

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.017

基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数全局敏感性分析

李美水, 杨晓华

(北京师范大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘 要: 以北京师范大学校园为研究区域,通过自行开发的 SWMM-UQ 模块采用 Sobol 方法对 SWMM 模型水量和水质参数进行全局敏感性分析。结果表明:①对于水量模拟参数,不透水面积比率(Pct-Imperv)、子汇水区特征宽度系数(K-Width)、管道曼宁系数(Manning-N)对模拟结果(目标函数)均呈现显著敏感性,这些参数对研究区的产汇流过程起着决定性的作用,是模型进行水量模拟的关键参数;②对于水质模拟参数,只有道路的最大累积量(R_MaxBulidup)、冲刷系数(R_WashoffCoef)和冲刷指数(R_WashoffExp)对模拟结果(目标函数)显著敏感,其余均不敏感,说明土地类型对水质模拟参数的敏感性有较大的影响;③无论是水量还是水质模拟参数,相对于参数的单一作用,参数的相互作用更大程度上影响着模型结果的变化。

关键词: SWMM 模型; 全局敏感性; Sobol 方法; 水量、水质模拟参数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0095-08

Global Sensitivity Analysis of SWMM Parameters Based on Sobol Method

LI Mei-shui, YANG Xiao-hua

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Global sensitivity of SWMM model parameters (water quantity and quality) in Beijing Normal University campus was analyzed through a self-developed SWMM-UQ (Storm Water Management Model - Uncertainty Quantification) Module. For simulation parameters of water quantity, the ratio of impervious area of subcatchment (Pct-Imperv), the width coefficient of subcatchment (K-Width) and the Manning coefficient of the conduit (Manning-N) showed significant sensitivity to the simulation results (objective function). These parameters played a decisive role in the process of rainfall and runoff of the study area, and they were the key parameters of the model for water quantity simulation. For the water quality simulation parameters, only the maximum buildup amount (R_MaxBulidup), the wash-off coefficient (R_WashoffCoef) and the wash-off exponent (R_WashoffExp) of the road were significantly sensitive to the simulation results, and the rest were not sensitive, indicating that the type of landuse had a greater impact on the sensitivity of water quality simulation parameters. Whether it was water quantity or water quality simulation parameters, the interaction of parameters affected the change of model results to a greater extent compared with the single action of parameters.

Key words: SWMM; global sensitivity; Sobol method; water quantity and quality simulation parameter

随着城镇化进程的加快,其原有的透水下垫面比例不断减少,改变了区域水文环境,导致城市洪涝灾害频发。通过模型对城市区域进行时空模拟,已是城市降雨径流定量化研究和影响评价管理最有效最直接的方法^[1]。在众多城市水文模型中,SWMM模型可动态模拟降雨径流量和水质变化过程,被视为最有效的城市雨洪管理数学模型工具,在国内外得到了广泛应用及二次开发^[2]。

模型在模拟过程中,会受到模型结构、模型参数和输入数据等不确定性因素的影响,不利于模型的精确模拟。敏感性分析是定性或定量研究数值模型的不同输入如何影响模型输出的过程,该过程有助于参数的识别,确定模型的参数不确定性来源等,已成为模型率定和验证之前必要的环节。敏感性分析可分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。其中,全局敏感性分析考虑整个参数空间的响应,可以观察不同参数之间的相互作用,适用于有“异参同效”现象的水文模型^[3]。截至2017年,很多学者利用Morris等方法对SWMM模型参数进行了局部敏感性分析,对其进行全局敏感性分析已成为研究重点和趋势^[4]。2008年,王浩昌等人利用逐步回归法在不同降雨强度条件下对SWMM模型部分水量模拟参数进行了全局灵敏度分析,为模型参数有效识别提供了基础^[5]。2011年,赵冬泉等人利用GLUE方法在长期连续模拟条件下对SWMM模型的水量和水质模拟参数进行了全局敏感性分析,为模型参数识别和降低参数不确定性提供了基础^[6]。2014年,朱嘉祺等人利用LH-OAT方法对SWMM模型参数敏感性进行了分析^[7]。2017年,段明印和王明汉等人分别利用偏相关方法和互信息法对SWMM模型水量模拟参数进行了全局敏感性分析,识别了敏感性参数^[8-9]。但以上仍缺乏参数的相互作用对模型结果影响的分析^[10]。

