

城市降雨径流水文模拟的参数局部灵敏度及其稳定性分析

林杰¹, 黄金良^{1*}, 杜鹏飞², 涂振顺³, 李青生¹

(1. 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 3. 福建省海洋研究所, 厦门 361012)

摘要:基于 Morris 筛选法, 在厦门城市小流域采用 8 场实测降雨数据对城市降雨径流模型 SWMM 的水文水力模块进行局部灵敏度及其稳定性分析. 结果表明, Area、% Imperv 和 Dstore-Imperv 是影响降雨总径流量和流量峰值最灵敏的参数. 对于总径流量, Area、% Imperv 和 Dstore-Imperv 的灵敏度分别为 0.46~1.0、0.61~1.0 和 -0.050~-5.9; 而对于流量峰值, 它们的灵敏度分别为 0.48~0.89、0.59~0.83 和 0~-9.6. 其中降雨强度最小的场次降雨的各个参数降雨总径流量和流量峰值的灵敏度都最大, 而降雨强度较大的场次降雨的总径流量和流量峰值的灵敏度都较小. 不同场次降雨模型参数的灵敏度分析具有很大的差异性, 但 % Zero-Imperv 对总径流量和流量峰值模拟输出影响的稳定性最小, 表现在变异度最大, 高达 221.24% 和 228.10%, 而 Conductivity 参数稳定性最大, 变异系数都为 0.

关键词: Morris 筛选法; SWMM 模型; 局部灵敏度分析; 变异度

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2023-06

Local Sensitivity and Its Stationarity Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling

LIN Jie¹, HUANG Jin-liang¹, DU Peng-fei², TU Zhen-shun³, LI Qing-sheng¹

(1. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361012, China)

Abstract: Sensitivity analysis of urban-runoff simulation is a crucial procedure for parameter identification and uncertainty analysis. Local sensitivity analysis using Morris screening method was carried out for urban rainfall runoff modelling based on Storm Water Management Model (SWMM). The results showed that Area, % Imperv and Dstore-Imperv are the most sensitive parameters for both total runoff volume and peak flow. Concerning total runoff volume, the sensitive indices of Area, % Imperv and Dstore-Imperv were 0.46-1.0, 0.61-1.0, -0.050~-5.9, respectively; while with respect to peak runoff, they were 0.48-0.89, 0.59-0.83, 0~-9.6, respectively. In comparison, the most sensitive indices (Morris) for all parameters with regard to total runoff volume and peak flow appeared in the rainfall event with least rainfall; and less sensitive indices happened in the rainfall events with heavier rainfall. Furthermore, there is considerable variability in sensitive indices for each rainfall event. % Zero-Imperv's coefficient variations have the largest values among all parameters for total runoff volume and peak flow, namely 221.24% and 228.10%. On the contrary, the coefficient variations of conductivity among all parameters for both total runoff volume and peak flow are the smallest, namely 0.

Key words: Morris screening method; SWMM; local sensitivity analysis; coefficient of variation

在环境研究和管理中,模型是必不可少的工具. 由于简单的模型不能满足特定环境系统的管理需求,如今用于环境管理的模型都趋于复杂化^[1]. 复杂的模型往往需要很多参数,这就存在数据不可信或不可得的问题,而数据的不确定性又进一步导致模型中各个模块不确定性的积累和传递^[2-4]. 不确定性的定量分析可对数据和模型的可信度有一定的了解^[5],另外它还有利于研究者有针对性地收集数据^[6,7]. 在模型不确定性分析中,模型参数不确定性的分析是评价模型参数对模型的校正和模型输出结果所必不可少的^[8]. 灵敏度分析是模型参数不确定性分析的一部分,它是指分析模型参数在取值范围

内发生少量的变化而导致模型输出结果的变化,是分析复杂模型的重要工具^[9-14]. 在数据欠缺或不可信时,人们可以通过进行灵敏度分析来决定这些数据的重要性,从而有选择性地获取重要的数据,而不太重要的数据可用模型默认值,这样可以省钱省时^[15].

