

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析

黄金良¹ 林杰² 杜鹏飞³

(1. 厦门大学福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361005; 2. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 以厦门城市小流域为例, 基于蒙特卡洛随机采样和区域灵敏度分析(RSA)方法, 从参数的可识别性和灵敏度分析2个方面来分析城市降雨径流SWMM模型参数的不确定性。结果表明, 水文水力模块中汇水单元不透水区贮水深度(Dstore-Imperv)、汇水单元透水区贮水深度(Dstore-Perv)和CN特征曲线(Curve Number)这3个参数可识别性较好, 区域灵敏度高; 水文水力模块的区域灵敏度的排序为: Dstore-Imperv > CN > Dstore-Perv > 汇水单元透水区曼宁糙率(N-Perv) > 传导系数(Conductivity) > 管道曼宁糙率(Con-Mann) > 汇水单元不透水区曼宁糙率(N-Imperv)。水质模块冲刷函数中地表冲刷系数(Coefficient)和地表径流幂指数(Exponent)这2个参数以及累积函数中的地表最大可累积的污染量(Max. Buildup)的识别性较高, 区域灵敏度较大。而从区域灵敏度的排序来看, 3种用地类型的地表累积速率(Rate Constant)参数K-S距离最小, Max. Buildup、Coefficient和Exponent参数的K-S距离相对较大。

关键词: 参数识别; SWMM模型; RSA方法; 不确定性分析; 城市降雨径流

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2224-11

Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling

HUANG Jin-liang¹, LIN Jie², DU Peng-fei³

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Xiamen 361005, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An urban watershed in Xiamen was selected to perform the parameter uncertainty analysis for urban stormwater runoff modeling in terms of identification and sensitivity analysis based on storm water management model (SWMM) using Monte-Carlo sampling and regionalized sensitivity analysis (RSA) algorithm. Results show that Dstore-Imperv, Dstore-Perv and Curve Number (CN) are the identifiable parameters with larger K-S values in hydrological and hydraulic module, and the rank of K-S values in hydrological and hydraulic module is Dstore-Imperv > CN > Dstore-Perv > N-Perv > conductivity > Con-Mann > N-Imperv. With regards to water quality module, the parameters in exponent washoff model including Coefficient and Exponent and the Max. Buildup parameter of saturation buildup model in three land cover types are the identifiable parameters with the larger K-S values. In comparison, the K-S value of rate constant in three landuse/cover types is smaller than that of Max. Buildup, Coefficient and Exponent.

Key words: parameter identifiability; storm water management model (SWMM); regionalized sensitivity analysis (RSA); uncertainty analysis; urban rainfall runoff

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的参数,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导致模型中各个模块不确定性的积累和传递^[2~4]。模型不确定性的定量分析可以让人们对数据和模型的可信度有一定的了解^[5]。另外它还利于人们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]。另外,由于模型参数能够表征模型结构的系统过程,是模型结构不完善的第一表征因子^[9],因此,模型结构的不确定性分析也通常从参数不确定性分析开始。

模型不确定性分析方法很多,包括区域性灵敏度分析方法(regionalized sensitivity analysis, RSA)、最大似然法、广义的卡尔曼滤波方法等。作为一种基于随机采样统计方法的自动搜索识别法,RSA方法由于应用方便,不需要太多假设条件,不需要对模型进行修改,因而在模型不确定性分析中得到广泛地应用^[10]。另外,除了可以用于模型的参数识别之外,RSA方法同时也是一种灵敏度分析方法。与传统灵敏度分析方法不同,RSA方法克服了传统上只能对单个参数进行灵敏度分析

收稿日期: 2011-07-18; 修订日期: 2012-01-11
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: 黄金良(1975~),男,博士,副教授,主要研究方向为城市降雨径流特征识别与模拟, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

的局限性,并考虑了模型结构导致的参数相关性,能够深入分析与理解模型系统^[11]。近年来 RSA 方法逐渐地被应用于模型参数识别等研究。例如:邓义祥等^[12]讨论了在稀疏数据条件下用 RSA 方法识别 CATR 水质模型参数;徐一剑等^[13]用 RSA 方法研究温州市温瑞塘河的水质参数不确定性;邓义祥等^[14]将 RSA 方法进行了改进,使之参数集从二元扩展到多元,研究的对象不局限于模型参数值分布,也包括模型目标函数分布;Sun 等^[15]以松花江为例,用 RSA 方法确定了模型参数,用于评估结冰水体中突发环境污染事故在冰融合过程中是否造成二次污染。RSA 方法还被用于城市发展的战略环评、流域开发对河流水质的影响评估等^[16,17]。

近年来, RSA 方法已被引入到城市降雨径流模拟的研究领域^[18~21]。但总体而言,对于城市降雨径流模拟的参数不确定性分析的研究尚待进一步的开展。本研究基于国际主流且应用成熟的城市降雨径流模型(stormwater management model, SWMM)^[22],

以厦门研究区为例,应用 RSA 方法较为系统地开展了城市降雨径流水文水力和水质模拟的参数不确定性分析。

1 材料与方法

1.1 流域概况及实验方案

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。公园绿地作为厦门市重要的土地覆盖类型,占全市土地面积的 37%,因此本研究选取的绿地为主导土地利用类型的小流域在区域上具有代表性^[23]。本区域面积为 3.26 km²,以城市人工绿地为主。其中绿地面积 2.13 km²,道路 0.65 km²,屋面约 0.48 km²,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[24]。选取 2008~2009 年 3 场不同降雨强度的降雨分别进行模拟实验,降雨特征见表 1 所示。

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 monitored in this study

降雨时间	降雨历时 /min	降雨量 /mm	总径流量 /m ³	平均降雨强度 /mm·min ⁻¹	雨前干期长度 /d	样品数 /个
2008-05-05 T09:27~14:13	286	9.37	77.62	0.033	11	27
2009-03-13 T18:55~20:45	110	12	109.71	0.109	3	12
2009-03-27 T19:22~20:47	85	2.46	4.78	0.029	4	12

1.2 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、水力和水质模块相关参数的取

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。本研究中 SWMM 参数及其取值范围、取值方法如表 2 和表 3 所示。

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	参数取值方法
1	Area	汇水单元面积/km ²	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	GIS 数据库
3	Slope	汇水单元坡度/%	0.322 0~0.932 9	GIS 数据库
4	Imperv	汇水单元不透水率/%	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	模型手册,文献
6	N-Perv	汇水单元透水区曼宁糙率	0.05~0.50	模型手册,文献
7	Dstore-Imperv	汇水单元不透水区贮水深度/mm	0~3	模型手册,文献
8	Dstore-Perv	汇水单元透水区贮水深度/mm	2.54~6	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	文献
10	Curve Number	曲线特征值	39~98	文献和模型手册
11	Conductivity	传导系数/mm·h ⁻¹	0~60	文献和模型手册
12	Con-Length	管道长度/m	12.23~48.83	GIS 数据库
13	Con-Mann	管道曼宁糙率	0.011~0.024	模型手册,文献