在众多的全局敏感性分析方法中^[4,11],Sobol方法是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法^[12],众所周知,基于方差方法的优点是能够量化单个参数的贡献和由参数相互作用产生的贡献,独立于输入-输出关系形式的假设。此外,基于方差的敏感度指数易于解释,因为它们可由输入的变化引起的

输出方差的分数来进行表示^[13-14]。相对于其他方法,其敏感性指数被证明能更有效分析探索具有高度非线性水文水质模型多参数之间的相互作用,可进行定性和定量分析,有助于对模型参数的敏感性识别、模型结构的优良诊断,促进模型的适宜性应用^[15-16],因此,笔者选用Sobol方法对SWMM模型参数进行全局敏感性分析。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

北京是典型的北温带半湿润性大陆季风气候,年均降雨量约为483.9 mm,但是降雨季节分配不均,80%的降雨集中在夏季。本次研究区域为北京市海淀区的北京师范大学校园,占地约为58 hm²,不透水下垫面面积约占64.7%。该区域位于建筑较密的中心城区,土地利用类型主要有建筑用地、绿地、铺装、道路和操场,占地比例分别为31.0%、20.4%、33.2%、10.6%和4.8%。

1.2 SWMM模型

SWMM是1971年由美国环境保护署(USEPA)开发的用于城市降雨径流量、水质模拟和管理的模型,主要包括水文水力模块和水质模块。它是一个主要用在城市区域进行短时间(场次)或长时间(连续)序列降雨的水量、水质模拟模型。该模型以划分的子汇水区为水文响应单元,根据土地利用条件可以分为透水区和不透水区两部分,其中,不透水区又可以分为有洼可蓄水和无洼不可蓄水两部分。每个子汇水区接收降雨,通过下渗和填洼等损耗后产生径流,地表径流又冲刷地表旱季累积的污染物产生污染负荷,然后径流携带污染物经过管道、河流、蓄水池、水泵和调节器等输送,最终由排水口排出研究区域^[2]。

结合研究区域下垫面的特征以及管网布局,利用ArcGIS 10.2对其进行概化,包括管网概化、子汇水区划分和基础参数的设定,然后利用编程生成SWMM输入文件,即.inp文件。研究区域被概化为71个子汇水区、142个节点和5个出水口(见图1)。在每个子汇水区中设置从透水部分流到不透水部分的百分数为35%,该模型选用Horton下渗模型,管网汇流演算使用动力波法。主要水文水力模块的参

数见表 1。其中子汇水区特征宽度 (Width), 通过公式 $Width = K - Width \times \sqrt{Area}$ ($0.2 < K - Width < 5$)^[2] 进行计算。为简化 SWMM 模型的水质参数敏感性分析过程, 将屋顶、铺装和操场均概化为道路, 因此研究区域中只有道路和绿地两种土地利用类型。以污染物 TN 为例, 利用饱和函数模型对污染物的累积过程进行模拟, 利用指数函数模型对污染物的冲刷过程进行模拟, 根据实际情况设定雨前干旱天数, 降雨中污染物浓度为 0, 道路的污染物清扫去除效率为 30%。根据模型用户手册和相关参考文献确定水量和水质模拟参数的取值范围和初始值, 分别见表 1 和表 2。