近几年来,在澳门^[16]、北京^[17,18]、重庆^[19,20]等

收稿日期:2009-11-06;修订日期:2010-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50778098);福建省青年人才项目(2007F3093)

作者简介:林杰(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境管理,E-mail: linjielh@163.com

* 通讯联系人,E-mail: jluang@xmu.edu.cn

地开展了水力和水质的模型参数灵敏度分析,研究结果表明参数灵敏度有一定的相似性,但也存在一定的地域差异.另外,有关参数灵敏度的稳定性分析至今鲜见报道.因此,本研究基于 SWMM 模型在厦门开展城市降雨径流模型参数的灵敏度分析,并且通过不同降雨强度的场次降雨分析灵敏度系数的稳定性.

1 材料与方法

1.1 流域概况及试验方案

表 1 用于模型参数灵敏度分析的场次降雨特征

Table 1 Characteristics of rainfall events used for local sensitivity analysis

降雨时间	降雨历时 /min	降雨量 /mm	径流量 /m ³	平均降雨强度 /mm·min ⁻¹	雨前干期长度 /d	样品数 /个
2008-05-05T 09:27 ~ 14:13	286	9.37	77.62	0.033	11	27
2008-05-09T 15:46 ~ 17:23	97	50.7	59.99	0.052	3	13
2008-07-28T 15:17 ~ 18:12	175	7.2	32.89	0.041	8	22
2008-08-06T 10:24 ~ 11:53	89	4.16	58.02	0.047	6	17
2008-08-26T 18:07 ~ 20:42	155	14.7	13.75	0.095	2	17
2009-03-13T 18:55 ~ 20:45	110	12	60.12	0.109	3	12
2009-03-27T 19:22 ~ 20:47	85	2.46	4.78	0.029	4	12
2009-04-13T 10:37 ~ 11:42	65	4	34.04	0.062	2	12

1.2 局部灵敏度分析方法

Morris 筛选法选取模型其中某一变量 x_i ,其余参数值固定不变,在变量阈值范围内随机改变 x_i ,运行模型得到目标函数 $y(x) = y(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 的值,用影响值 EE 判断参数变化对输出值的影响程度^[22-24],见式(1):

$$e_i = \frac{y^* - y}{\Delta_i} \quad (1)$$

式中, y^* 为参数变化后的输出值; y 为参数变化前的输出值; Δ_i 为参数 i 的变幅.

Morris 筛选法对因子采用初级影响 (EE) 的概念.如果 X 是一由 k 个因子 $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 组成的向量, Y 是模拟的结果.则第 i 个因子的 EE 如式(2)所示:

$$EE_i = \frac{Y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+2}, \dots, x_k) - Y(X)}{\Delta} \quad (2)$$

式中, X 为某参数在取值区间内的一个取值, $\Delta + X$ 的取值范围仍在此参数的取值范围内,由 k 维组成. Δ 表示每个因子的变幅.修正的 Morris 筛选法采用自变量以固定步长变化,灵敏度判别因子取 Morris 多个平均值,见式(3):

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{(P_{i+1} - P_i)/100} / (n-1) \quad (3)$$

本研究区位于厦门本岛中西部的筓筓湖西北岸,厦门市大会堂绿地.本区域面积为 3.26 hm²,以城市人工绿地为主.其中绿地面积 2.13 hm²,道路 0.65 hm²,屋面约 0.48 hm²,分别占 65%、20%、15%,不透水率约为 35%.本区排水系统为雨污分流制管网类型.采用雨量筒测定场次降雨的雨量,采用容器法和 Hach 流量计 (SIGMA910) 相结合获取场次降雨的流量数据,具体采样方案参见文献 [21].选取 2008 ~ 2009 年 8 场不同降雨强度的降雨分别进行灵敏度分析,降雨特征见表 1 所示.