表3 SWMM 模型水质模块主要参数及其取值范围、取值方法

Table 3 Major parameters with respect to SWMM water quality (SS) module

参数编号	参数代码	土地利用类型	参数名称	物理意义	取值范围	参数取值方法
1	BL1	绿地	Max. Buildup	地表最大可累积的污染量/kg·hm ⁻²	0~100	模型手册,文献
2	BL2		Rate Constant	地表累积速率/d ⁻¹	0.2~2	模型手册,文献
3	BL3		Rate/Sat. Constant	常数项	0~20	模型手册,文献
4	WL1		Coefficient	地表冲刷系数	0~0.02	模型手册,文献
5	WL2		Exponent	地表径流量幂指数	0~2	模型手册,文献
6	BRd1	道路	Max. Buildup	地表最大可累积的污染量/kg·hm ⁻²	0~100	模型手册,文献
7	BRd2		Rate Constant	地表累积速率/d ⁻¹	0.2~2	模型手册,文献
8	BRd3		Rate/Sat. Constant	常数项	0~20	模型手册,文献
9	WRd1		Coefficient	地表冲刷系数	0~0.02	模型手册,文献
10	WRd2		Exponent	地表径流量幂指数	0~2	模型手册,文献
11	BRf1	屋面	Max. Buildup	地表最大可累积的污染量/kg·hm ⁻²	0~100	模型手册,文献
12	BRf2		Rate Constant	地表累积速率/d ⁻¹	0.2~2	模型手册,文献
13	BRf3		Rate/Sat. Constant	常数项	0~20	模型手册,文献
14	WRf1		Coefficient	地表冲刷系数	0~0.02	模型手册,文献
15	WRf2		Exponent	地表径流量幂指数	0~2	模型手册,文献

值得一提的是,本研究采用运动波方程作为输流方程,SCS 曲线特征值模型为入渗模型.水质部分(水质参数为悬浮颗粒物,SS)的累积函数和冲刷函数分别采用饱和浸润方程和指数方程.

1.3 参数识别方法

1.3.1 RSA 方法

RSA 方法又称 HSY (Homberg-Spear-Young) 算法,改变了寻找最优单参数点的传统思维.在某种意义上是以牺牲精度换取可靠性,这使得 RSA 方法在降低精度的情况下,尽可能地估计到潜在的预测风险.另外,RSA 还可进行区域灵敏度分析,以判别参数的相对重要性^[25].

RSA 方法的主要步骤如下^[9,25]:①确定参数可能取值区间,即确定参数取值的上限和下限以及空间统计分布状态;②根据已有数据和模拟的要求,将模拟的结果划分为可接受和不可以接受 2 种类型,可接受模拟结果的参数组称为行为参数,不可接受模拟结果的参数组称为非行为参数;③对参数在取值区间进行随机采样,用采样的参数进行系统模拟;④根据这组参数模拟的结果把参数进行归类,分别对应于②中的 2 种划分方案;⑤重复③和④,直到找到要求数据量可以接受的参数为止.

1.3.2 参数可识别性和区域灵敏度

RSA 方法是通过参数的可识别性判断和区域灵敏度的计算来衡量的.模型参数的可识别性可以用累积分布函数或概率密度函数来表示.概率峰值越明显就表示参数的可识别性越强,概率峰值越不明显则表示参数的可识别性越弱.

RSA 方法可求出行为参数与非行为参数的样

本分布,通过计算 2 参数样本之间的统计距离,得到了包含参数空间分布特征整体的区域灵敏度.并通常采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验来比较样本分布. K-S 检验就是比较 2 个分布的最大垂直距离 $d_{m,n}$,距离越大,则分布的差异越大,参数的灵敏度越高.因此,可根据 $d_{m,n}$ 的大小对参数进行灵敏度排序或实际可识别性分析.

$d_{m,n}$ 是 2 个分布之间的最大距离, n 和 m 是行为参数和非行为参数的样本个数, F_n 和 F_m 对应于行为参数和非行为参数的样本分布函数.距离越大,则分布的差异越大,参数的灵敏度越高.因此,可根据 $d_{m,n}$ 的大小对参数进行灵敏度排序或实际可识别性分析.

1.3.3 采样方法

RSA 方法是建立在随机采样基础之上的.随机采样是指从总体上按照一定方法抽取有限个样本从而估计总体的特征.不同的随机采样方法具有不同的采样效率和采样精度,目前应用较为广泛的采样方法包括蒙特卡罗采样 (Monte Carlo sampling, MCS) 和拉丁超立方采样 (Latin hypercube sampling, LHS).

MCS 是最为常用的一种采样方法,其基本原理是:当所要求解的问题是某种事情出现的概率,或者是某个随机变量的期望值的时候,它们可用某种数字模拟实验的方法获得事件出现的频率,或者是它随机变量的平均值,并用它们作为问题的解.尽管存在收敛速度慢和误差概率性质等问题,但 MCS 由于其简单灵活,仍然在统计计算中发挥着重要的作用^[26].

1.3.4 目标函数

以模拟值与实测值的偏差 ΔDE 作为目标函数,

如式(1)所示:

$$\Delta DE = \left| \frac{X_0 - X_s}{x_0} \right| \quad (1)$$

式中 X_0 为模拟值, X_s 为实测值, ΔDE 为模拟值与实测值的偏差。

本研究中,对于水文水力模块 $\Delta DE \leq 20\%$,对于水质模块 $\Delta DE \leq 25\%$ 。

2 结果与讨论

采用表 2 和表 3 提及的参数取值方法,通过表 1 所列 3 场降雨实测数据对模型水文模块参数进行初步率定,率定结果见表 4。

2.1 基于 RSA 的 SWMM 水文水力模块参数识别

本研究选取 2008-05-05、2009-03-13、2009-03-27 的 3 场降雨,进行基于 Monte-Carlo 随机采样的 RSA 方法的 SWMM 模型水文水力参数识别。

2.1.1 水文水力模块参数可识别性和区域灵敏度分析

采用 Monte-Carlo 随机采样和 RSA 方法对 2008-05-05、2009-03-13、2009-03-27 的 3 场降雨的 Manning-imperv、Manning-perv、Dstore-imperv、Dstore-perv、Con-Mann、Curve Number、Conductivity