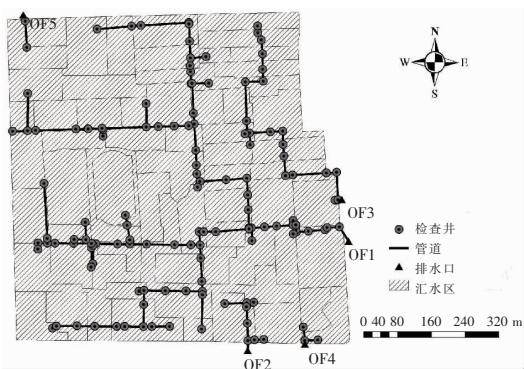


图 1 研究区域概化示意

Fig. 1 Generalized distribution of study area

表 1 SWMM 模型主要水量模拟参数

Tab. 1 Main parameters of SWMM water quantity simulation

类别	参数名称	编号	物理意义	取值范围	初始值
汇流相关参数	K - Width	1	子汇水区特征宽度系数	0.2 ~ 5	2.6
	Slope	2	子汇水区平均坡度/%	0.3 ~ 2	1.15
	Pct - Imperv	3	不透水面积比率/%	30 ~ 80	55
	N - Imperv	4	不透水地表曼宁系数	0.011 ~ 0.15	0.013
	N - Perv	5	透水地表曼宁系数	0.05 ~ 0.8	0.425
	S - Imperv	6	不透水地表洼蓄量/mm	1.27 ~ 2.54	1.91
	S - Perv	7	透水地表洼蓄量/mm	2.54 ~ 7.62	5.08
	Pct - Zero	8	不透水无洼地蓄水地表比例/%	50 ~ 80	65
下渗相关参数	MaxRate	9	最大入渗率/(mm · h ⁻¹)	50 ~ 200	125
	MinRate	10	最小入渗率/(mm · h ⁻¹)	0 ~ 20	10
	Decay	11	入渗衰减系数	2 ~ 7	4.5
	DryTime	12	干旱时间/d	2 ~ 14	8
输送水力相关参数	Manning - N	13	管道曼宁系数	0.011 ~ 0.024	0.018

表 2 SWMM 模型主要水质模拟参数

Tab. 2 Main parameters of SWMM water quality simulation

项 目		参数名称	编号	物理意义	取值范围	初始值
饱和函数模型	道路	R_MaxBulidup	1	最大累积量/(kg · hm ⁻²)	0 ~ 100	50
		R_SatConstant	2	半饱和累积时间/d	1 ~ 50	25
	绿地	G_MaxBulidup	3	最大累积量/(kg · hm ⁻²)	0 ~ 50	25
		G_SatConstant	4	半饱和累积时间/d	1 ~ 50	25
指数函数模型	道路	R_WashoffCoef	5	冲刷系数	0.001 ~ 1	0.5
		R_WashoffExp	6	冲刷指数	1 ~ 10	5
	绿地	G_WashoffCoef	7	冲刷系数	0.001 ~ 1	0.5
		G_WashoffExp	8	冲刷指数	1 ~ 10	5

1.3 Sobol 方法^[13]

Sobol 方法是一个基于方差分解的全局敏感性分析方法^[12], 非线性、非单调的模型可以用以下方程来表示:

$$Y=f(X)=f(X_1,\cdots,X_p)$$
 (1)

式中: $X=(X_1,\cdots,X_p)$ 为模型的参数集; Y 为模型输出的目标函数值。方程 $f(X)$ 的总方差 $D(y)$ 可以分解为若干个子方差:

$$D(y)=\sum_i D_i+\sum_{i<j} D_{ij}+\sum_{i<j<k} D_{ijk}+\cdots+D_{12\cdots p}$$
 (2)

式中: D_i 是由第 i 个参数 X_i 产生的方差; D_{ij} 是由参数 X_i 和 X_j 相互作用产生的方差; D_{ijk} 是由参数 X_i 、 X_j 和 X_k 相互作用产生的方差; $D_{12\cdots p}$ 是由所有参数 X_1, \cdots, X_p 共同作用产生的方差。将上式归一化后得到各参数和参数相互作用的敏感参数:

$$1 = \sum_i \frac{D_i}{D(y)} + \sum_{i < j} \frac{D_{ij}}{D(y)} + \sum_{i < j < k} \frac{D_{ijk}}{D(y)} + \cdots + \frac{D_{12\cdots p}}{D(y)} \quad (3)$$

根据对总方差 D 贡献的百分比, 对单独一个参数和参数的相互作用的敏感性进行计算:

一阶敏感度:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (4)$$

二阶敏感度:

$$S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} \quad (5)$$

全阶敏感度:

$$S_{Ti} = 1 - \frac{D_{-i}}{D} \quad (6)$$

式中: D_{-i} 是除参数 X_i 外所有参数的方差; S_i 用来度量参数 X_i 主效应产生的敏感性。计算一阶、二阶和全阶敏感性指数共需要运行 $n \times (2m + 2)$ 次模型, n 为抽样样本数, m 为进行分析的参数个数。