式中, S 为灵敏度判别因子; Y_i 为模型第 i 次运行输出值; Y_{i+1} 为模型第 $i+1$ 次运行输出值; Y_0 为参数率定后计算结果初始值; P_i 为第 i 次模型运算参数值相对于率定参数后参数值的变化百分率; P_{i+1} 为第 $i+1$ 次模型运算参数值相对于率定后初始参数值的变化百分率; n 为模型运行次数.

1.3 模型概化与参数取值

根据流域的地形和管网特征调查,将流域划分为 17 个汇水单元,并建立模型参数输入文件. SWMM 模型水文、水力模块相关参数的取值方法主要有 3 种方式:现场调查、模型手册及相关文献调研、GIS 测量参数.本研究区参数及其取值范围、取值方法及参数率定结果如表 2 所示.

2 结果与分析

采用表 2 中的参数取值方法、取值范围及参数率定结果,通过表 1 中的 8 场降雨实测数据对模型水文模块进行初步率定,手工调试参数获取一组水文模拟参数,模拟结果见表 3.需要指出的是,2008-05-09 和 2008-08-26 这 2 场降雨因为降雨量和降雨强度都大,干期时间短,又因为绿地汇水区具有一定的不透水区域(不透水率约 35%),导致强度大的降雨无法全部进入出水口的雨水井并流入管道,而是

表 2 SWMM 模型水文水力模块主要参数及其取值范围、取值方法
Table 2 Major parameters with respect to SWMM hydrology and hydraulic module

参数编号	参数名称	物理意义	取值范围	参数率定值	参数取值方法
1	Area	汇水单元面积/hm ²	0.032 0~0.766 4	0.032 0~0.766 4	GIS 数据库
2	Width	汇水单元坡面漫流宽度/m	9.0~76	9.0~76	GIS 数据库
3	% Slope	汇水单元坡度/%	0.322 0~0.932 9	0.322 0~0.932 9	GIS 数据库
4	% Imperv	汇水单元不透水率/%	13~98	13~98	调查估计
5	N-Imperv	汇水单元不透水区曼宁糙率	0.005~0.05	0.015	模型手册,文献
6	N-Perv	汇水单元透水区曼宁糙率	0.05~0.50	0.24	模型手册,文献
7	Dstore-Imperv	汇水单元不透水区贮水深度/mm	0~3	2.6	模型手册,文献
8	Dstore-Perv	汇水单元透水区贮水深度/mm	2.54~6	4	模型手册,文献
9	% Zero-Imperv	汇水单元无低洼地不透水区所占百分比/%	5.0~20	10~20	文献
10	Curve number	曲线特征值	39~98	39~98	文献和模型手册
11	Conductivity	传导系数/mm·h ⁻¹	0~60	1~50	文献和模型手册
12	Con-Length	管道长度/m	12.23~48.83	12.23~48.83	GIS 数据库
13	Con-Mann	管道曼宁糙率	0.011~0.024	0.018	模型手册,文献

表 3 8 场降雨的水量模拟值与实测值对照
Table 3 Simulated and measured value for surface runoff flow during three rainfall events

降雨日期	总径流量/m ³			流量峰值/m ³ ·s ⁻¹		
	实测值	模拟值	偏差/%	实测值	模拟值	偏差/%
2008-05-05	77.62	78.49	1.12	0.028 7	0.028 6	0.25
2008-05-09	59.99	442.48	-637.60	0.041 0	0.322 8	-687.22
2008-07-28	32.89	47.03	-42.96	0.019 0	0.008 4	56.05
2008-08-06	58.02	18.13	68.75	0.028 6	0.012 1	57.82
2008-08-26	13.75	79.48	-547.79	0.004 6	0.058 7	-1 176.74
2009-03-13	60.12	128.05	-112.99	0.049 7	0.052 6	-5.88
2009-03-27	4.78	2.83	40.84	0.001 4	0.001 0	30.40
2009-04-13	34.04	6.22	81.72	0.026 4	0.007 9	70.17

