文江(1995-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为雨洪模型及管网优化。

E-mail: 2013301890011@whu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-14