SWMM - UQ 模块是利用计算机编程 Python 构建的对 SWMM 模型参数进行不确定性分析的可视化模块(见图2), 该模块集成了 Sobol 全局敏感性分析方法以及 GLUE 等不确定性分析方法。

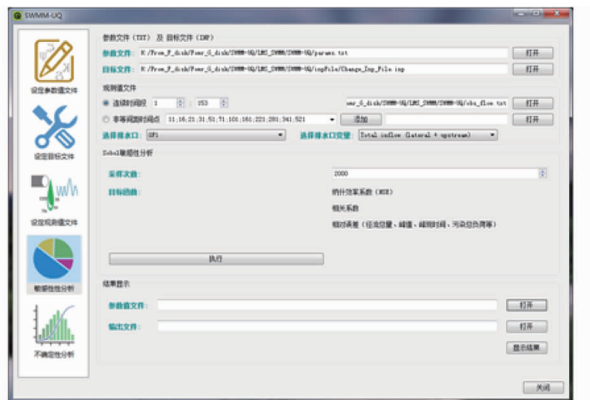


图2 SWMM - UQ 模块界面

Fig.2 Interface of SWMM - UQ module

利用 SWMM - UQ 模块进行参数敏感性分析的步骤包括: ①水量、水质模拟参数的选取; ②目标文件(.inp)的建立; ③观测值文件的建立; ④选取抽样

方法即拉丁超立方抽样(LHS); ⑤执行敏感性分析并输出结果; ⑥对结果进行分析。

1.4 目标函数

选取纳什效率系数(NSE)、相关系数(R^2)和相对误差(Error)^[17-18]为目标函数, 具体公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (8)$$

$$Error = \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{sim}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: n 为时间序列长度; Q_{obs} 和 Q_{sim} 分别为观测和模拟时间序列值; $\overline{Q_{obs}}$ 和 $\overline{Q_{sim}}$ 分别为观测和模拟流量或水质时间序列的平均值; V_{obs} 和 V_{sim} 分别为观测和模拟峰值、峰现时间、径流总量或污染物总负荷。NSE 和 R^2 的取值在 0 和 1 之间, 越趋近于 1 表明模拟时间序列和观测时间序列拟合程度越高。

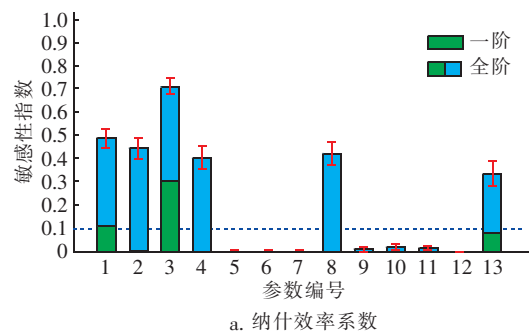
2 结果与讨论

2.1 水量模拟参数全局敏感度分析

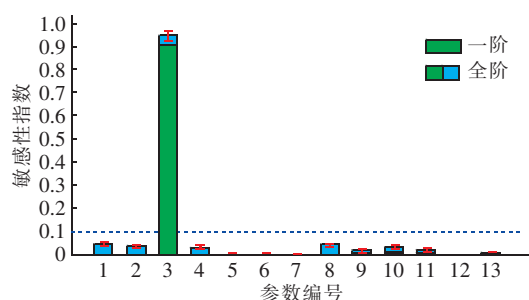
以 2014 年 8 月 4 日的降雨数据和流量数据对 SWMM 的水量模拟参数进行敏感性分析, 利用 SWMM - UQ 模块, 输入参数文件、观测值文件和目标文件, 设置抽样次数为 2 000 次, 运行模型 56 000 次, 然后输出结果进行分析。

2.1.1 一阶和全阶敏感度分析

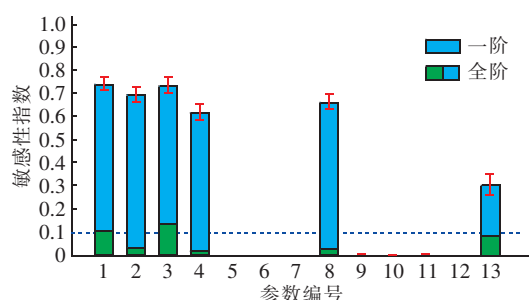
图3为水量模拟参数对不同目标函数的一阶及全阶敏感度。绿色代表一阶敏感度, 表示该参数对目标函数的敏感性大小; 蓝色代表去除一阶敏感度的全阶敏感度部分, 表示参数的相互作用; 绿色和蓝色之和为全阶敏感度。全阶敏感度超过阈值 0.1 则定义为敏感参数, 该阈值的取值是主观的^[19]。