沿路旁往筑路路流去,造成实测值偏低,但是因为本研究是通过模拟计算得到各个参数的灵敏度,计算的过程中与实测值无太大关联,不影响模型模拟中各个参数的灵敏度分析,因此仍然对这 2 场降雨进行分析。

在 8 场降雨灵敏度分析过程中,除了降雨数据,模型模拟中的所有场次降雨的参数都相同。在此基础上,采用修正的 Morris 筛选法对每场降雨的局部灵敏度分析结果进行定量表达,以 5% 为固定步长对某一参数值进行扰动,分别取其值的 -20%、-15%、-10%、-5%、5%、10%、15% 和 20%,而其他参数值固定不变,观测不同降雨强度的径流量和峰值流量的水文和水力模块相关参数的灵敏度。

根据灵敏度定量表达的结果,将灵敏度可分为 4 级进行分析。 $|S_i| \geq 1$ 为高灵敏参数; $0.2 \leq |S_i| < 1$ 为灵敏参数; $0.05 \leq |S_i| < 0.2$ 为中等灵敏参数; $0 \leq |S_i| < 0.05$ 为不灵敏参数(i 为模

型的第 i 个状态变量)^[25]。

由图 1 可见,8 场降雨中影响模型总径流量的灵敏或高灵敏参数均为参数 1 和参数 4。除了 2008-05-09 那场降雨,其他 7 场参数 7 都是总径流量的灵敏或高灵敏参数。参数 2 和参数 5 是 2008-08-06、2009-03-27 和 2009-04-13 这 3 场降雨的灵敏参数;参数 3 是后 2 场降雨的灵敏参数。参数 9 是 2009-03-27 的高灵敏参数。同时在 8 场降雨中,参数 6、参数 8、参数 10 和参数 11 对改变总径流量都不灵敏或中等灵敏。需要指出的是,2009-03-27 和 2009-04-13 这 2 场降雨的参数 7 和参数 9 的灵敏度系数较其他几场降雨都大,这使得图 1 中这 2 场降雨的其他参数差异不明显。这 2 个参数灵敏度较高的原因可能与上述 2 场降雨的降雨量和径流量较小有关。

从图 2 可知,8 场降雨中影响模型流量峰值的灵敏或高灵敏参数均为参数 1 和参数 4。除了 2008-05-09 和 2009-03-13,其他 6 场降雨的参数 2 和参数