表 4 模拟和实测相对偏差¹⁾

Table 4 Comparison of observed and simulated values				
时间	项目	水文水力模块		水质模块
		总径流量/ m^3	峰值/ $m^3 \cdot s^{-1}$	SS/kg
2008-05-05	模拟	78.49	0.028 6	1.72
	实测	77.62	0.028 7	1.568
	偏差/%	1.12	0.25	9.72
2009-03-13	模拟	128.05	0.052 6	—
	实测	109.71	0.049 7	—
	偏差/%	16.7	-5.88	—
2009-03-27	模拟	2.83	0.001	0.032
	实测	4.78	0.001 4	0.034 4
	偏差/%	40.84	30.4	6.94

1) —表示数据缺失

这 7 个参数进行识别.在参数取值区间内均匀进行 50 000 次采样.取 3 场降雨的水文模拟值与实测值的偏差 ΔDE 都小于 20% 的参数作为可接受的参数.通过随机采样运算寻出 1 871 组“可行”的参数值,平均接受率为 3.74%。

其中 Dstore-imperv、Dstore-perv 和 Curve Number 这 3 个参数可识别性较好,其他 4 个参数的可识别性较差;详细可见概率密度图和累积分布函数(图 1)。由图 1 可见,Dstore-imperv、Dstore-perv

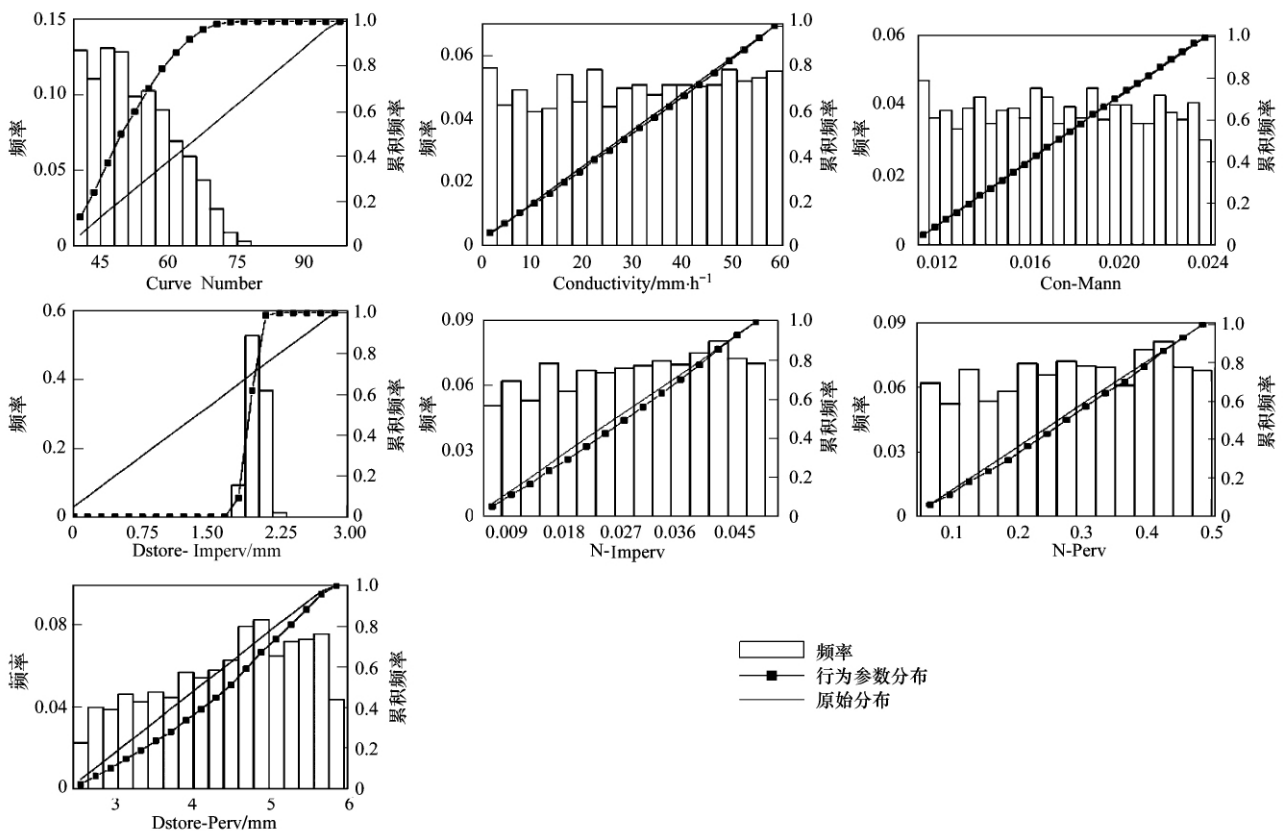


图 1 水文水力模块参数识别性

Fig. 1 Posterior probability distribution for parameters with hydrologic and hydraulic module

和 Curve Number 这 3 个参数的概率密度函数均呈较明显的类正态分布,可识别性较强.其中,Dstore-Imperv 在 1.8 ~ 2.25 出现的频率最高,Dstore-Perv 在 3.9 ~ 5.9 出现的频率最高,Curve Number 在 39 ~ 69 出现的频率最高.其他参数后验分布呈均与分布,在参数空间分布的高值区域识别性较差.进一步采用参数识别前后累积分布函数来研究参数的可识别性.识别过程对 Dstore-Imperv、Dstore-Perv 和 Curve Number 这 3 个参数的改进最为明显,其后验分布与前验分布具有显著的差别,说明它的可识别性较好,而其他参数的后验分布与前验分布差异较小,可识别性较差.本研究结果与其他的同类研究结果有相同亦有不一致.文献[18, 21, 27]的研究也表明,Dstore-Imperv 具有很好的可识别性,区域的灵敏度较强.董欣^[27]的研究表明,Dstore-Perv 和 Curve Number 都不是区域灵敏参数,且识别性也较差,这与本研究的结论不太一致,但是这 3 个参数的 K-S 值的排序与本研究一致.王浩昌等^[20]对城市降雨径流的全局灵敏度分析表明 N-Imperv 是灵敏参数,而 Dstore-Imperv 和 Dstore-Perv 都不是灵敏参数.这可能是因为本研究的主要用地类型为透水性较好的绿地,而上述 2 个研究区的主要用地类型都为透水性

较差的路面或屋面.所以,本研究中与透水性有关的 Dstore-Perv 和 Curve Number 参数在本研究中的区域灵敏度较好,识别性也较强.

采用 K-S 检验计算 7 个待识别参数的可接受和不可接受参数样本分布的区域灵敏度.表 5 为 7 个参数的区域灵敏度排序.从表 5 中可知 Dstore-Imperv、Curve Number、Dstore-Perv 这 3 个参数的 K-S 值分别排在前 3 名,N-Imperv、Con-Mann 的 K-S 值最小.