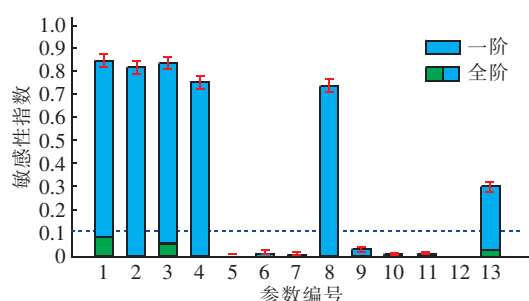
a. 纳什效率系数



b. 径流总量相对误差



c. 径流峰值相对误差



d. 峰现时间相对误差

图 3 水量模拟参数对不同目标函数的一阶及全阶敏感度

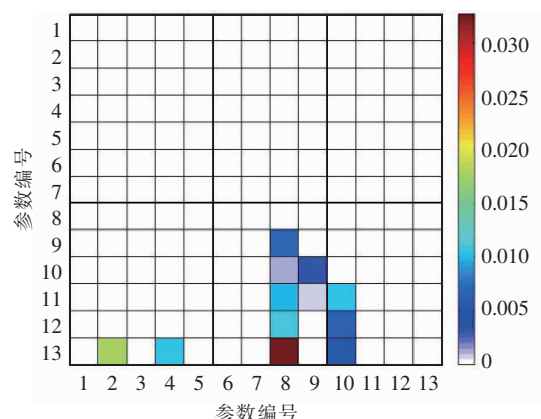
Fig. 3 First order and total sensitivity indices of water quantity simulation parameters under different objective functions

以纳什效率系数、径流峰值相对误差和峰现时间相对误差为目标函数,子汇水区特征宽度系数(K-Width)、子汇水区平均坡度(Slope)、不透水面积比率(Pct-Imperv)、不透水地表曼宁系数(N-Imperv)、不透水无洼地蓄水地表比例(Pct-Zero)、管道曼宁系数(Manning-N)的敏感性指数均超过了0.1,对模拟结果(目标函数)均有显著的影响,这些参数对研究区的产汇流过程起着决定性的作用。在每个敏感性参数中,一阶敏感度占全阶敏感度的比例较小,说明参数之间的相互作用起着关键的作用。对于纳什效率系数,最敏感的参数为不透水面积比率(Pct-Imperv),其次为子汇水区特征宽度系数(K-Width)和子汇水区平均坡度(Slope)。

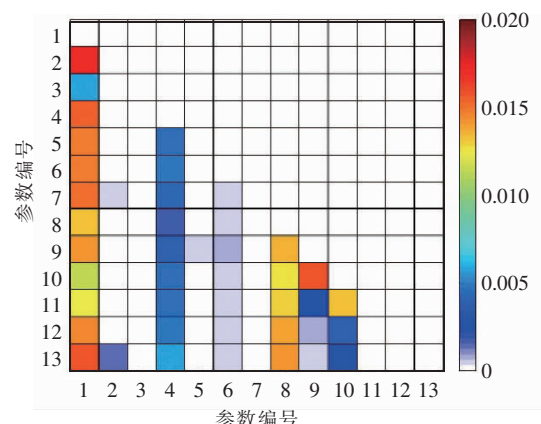
以径流总量相对误差为目标函数时,仅不透水面积比率(Pct-Imperv)的敏感性指数超过了0.1,为显著敏感性参数。