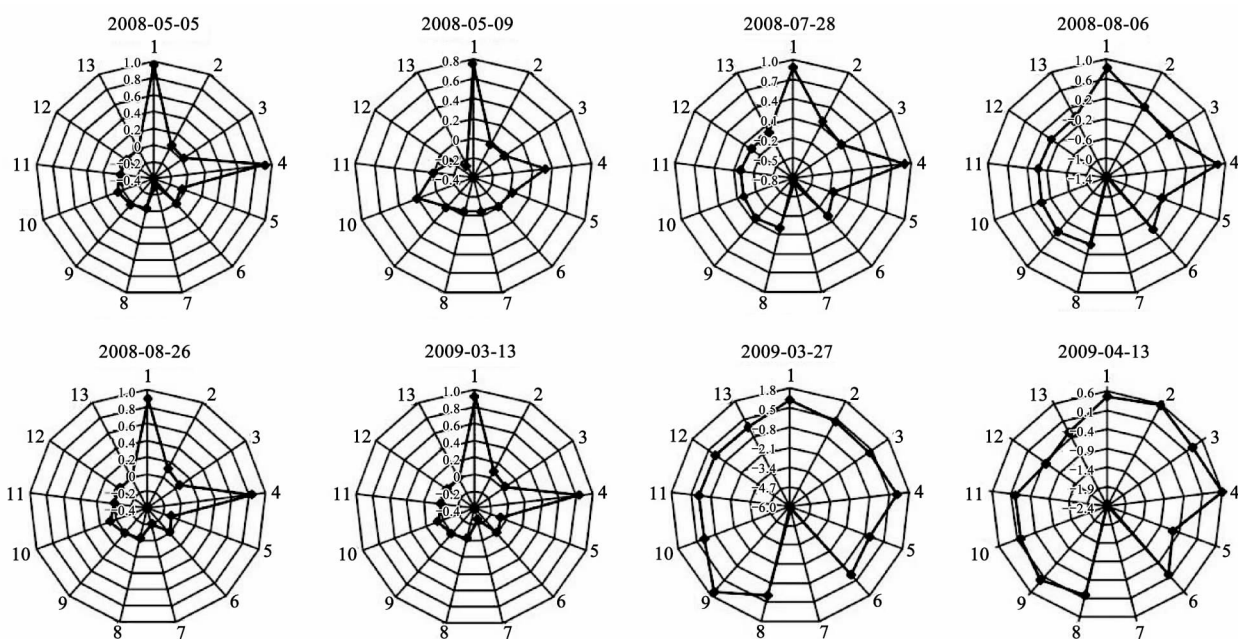


图 1 8 场降雨总径流量灵敏度参数分布

Fig. 1 Sensitivity analysis of the parameters with respect to total runoff volume

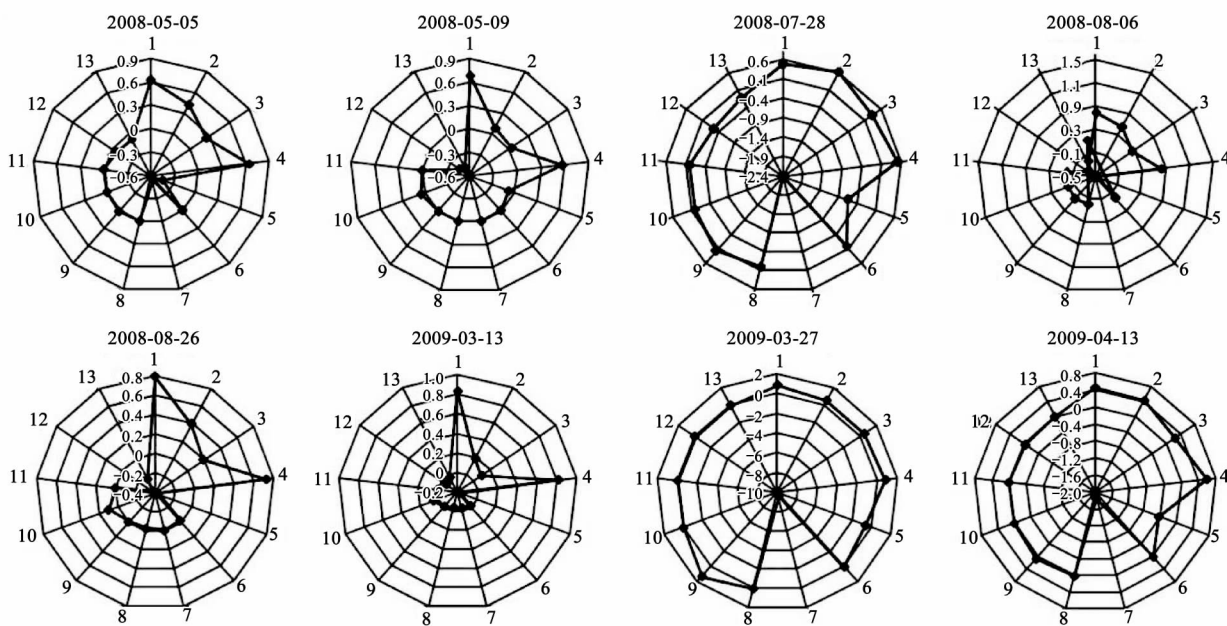


图 2 8 场降雨流量峰值灵敏度参数分布

Fig. 2 Sensitivity analysis of the parameters with respect to peak flow

5 都是总径流量的灵敏参数. 另外, 除了 2008-05-09、2008-08-26 和 2009-03-13, 参数 3 和参数 7 是影响其他 5 场降雨流量峰值的灵敏参数; 参数 12 和参数 13 是 2008-05-09、2008-08-06 和 2008-08-26 的灵敏参数. 在 8 场降雨中, 参数 6、参数 8、参数 10 和参数 11 对改变流量峰值都表现为不灵敏或中等灵敏. 另外, 2009-03-27 和 2009-04-13 这 2 场降雨的参数 7