表 5 SWMM 模型区域水文水力参数灵敏度分析结果

Table 5 Regional sensitivity values and their orders for parameters in hydrological and hydraulic module

参数名称	参数识别范围 (概率较高值区间)	RSA 区域灵敏度	排序
N-Imperv	均匀分布	0.05	7
N-Perv	均匀分布	0.036	4
Dstore-Imperv/mm	1.8 ~ 2.25	0.647	1
Dstore-Perv/mm	3.9 ~ 5.9	0.126	3
Con-Mann	均匀分布	0.014	6
Curve Number	39 ~ 69	0.484	2
Conductivity	均匀分布	0.021	5

2.1.2 水文水力模块参数识别结果

在分析参数可识别性与区域灵敏度的基础上,将水文水力模块的参数识别结果列于表 6.

表 6 3 场降雨水文参数识别结果

Table 6 Results of preliminary recognition of hydrological and hydraulic parameters

参数编号	参数名称	参数取值范围	率定参数取值	参数取值方法
1	Area	0.032 0 ~ 0.766 4	空间分布特征	GIS 数据库
2	Width	9.0 ~ 76	空间分布特征	GIS 数据库
3	% Slope	0.322 0 ~ 0.932 9	空间分布特征	GIS 数据库
4	% Imperv	13 ~ 98	空间分布特征	调查估计
5	N-Imperv	0.005 ~ 0.05	0.014 ~ 0.05	RSA 方法
6	N-Perv	0.05 ~ 0.50	0.05 ~ 0.50	RSA 方法
7	Dstore-Imperv	0 ~ 3	1.8 ~ 2.25	RSA 方法
8	Dstore-Perv	2.54 ~ 6	3.9 ~ 5.9	RSA 方法
9	% Zero-Imperv	5.0 ~ 20	空间分布特征	文献
10	Curve Number	39 ~ 98	39 ~ 69	RSA 方法
11	Conductivity	0 ~ 60	0 ~ 60	RSA 方法
12	Con-Length	12.23 ~ 48.83	空间分布特征	GIS 数据库
13	Con-Mann	0.011 ~ 0.024	0.011 ~ 0.024	RSA 方法

采用表 6 参数识别结果,进一步模拟 3 场降雨的水文过程曲线,根据局部灵敏度分析的结果 Curve Number 与总径流量呈正相关,Conductivity 与总径流量呈负相关,因此以 Curve Number 的最小值和其他参数的最大值生成模拟水文的最小值过程线,以 Curve Number 的最大值和其他参数的最小值来模拟水文的最大值过程线,并与实测值进行对

比,结果如图 2 所示.

2.1.3 水文水力参数识别结果检验

参数识别之后,将 3 场降雨识别参数的取值区间调整为各自识别后的参数区间,其余参数的取值保持不变.在重新调整参数取值区间后,采用基本 MCS 随机采样 50 000 次.模拟结果表明,各个场次降雨的平均接受率都有大幅度的提

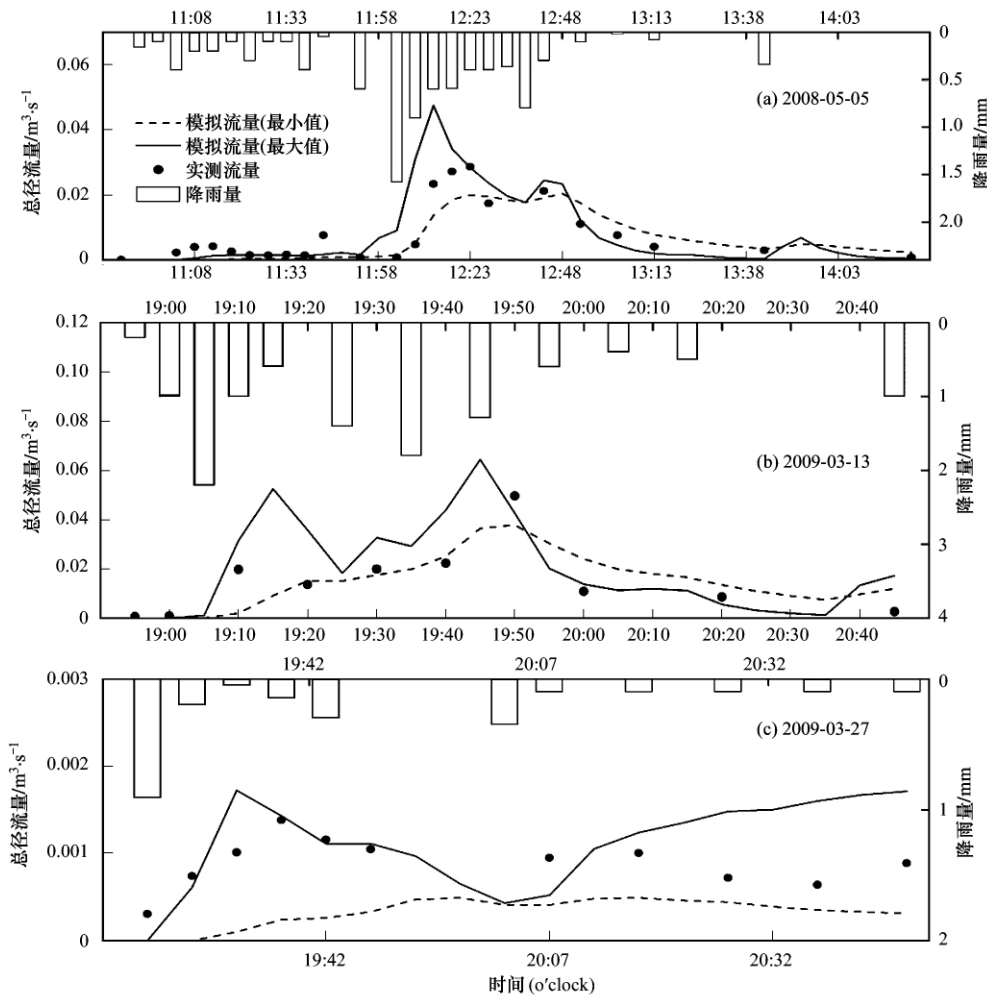


图 2 3 场降雨水文过程线模拟情况

Fig. 2 Comparison of simulation flow and observed flow

高 2008-05-05、2009-03-13 和 2009-03-27 的 3 场降雨模拟的平均接受率分别从原来的 30.2%、6.26%、6.65% 增加到 99.7%、9.26% 和