2.1.2 二阶敏感度分析

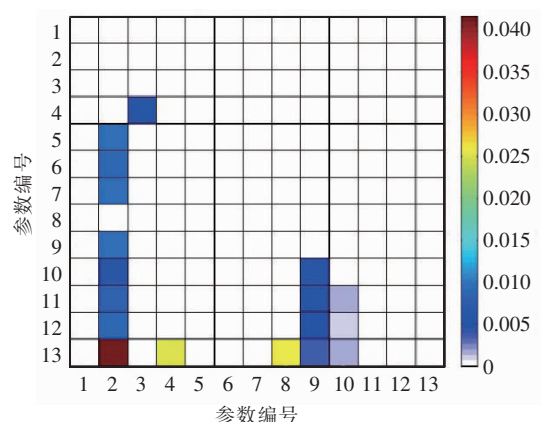
二阶敏感度可以反映模拟参数两两之间的相互作用,可以更好地揭示不确定的参数对模型结果不确定性的影响。图4为13个水量模拟参数对目标函数的二阶敏感度,其阈值取0.01^[20]。



a. 纳什效率系数



b. 径流总量相对误差



c. 径流峰值相对误差

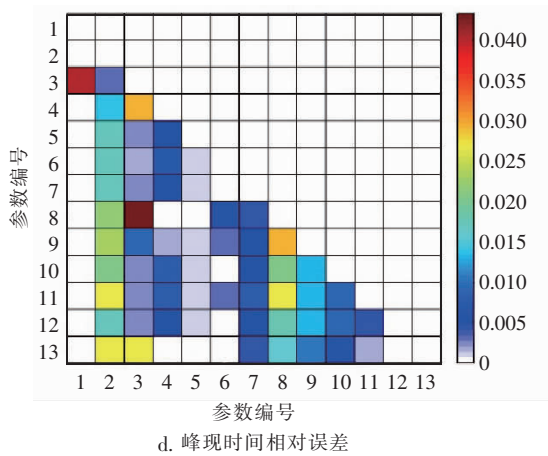


图4 水量模拟参数对目标函数的二阶敏感度

Fig. 4 Second order sensitivity indices of water quantity simulation parameters under different objective functions

以纳什效率系数为目标函数时,参数的相互作用主要集中在不透水无洼地蓄水地表比例(Pct - Zero)、最大入渗率(MaxRate)、最小入渗率(MinRate)和管道曼宁系数(Manning - N)之间的相互作用,一阶敏感度最高的参数即不透水面积比率(Pct - Imperv)的二阶敏感度接近0,说明该参数与其他多个参数的相互作用起着重要作用。

以径流总量相对误差为目标函数时,主要表现为子汇水区特征宽度系数(K - Width)与其他各参数之间的相互作用,不透水无洼地蓄水地表比例(Pct - Zero)与管道曼宁系数(Manning - N)和Horton下渗参数之间的相互作用对目标函数具有较大的敏感性。

以径流峰值相对误差为目标函数时,主要表现为子汇水区平均坡度(Slope)与其他各参数之间的相互作用以及最大入渗率(MaxRate)与管道曼宁

系数(Manning - N)和Horton下渗参数之间的相互作用对目标函数具有敏感性,只有管道曼宁系数(Manning - N)与子汇水区平均坡度(Slope)和不透水无洼地蓄水地表比例(Pct - Zero)的二阶敏感度达到了显著的水平。

以峰现时间相对误差为目标函数时,主要表现为子汇水区平均坡度(Slope)与其他参数均具有显著的二阶敏感度,它们之间的相互作用影响着峰现时间。不透水面积比率(Pct - Imperv)与子汇水区特征宽度系数(K - Width)和不透水无洼地蓄水地表比例(Pct - Zero)也具有显著的二阶敏感度。

2.2 水质模拟参数全阶敏感度分析

以2016年7月21日的降雨和TN污染物为例,以纳什效率系数、相关系数和TN总负荷相对误差为目标函数,分析水质参数敏感性。利用SWMM - UQ模块,输入参数文件、观测值文件和目标文件,设置抽样次数为2000次,运行模型36000次,然后输出结果进行分析。

2.2.1 一阶和全阶敏感度分析

图5为SWMM模型水质模拟参数对不同目标函数的一阶及全阶敏感度。可知,无论以纳什效率系数、相关系数还是TN总负荷相对误差为目标函数,只有道路的最大累积量(R_MaxBulidup)、冲刷系数(R_WashoffCoef)和冲刷指数(R_WashoffExp)对目标函数显著敏感,其余参数均不敏感,这可能是由于研究区域中道路所占面积较大,是绿地的近4倍,说明土地类型对水质模拟参数的敏感性有较大的影响。同时在各目标函数中,一阶敏感度在全阶敏感度中所占比例较小,说明多参数的相互作用是影响目标函数的主要因素。