和参数 9 的灵敏度系数较其他几场降雨都大, 这使得图 2 中这 2 场降雨的其他参数差异不明显, 其原因可能与这 2 个参数对于降雨量较小的场次降雨的径流峰值影响较大有关. 从图 2 中也可看出, 与总径流量的灵敏度相比, 影响流量峰值的各个参数灵敏度在不同的场次降雨的模拟中有较大的差异, 这在一定程度上也反映了城市降雨径流模拟的复杂性.

3 讨论

3.1 影响灵敏度分析的因素

图 3 和图 4 表示的是 8 场降雨总径流量和流量峰值的各个参数灵敏度系数的累积效果,从中可以看出,参数 1、参数 4 和参数 7 是影响降雨总径流量和流量峰值最灵敏的参数. 其中 2009-03-27 这场降雨强度最小的降雨在各个参数降雨总径流量和流量峰值的灵敏度都最大,而 2008-05-09、2008-08-26 和 2009-03-13 这 3 场降雨强度较大的降雨的总径流量和流量峰值的灵敏度都较小.

本研究结果表明,影响降雨总径流量和流量峰值的最灵敏参数为参数 7、参数 1、参数 4、参数 6 和参数 2,这与 Zaghoul^[15] 和黄金良等^[16] 局部灵敏度分析和王浩昌等^[17] 全局灵敏度分析的研究结果大体相似,即 Area、% Imperv、N-Perv 和 Width 都为最灵敏参数. 但不同之处在于在本研究中 Dstore-Imperv 为最灵敏的参数. Con-Length 和 Con-Mann 在调节总径流时不是太敏感,这与岩溶体系地区的结果截然相反^[26];然而对于流量峰值的影响却相对较大. 这说明在进行流量峰值的相关研究时,要加强对

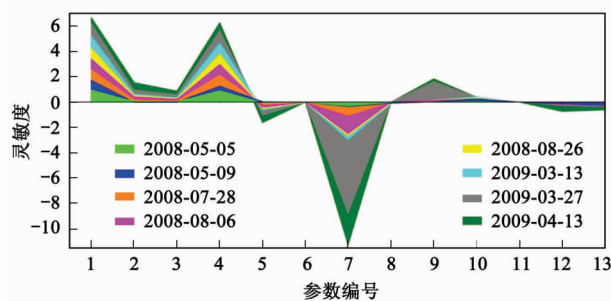


图 3 8 场降雨总径流量灵敏度参数比较图

Fig. 3 Comparison map of parameters' sensitive indices with respect to total runoff volume

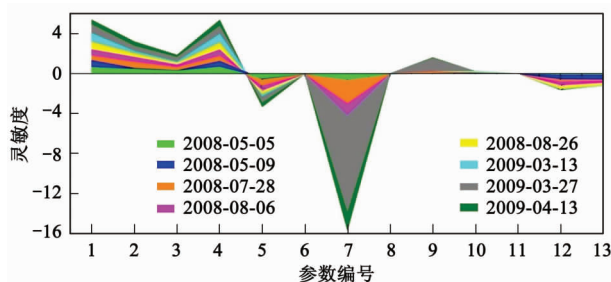


图 4 8 场降雨流量峰值灵敏度参数比较图

Fig. 4 Comparison map of parameters' sensitive indices with respect to peak flow

表 4 各个参数灵敏度的计算结果

Table 4 Statistical description of parameters' sensitivity based on Morris screening method