32.47%。说明在重新调整参数取值区间之后,通过 RSA 方法较好地实现了单一场次降雨径流的模拟,其结果如图 3~5 和表 7 所示。

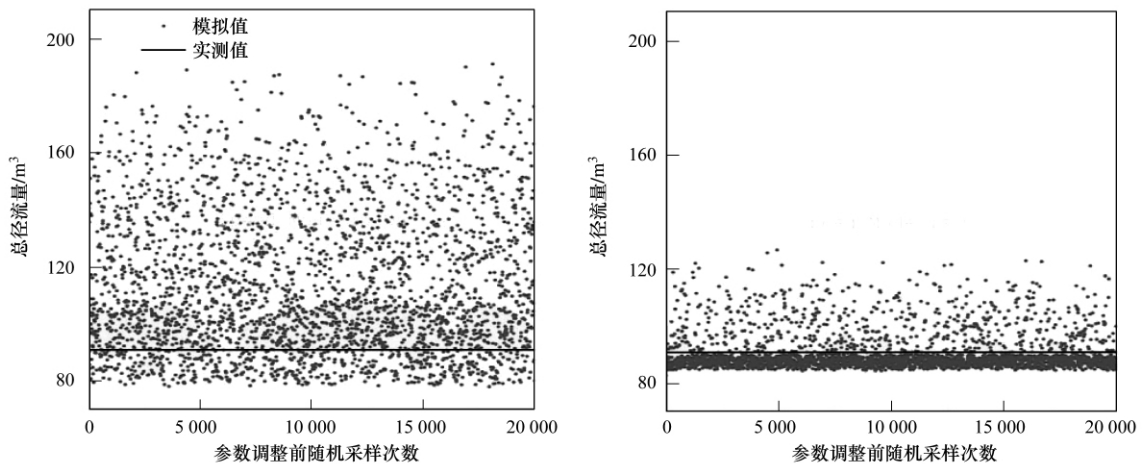


图 3 2008-05-05 场次降雨水文水力参数调整前后总径流量模拟结果比较

Fig. 3 Simulation results of total runoff before and after identification of rainfall event 2008-05-05

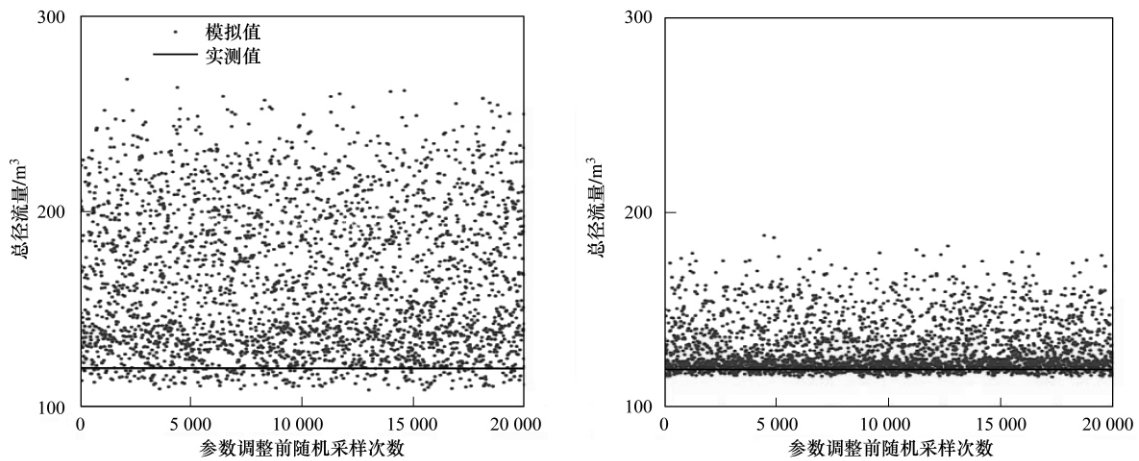


图4 2009-03-13 场次降雨水文水力参数调整前后总径流量模拟结果比较

Fig. 4 Simulation results of total runoff before and after identification of the rainfall event 2009-03-13

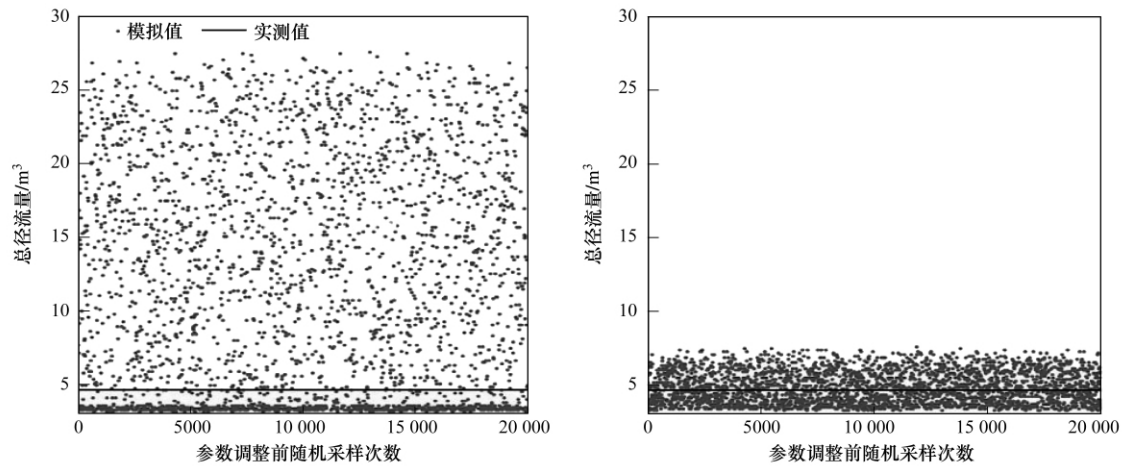


图5 2009-03-27 场次降雨水文水力参数调整前后总径流量模拟结果比较

Fig. 5 Simulation results of total runoff before and after identification of the rainfall event 2009-03-27

表7 3 场降雨水文水力参数调整前后随机采样统计值比较

Table 7 Comparison of simulated flows before and after parameters identification

降雨场次	参数	接受率/%	最小值	最大值	均值	标准差	
2008-05-05	总径流量/ m^3	原始取值	3.74	77.21	201.14	113.39	24.78
		调整取值后	48.5	82.58	126.87	90.43	6.68
	模拟偏差	原始取值	3.74	0.00	1.21	0.27	0.25
		调整取值后	48.5	0.00	0.40	0.05	0.05
2009-03-13	总径流量/ m^3	原始取值	3.74	107.19	280.98	165.33	36.51
		调整取值后	48.5	115.50	189.88	129.98	13.25
	模拟偏差	原始取值	3.74	0.00	1.35	0.39	0.30
		调整取值后	48.5	0.00	0.59	0.09	0.11
2009-03-27	总径流量/ m^3	原始取值	3.74	3.15	27.77	11.59	7.60
		调整取值后	48.5	3.26	7.67	4.86	1.08
	模拟偏差	原始取值	3.74	0.01	4.65	1.54	1.38
		调整取值后	48.5	0.01	0.61	0.19	0.12

2.2 基于 RSA 的 SWMM 水质模块参数识别

水质参数的识别是在水文水力参数识别和验证的基础上进行的. 将水文水力模块中已识别的 Dstore-

Imperv、Dstore-Perv、Curve Number 这 3 个参数后验取值范围作为新的参数范围, 将污染物的累积冲刷模块添加进原有的水文水力的模型, 共有 3 种土地利用类型

的 Max. Buildup、Rate Constant、Rate/Sat. Constant、Coefficient、Exponent 5 类共 15 个参数需要加以识别.