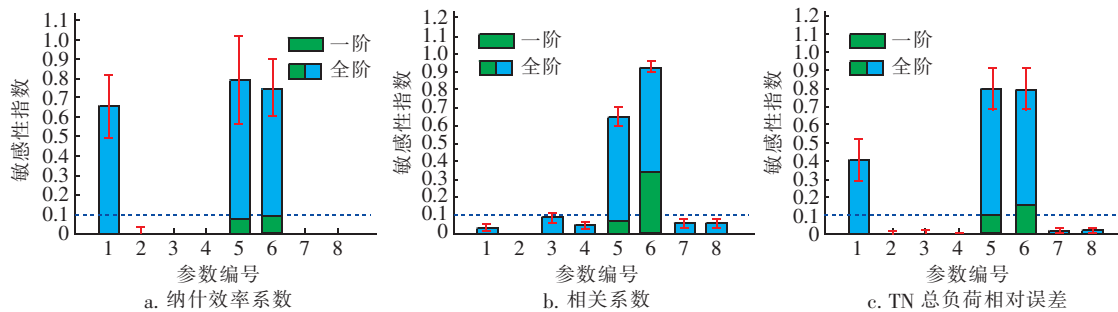


图5 水质模拟参数对不同目标函数的一阶及全阶敏感度

Fig. 5 First order and total sensitivity indices of water quality simulation parameters under different objective functions

2.2.2 二阶敏感度分析

图6为水质模拟参数对目标函数的二阶敏感

度。分别以纳什效率系数、相关系数和TN总负荷相对误差为目标函数时,参数的互相作用主要表现

在道路的最大累积量、冲刷系数和冲刷指数这 3 个参数上,表现出在道路这种土地利用类型上的水质

模拟参数具有较强的相互作用,它们共同影响着污染物的浓度变化。

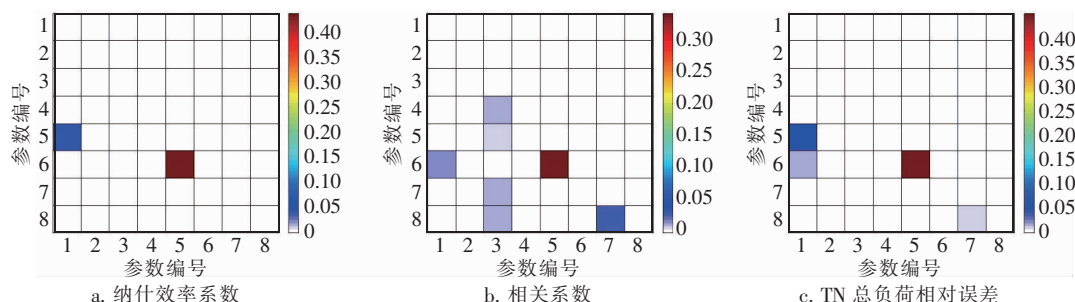


图 6 水质模拟参数对目标函数的二阶敏感度

Fig. 6 Second order sensitivity indices of water quality simulation parameters under different objective functions

3 结论

通过自行开发的 SWMM - UQ 模块对 SWMM 模型参数进行了全局敏感性分析,首次将 Sobol 全局敏感性方法应用到了 SWMM 模型的水量和水质模拟参数分析上,不仅分析了单一参数对模型输出结果的影响,还分析了多个参数相互作用对模型输出结果的影响,更有利于参数敏感性的识别,为模型的率定和验证奠定基础。主要结论包括:

① 对于水量模拟参数,不透水面积比率 (Pct - Imperv)、子汇水区特征宽度系数 (K - Width)、管道曼宁系数 (Manning - N) 对模拟结果 (目标函数) 均呈现较大的敏感性,这些参数对研究区域的产汇流过程起着决定性作用,是模型进行水量模拟的关键参数。对于水质模拟参数,无论以纳什效率系数、相关系数还是污染物总负荷相对误差为目标函数,只有道路的最大累积量 (R - MaxBulidup)、冲刷系数 (R_WashoffCoef) 和冲刷指数 (R_WashoffExp) 对目标函数敏感,其余均不敏感,说明土地类型对水质模拟参数的敏感性有较大的影响。相对于参数的单一作用,参数的相互作用所占比例较大,参数的相互作用更大程度上影响着模型结果的变化。