参数编号	参数名称	总径流量				流量峰值			
		均值	方差	标准差	CV/%	均值	方差	标准差	CV/%
1	Area	0.84	0.03	0.17	20.58	0.67	0.03	0.16	23.67
2	Width	0.19	0.04	0.19	98.76	0.40	0.03	0.18	45.23
3	% Slope	0.11	0.01	0.11	101.91	0.23	0.02	0.13	58.09
4	% Imperv	0.79	0.05	0.22	27.49	0.67	0.01	0.11	17.10
5	N-Imperv	-0.20	0.04	0.21	-104.53	-0.41	0.04	0.21	-50.25
6	N-Perv	<0.01	<0.01	<0.01	-128.21	<0.01	<0.01	0.01	-145.51
7	Dstore-Imperv	-1.41	3.95	1.99	-140.88	-1.95	10.47	3.24	-165.70
8	Dstore-Perv	-0.02	0.00	0.02	-116.07	-0.01	0.00	0.01	-176.78
9	% Zero-Imperv	0.23	0.26	0.51	221.24	0.20	0.20	0.45	228.10
10	Curve number	0.05	<0.01	0.07	139.18	0.03	<0.01	0.04	144.17
11	Conductivity	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Con-Length	-0.09	0.02	0.16	-169.86	-0.20	0.03	0.18	-87.79
13	Con-Mann	-0.08	0.01	0.11	-148.46	-0.15	0.03	0.16	-109.38

于管道长度和管道曼宁系数精确性的控制,特别是管道曼宁系数,因为它不是恒定的值^[26].

3.2 Morris 筛选法灵敏度系数的稳定性

为表征灵敏度系数的稳定性,表 4 进一步给出了 8 场降雨模型参数灵敏度的统计分析结果.

由表 4 可见,不同场次的降雨的模型参数的灵敏度分析具有很大的差异性. 变异系数 CV 能够表明各个参数的变异度, CV 的绝对值越大说明变异度

越大. 总径流量和流量峰值中 % Zero-Imperv 的变异度最大, 高达 221.24% 和 228.10%; N-Imperv、N-Perv、Curve number、Con-Mann 的变异度也较大都超过 100%; 而 Conductivity 的变异度最小, 都为 0. Conductivity 的灵敏度系数较稳定可能是因为该参数的改变基本不会使总径流量和流量峰值改变; 而 Area、Width、% Slope、% Imperv 和 N-Imperv 这 5 个参数的灵敏度的变异度较小的原因仍不得而知, 需

要进一步的研究.

4 结论

(1)SWMM 模型不同状态变量(总径流量和流量峰值)的灵敏参数总体上一致,Area、% Imperv 和 Dstore-Imperv 都是最灵敏的参数.对于总径流量,Area、% Imperv 和 Dstore-Imperv 的灵敏度分别为 0.46~1.0、0.61~1.0 和 -0.050~-5.9;而对于流量峰值,灵敏度分别为 0.48~0.89、0.59~0.83 和 0~-9.6.但是不同的状态变量也存在差异,% Slope、Width、Con-length 和 Con-man 对流量峰值的影响比对总径流量的影响更大,灵敏度更高.另外在各个降雨场次之间各个参数的灵敏度也存在差异.整体看来,降雨强度较小的降雨场次的参数降雨总径流量和流量峰值的灵敏度都较大,反之亦然.

(2)从各个参数的灵敏度稳定性来看,大部分参数都具有较大的变异性,特别是% Zero-Imperv,在总径流量和流量峰值中的灵敏度稳定性分析中,变异度高达 221.24% 和 228.10%;而 N-Imperv、N-Perv、Curve number、Con-Mann 的变异度也都超过 100%;Conductivity 的变异度最小,都为 0.这说明不同场次的参数灵敏度有很大差异,还需要有进一步的研究来剖析不同特征,特别是降雨强度与参数灵敏度的关系.