2.2.1 水质模块参数可识别性和区域灵敏度分析

本研究选取 2008-05-05 和 2009-03-13 降雨对 SS 水质参数进行识别.

采用 MCS 随机采样和 RSA 方法对 3 场降雨的 15 个参数进行识别. 在参数取值区间内均匀进行

50 000 次采样. 取模拟值与实测值偏差 < 25% 的参数作为可接受的参数. SS 的随机采样运算寻出 1 373 组“可行”的参数值. 平均接受率为 2.75%.

对于水质参数 SS 的 15 个水质参数中 WL1、WL2、BRd1、WRd1、WRd2、BRf1、BRf3、WRf1、WRf2 共 9 个参数的识别性较好, 详细可见概率密度图和累积分布函数(图 6).

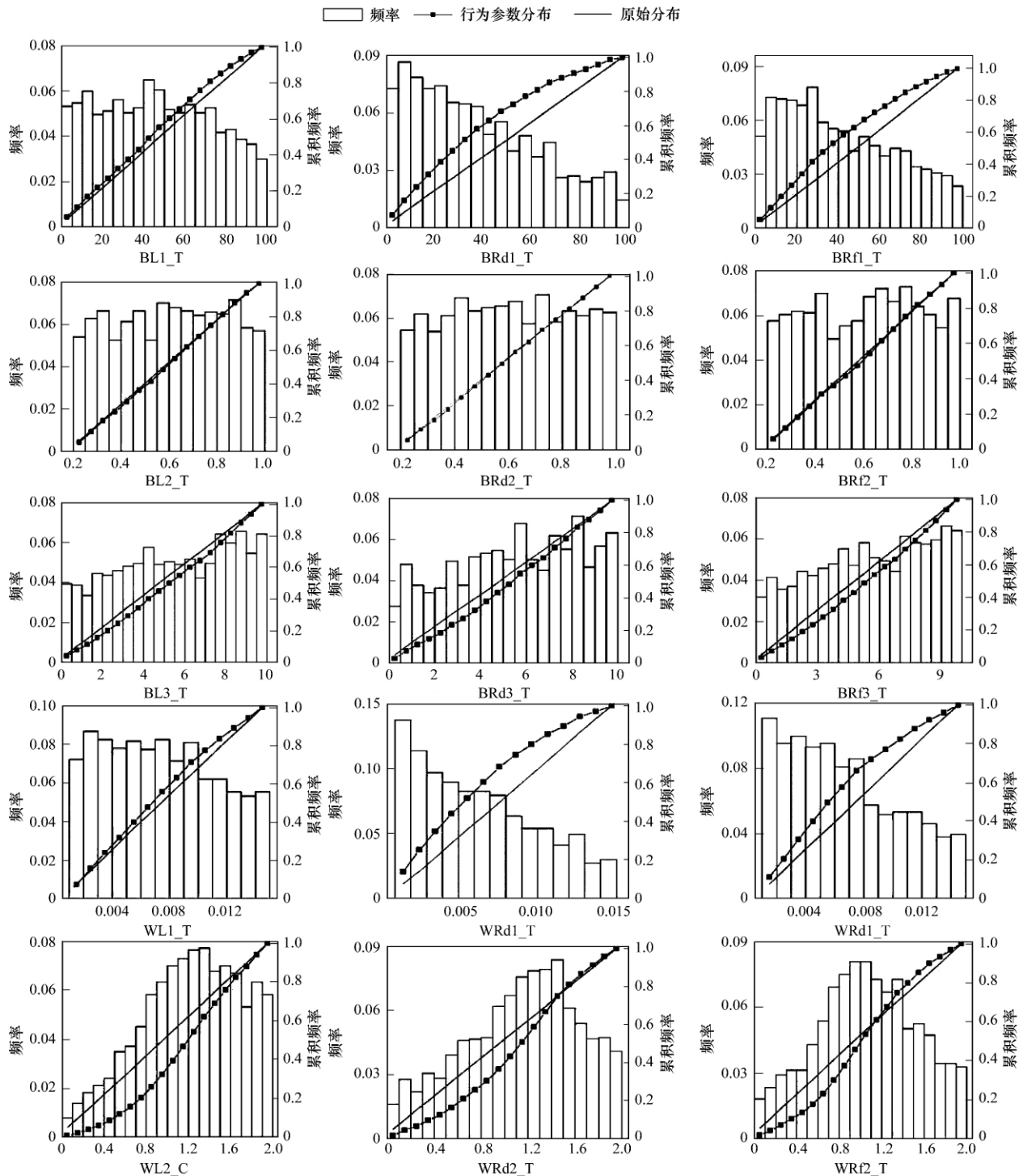


图 6 SS 水质模拟的概率密度

Fig. 6 Posterior probability distribution for parameters in water quality module with respect to SS

由图 6 可见,对于水质参数 SS 的 WL1、WL2、BRd1、WRd1、WRd2、BRf1、BRf3、WRf1、WRf2 这 9 个参数概率密度函数均呈较为明显的类正态分布,可识别性较强.其中各个参数出现频率最高的范围可见表 3.其他参数后验分布呈均匀分布,在参数空间分布的高值区域识别性较差.进一步采用参数识别前后累积分布函数来研究参数的可识别性.从图 6 可知,SS 中 WL1、WL2、BRd1、WRd1、WRd2、BRf1、BRf3、WRf1、WRf2 这 9 个参数的改进最为明显,其后验分布与前验分布具有显著的差别,说明它的可识别性较好,而其他 6 个参数的后验分布与前验分布差异较小,可识别性较差.

整体来看,在 3 种土地利用类型中,SS 的冲刷函数中的 2 个参数的识别性都较高.另外,SS 的 Max. Buildup 参数在道路和屋顶这 2 种土地利用类型的识别性都较好.董欣^[27]的研究表明屋顶和道路的冲刷模块的 2 个参数的识别性都较强,且区域灵敏度大.这与本研究的结果一致.另外对于绿地来说,黄金良^[18]的研究中只有 WL1 具有较强的可识别性,而本研究中绿地除了地表冲刷系数,地表径流量幂指数也有很好的识别性.综合相关研究和本研究的结果来看,各种土地利用类型的冲刷模块参数的识别性都较强,而累积参数中地表最大可累积的污染物的识别性也较强.