② Sobol 法能够较好地识别出敏感性参数,尤其适用于分析探索具有高度非线性水文水质模型多参数之间的相互作用,可进行定性和定量分析,有助于对模型参数进行敏感性识别,促进模型的适宜性应用,为模型进行率定和验证提供坚实基础。

③ 针对研究区域的不同降雨条件,如不同降雨时间、不同雨峰等对水量和水质模拟参数敏感性的影响需要进一步研究,以实现 SWMM 模型参数

的进一步认识,为模型精确模拟提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 齐苑儒,李怀恩,李家科,等. 西安市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护,2010,26(1):9-12.
Qi Yuanru, Li Huaen, Li Jiako, et al. Estimation of Xi'an urban non-point source pollution load[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 9-12 (in Chinese).
- [2] Rossman L A. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0 [M]. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [3] Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al. Global Sensitivity Analysis: The Primer [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [4] 蒋元勇,丰锴斌,刘学文,等. 城市雨洪 SWMM 模型的敏感参数研究综述[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 194-200.
Jiang Yuanyong, Feng Kaibin, Liu Xuewen, et al. Summary of sensitive parameters SWMM model of urban stormwater[J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 194-200 (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] 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).
- [7] 朱嘉祺, 徐向阳, 何爽. 基于 LH-OAT 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2014(3): 84–87.
- Zhu Jiaqi, Xu Xiangyang, He Shuang. An analysis of parameter sensitivity of SWMM Model based on LH-OAT method[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(3): 84–87 (in Chinese).
- [8] 段明印, 李传奇, 熊剑智. 基于偏相关法的 SWMM 模型参数全局敏感性分析[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 53–57, 76.
- Duan Mingyin, Li Chuanqi, Xiong Jianzhi. Global sensitivity analysis for SWMM model parameters using partial correlation method[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(17): 53–57, 76 (in Chinese).
- [9] 王明汉, 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.
- Wang Minghan, Li Chuanqi, Xiong Jianzhi, *et al.* Analysis of SWMM parameters global sensitivity based on mutual information [J]. *Yellow River*, 2017, 39(10): 22–26 (in Chinese).
- [10] 田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述[J]. *水文*, 2010, 30(4): 9–12.
- Tian Yu, Lei Xiaohui, Jiang Yunzhong, *et al.* Comment on parameter sensitivity analysis of hydrological model [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 9–12 (in Chinese).
- [11] 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 Xiaodong, Xu Zongxue, Zhao Gang, *et al.* Sensitivity analysis on SWMM model parameters based on Sobol method [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(3): 59–68 (in Chinese).
- [12] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [J]. *Mathematical Modelling and Computational Experiment*, 1993, 1: 407–414.
- [13] 张小丽, 彭勇, 徐炜, 等. 基于 Sobol 方法的新安江模型参数敏感性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 20–24, 33.
- Zhang Xiaoli, Peng Yong, Xu Wei, *et al.* Sensitivity analysis of Xinanjiang model parameters using Sobol method [J]. *South – to – North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(2): 20–24, 33 (in Chinese).
- [14] Saltelli A. Sensitivity analysis for importance assessment [J]. *Risk Analysis*, 2002, 22(3): 579–590.
- [15] 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 Resour Res*, 2007. DOI:10.1029/2006WR005813.
- [16] Tang Y, Reed P, Wagener T, *et al.* Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2006, 3(6): 793–817.
- [17] Krause P, Boyle D P, Se F B. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. *Advances in Geosciences*, 2005, 5(5): 89–97.
- [18] Moriasi D N, Arnold J G, van Liew M W, *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885–900.
- [19] Zhang C, Chu J, Fu G. Sobol's sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun River Basin, China [J]. *J Hydrol*, 2013, 480: 58–68.



作者简介: 李美水 (1991–), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事城市给排水系统模拟及优化研究。

E-mail: htjl_limsh@163.com

收稿日期: 2019–09–17