参考文献:

- [1] Drechsler M. Sensitivity analysis of complex models [J]. Biol Conserv, 1998, **86**(3):401-412.
- [2] Freni G, Mannina G, Viviani G. Uncertainty assessment of an integrated urban drainage model [J]. J Hydrol, 2009, **373**(3-4):392-404.
- [3] Willems P. Quantification and relative comparison of different types of uncertainties in sewer water quality modelling [J]. Water Res, 2008, **42**(13):3539-3551.
- [4] Mannina G, Freni G, Viviani G, *et al.* Integrated urban water modelling with uncertainty analysis [J]. Water Sci Technol, 2006, **54**(6-7):379.
- [5] Radwan M, Willems P, Berlamont J. Sensitivity and uncertainty analysis for river quality modelling [J]. J Hydroinform, 2004, **6**(2):83-89.
- [6] Frey H. Quantitative analysis of uncertainty and variability in environmental policy making [R]. In: 1992 environmental science and engineering fellows program report[C]. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, 1992. 25-33.
- [7] Bertrand-Krajewski J, Deletic A, Fletcher T. Stormwater pollutant loads modelling: epistemological aspects and case studies on the influence of field data sets on calibration and verification [J]. Water Sci Technol, 2007, **55**(4):1-17.
- [8] Beck M. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty [J]. Water Resour Res, 1987, **3**(8):1393-1442.
- [9] Watt K E F. Ecology and resource management [M]. New York: McGraw Hill, 1968.
- [10] Caswell H. A general formula for the sensitivity of population growth rate to changes in life history parameters [J]. Theor Popul Biol, 1978, **14**:215-230.
- [11] Beck M. Sensitivity analysis, calibration, and validation [J]. Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs, 1983, **12**:425-467.
- [12] De Kroon H, Plaisier A, Van Groenendaal J, *et al.* Elasticity: the relative contribution of demographic parameters to population growth rate [J]. Ecology, 1986, **67**:1427-1431.
- [13] Possingham H, Lindenmayer D, Norton T. A framework for the improved management of threatened species based on population viability analysis (PVA) [J]. Pac Conserv Biol, 1993, **1**:39-45.
- [14] McCarthy M, Burgman M, Ferson S. Sensitivity analysis for models of population viability [J]. Biol Conserv, 1987, **86**:297-303.
- [15] Zaghoul N. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation [J]. Adv Water Resour, 1983, **6**(4):214-223.
- [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,**27**(4):549-553.
- [17] 王浩昌,杜鹏飞,赵冬泉,等.城市降雨径流模型的参数全局灵敏度分析[J].中国环境科学,2008,**28**(8):725-729.
- [18] 赵冬泉,陈吉宁,王浩正,等.城市降雨径流污染模拟的水质参数局部灵敏度分析[J].环境科学学报,2009,**29**(6):1170-1177.
- [19] 余红,沈珍瑶.三峡水库大宁河流域非点源污染参数的不确定性分析[J].中国环境科学,2007,**27**(4):554-558.
- [20] Shen Z, Qian H, Hong Y, *et al.* Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. Sci Total Environ, 2008, **405**:195-205.
- [21] 黄金良,涂振顺,杜鹏飞,等.城市绿地降雨径流污染特征对比研究:以澳门与厦门为例[J].环境科学,2009,**30**(12):3514-3521.
- [22] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. Technometrics, 1991, **33**(2):161-174.
- [23] Francos A, Elorza F, Bouraoui F, *et al.* Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: Understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliab Eng Syst Saf, 2003, **79**(2):205-218.
- [24] 郝芳华,任希岩,张雪松,等.洛河流域非点源污染负荷不确定性的影响因素[J].中国环境科学,2004,**24**(3):270-274.
- [25] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Phys Chem Earth, 2002, **27**(9-10):645-654.
- [26] Peterson E, Wicks C. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM) [J]. J Hydrol, 2006, **329**(1-2):394-305.