采用 K-S 检验计算 15 个待识别参数的可接受和不可接受参数样本分布的区域灵敏度.图 7 为 2 个水质指标的 15 个参数的区域灵敏度排序.3 种用地类型的 Rate Constant 参数 K-S 距离最小,Max. Buildup、Coefficient 和 Exponent 参数的 K-S 距离相对较大;从不同用地类型来看,不同用地类型的 K-S 距离没有普遍的规律,而绿地的 SS 的 Max. Buildup 和 Coefficient 参数的 K-S 距离较其他用地类型都小.

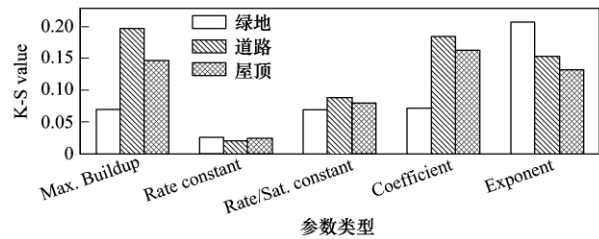


图 7 SS 水质模拟的参数区域灵敏度
Fig. 7 Regional sensitivity values of SS parameters

2.2.2 水质模块参数识别结果

在分析参数可识别性与区域灵敏度的基础上,将水质模块的参数识别结果列于表 8.

图 8 所示为用水文水力参数识别的 N-Imperv、Des-Imperv、Des-Perv 参数范围的中值和用经 RSA 方法参数率定后的 SWMM 模型模拟 2 场降雨的水质过程曲线.根据 SS 局部灵敏度分析的结果

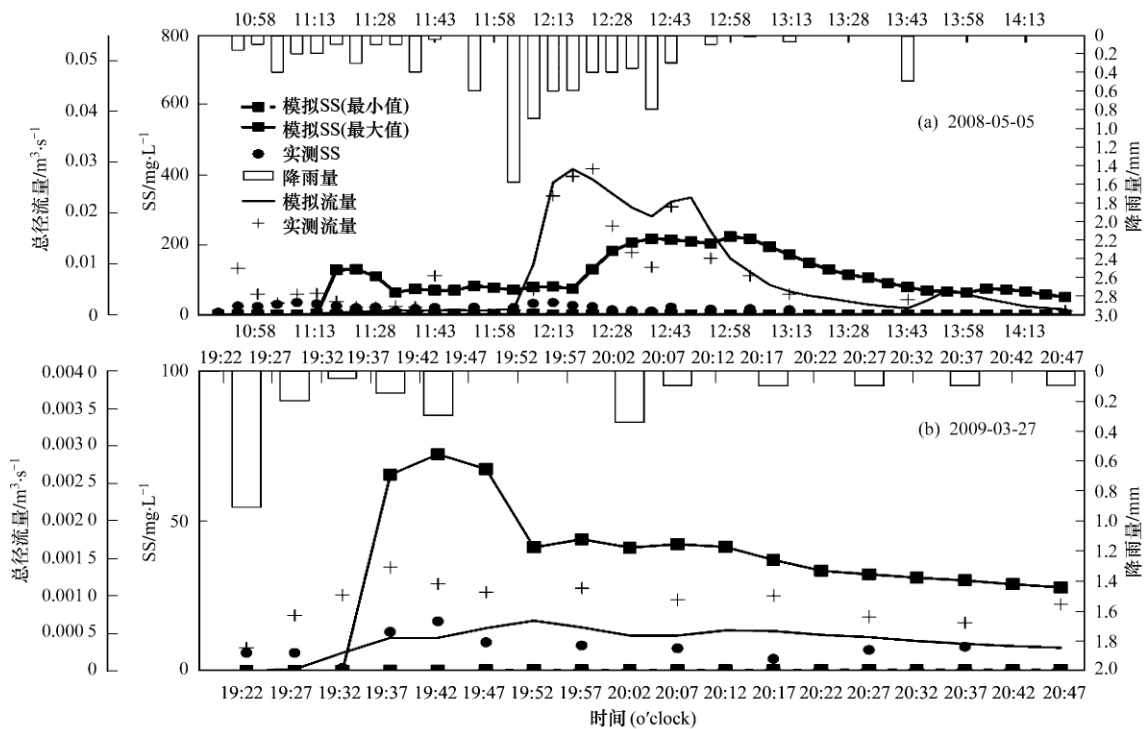


图 8 2 场降雨 SS 过程线模拟情况

Fig. 8 Simulation of SS for two rainfall events

表 8 SWMM 模型水质模块主要参数识别结果

参数编号	参数代码	SS 率定参数取值
1	BL1	1 ~ 75
2	BL2	具空间分布特征
3	BL3	1.5 ~ 10
4	WL1	0.001 ~ 0.012
5	WL2	0.7 ~ 2
6	BRd1	1 ~ 70
7	BRd2	具空间分布特征
8	BRd3	0.5 ~ 10
9	WRd1	0.001 ~ 0.009
10	WRd2	0.6 ~ 2
11	BRf1	1 ~ 75
12	BRf2	具空间分布特征
13	BRf3	2 ~ 10
14	WRf1	0.001 ~ 0.008
15	WRf2	0.5 ~ 1.7

分别生成最大值和最小值的模拟 SS 过程线,并与实测值进行对比,结果如图 8.

2.2.3 水质模块参数识别结果检验

参数识别之后,即将 2 场降雨识别的参数的取值区间调整为各自识别后的参数区间,其余参数的取值保持不变,在重新调整参数取值区间后,采用基本 MCS 随机采样 50 000 次.模拟结果表明,各个场次降雨的平均接受率有一定的提高,但是提高的幅度不大,COD 的接受率从 1.5% 增加到 8.1%,SS 的接受率从 2.75% 增加到 7.6%,调整前后的比较结果见图 9 和图 10.

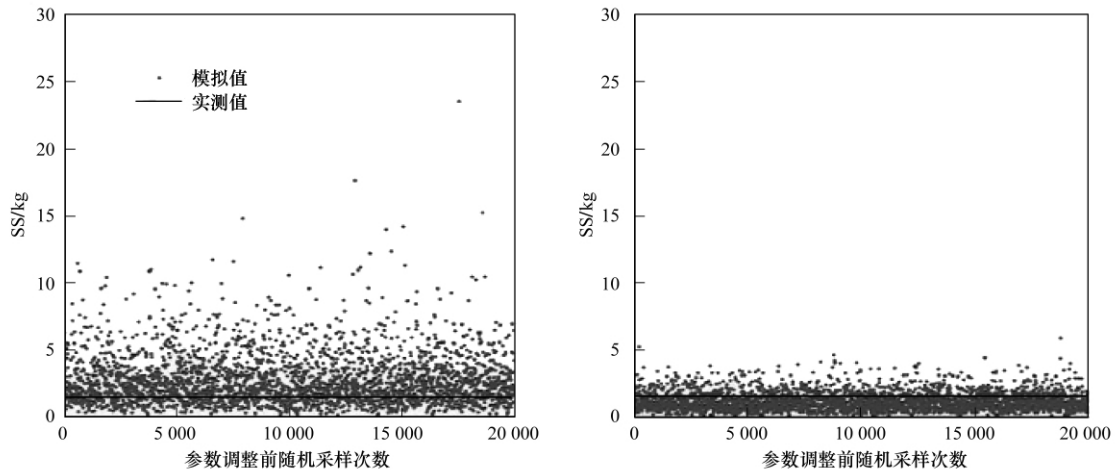


图 9 2008-05-05 场次降雨 SS 调整前后总径流量模拟结果比较

Fig. 9 Comparison of 2008-05-05 SS simulation results before and after identification

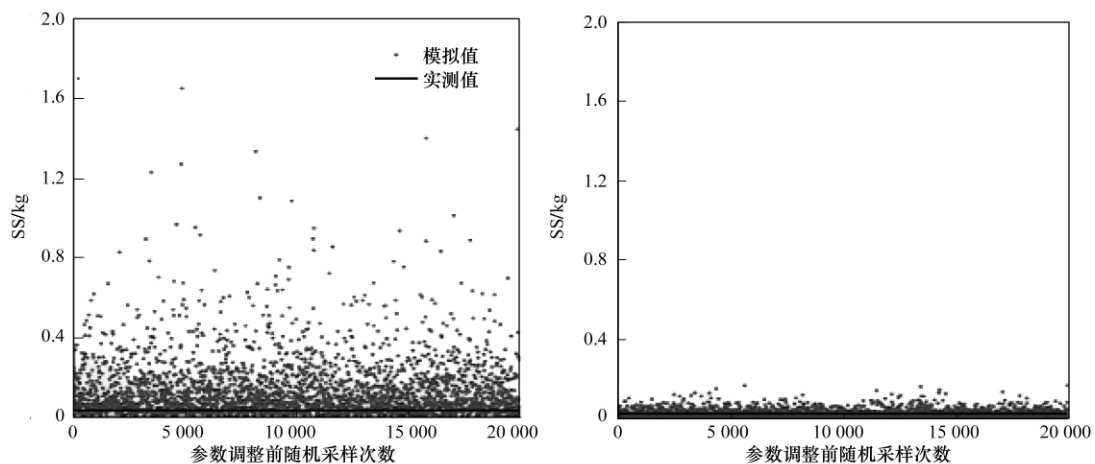


图 10 2009-03-27 场次降雨 SS 调整前后总径流量模拟结果比较

Fig. 10 Comparison of 2009-03-27 SS simulation results before and after identification

3 结论

(1) 水文水力模块中 Dstore-Imperv、Dstore-Perv 和 Curve Number 3 个参数可识别性较好; 水文水力模块的区域灵敏度的排序为: Dstore-Imperv > CN > Dstore-Perv > N-Perv > Conductivity > Con-Mann > N-Imperv.

(2) SS 水质模块中 WL1、WL2、BRd1、WRd1、WRd2、BRf1、BRf3、WRf1、WRf2 这 9 个参数的识别性较好. 水质模块 SS 冲刷函数中的地表冲刷系数 (Coefficient) 和地表径流幂指数 (Exponent) 2 个参数和累积函数中的地表最大可累积的污染量 (Max. Buildup) 的识别性都较高, 不确定性较小. 而从区域灵敏度的排序来看, 3 种用地类型的 Rate Constant 参数 K-S 距离最小, Max. Buildup、Coefficient 和 Exponent 参数的 K-S 距离相对较大.

参考文献:

- [1] Drechsler M. Sensitivity analysis of complex models [J]. *Biological Conservation*, 1998, **86**(3): 401-412.
- [2] Freni G, Mannina G, Viviani G. Uncertainty assessment of an integrated urban drainage model [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **373**(3-4): 392-404.
- [3] Willems P. Quantification and relative comparison of different types of uncertainties in sewer water quality modeling [J]. *Water Resource*, 2008, **42**(13): 3539-3551.
- [4] Mannina G, Freni G, Viviani G, et al. Integrated urban water modelling with uncertainty analysis [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(6-7): 379-386.
- [5] Radwan M, Willems P, Berlamont J. Sensitivity and uncertainty analysis for river quality modelling [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2004, **6**(2): 83-99.
- [6] Frey H C. Quantitative analysis of uncertainty and variability in environmental policy making [R]. Environmental science and engineering fellows program report. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, 1992. 25-33.
- [7] Bertrand-Krajewski J L. Stormwater pollutant loads modelling: epistemological aspects and case studies on the influence of field data sets on calibration and verification [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(4): 1-17.
- [8] Beck M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty [J]. *Water Resources Research*, 1987, **23**(8): 1393-1442.
- [9] Osidele O O, Beck M B. Identification of model structure for aquatic ecosystems using regionalized sensitivity analysis [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(7): 271-278.
- [10] 程声通. 环境系统分析教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(6): 6-10.
- [12] 邓义祥, 陈吉宁, 杜鹏飞. HSY 算法在水质模型参数识别中的应用探讨 [J]. *上海环境科学*, 2002, **21**(8): 497-500.
- [13] 徐一剑, 曾思育, 张天柱. 基于不确定性分析框架的动态环状河网水质模型——以温州市温瑞塘河为例 [J]. *水科学进展*, 2005, **16**(4): 574-580.
- [14] 邓义祥, 富国, 于涛, 等. 改进的 RSA 方法在参数全局灵敏度分析中的应用 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 40-43.
- [15] Sun F, Chen J, Tong Q, et al. Development and identification of an integrated waterworks model for trihalomethanes simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(6): 2077-2086.
- [16] Liu Y, Chen J N, He W Q, et al. Application of an uncertainty analysis approach to strategic environmental assessment for urban planning [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(8): 3136-3141.
- [17] Fu G T, Butler D, Khu S T. The impact of new developments on river water quality from an integrated system modelling perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(4): 1257-1267.
- [18] 黄金良. 澳门半岛城市降雨径流污染特征与模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [19] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1495-1501.
- [20] 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.
- [21] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(1): 45-51.
- [22] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model, Version 4. User's manual [R]. EPA/600/3-88/001a. Athens, GA: Environmental Protection Agency, 1988. 569.
- [23] Huang J L, Tu Z S, Du P F, et al. Uncertainties in stormwater runoff data collection from a small urban catchment, Southeast China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(11): 1703-1709.
- [24] 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.
- [25] 邓义祥. 稀疏数据条件下河流水质模型的参数识别 [D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [26] 王浩昌. 基于不确定性分析的 SWMM 参数识别方法研究及工具开发 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [27] 董欣. 城市地表径流水质水量特征分析 [D]. 北京: 清华大学, 2007.