

赵冬泉, 陈吉宁, 王浩正, 等. 2009. 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, 29(6): 1170–1177

Zhao D Q, Chen J N, Wang H Z, et al. 2009. Local sensitivity analysis for pollution simulation of urban rainfall runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(6): 1170–1177

城市降雨径流污染模拟的水质参数局部灵敏度分析

赵冬泉^{1,2,*}, 陈吉宁¹, 王浩正², 杜鹏飞¹, 王浩昌¹, 孔德军³

1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084

2. 北京清华城市规划设计研究院环境与市政所, 北京 100084

3. 北京世奥森林公园开发经营有限公司, 北京 100084

收稿日期: 2008-09-01 修回日期: 2008-12-22 录用日期: 2009-04-10

摘要: 在城市降雨径流污染模拟研究中, 参数灵敏度分析是进行模型率定和验证的必要研究环节, 同时也是理解非点源污染产生和变化过程及进行城市降雨径流污染管理的重要参考。运用修正的摩尔斯分类筛选法 (Morris screening method) 对暴雨管理模型 (Storm Water Management Model 简称 SWMM) 的水质参数进行局部灵敏度分析。研究结果显示, 占区域比例较大的不透水地表的累积和冲刷参数灵敏度较高; 在强降雨过程中, 降雨中污染物浓度的灵敏度较高。研究表明, 对占区域比例较大的不透水地表的累积和冲刷参数进行仔细识别, 对于非点源污染模型的验证具有重要意义; 强降雨时雨水本底浓度的测量误差会影响降雨径流污染模拟的准确度。

关键词: 局部灵敏度分析; 摩尔斯分类筛选法; SWMM 模型; 水质参数; 降雨径流污染

文章编号: 0253-2468(2009) 06-1170-08 中图分类号: X522 文献标识码: A

Local sensitivity analysis for pollution simulation of urban rainfall runoff

ZHAO Dongquan^{1,2,*}, CHEN Jining¹, WANG Haozheng², DU Pengfei¹, WANG Haochang¹, Kong Dejun³

1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Department of Environment and Infrastructure, Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Institute, Beijing 100084

3. Beijing Olympic Park Development and Management Co. Ltd., Beijing 100084

Received 1 September 2008;

received in revised form 22 December 2008;

accepted 10 April 2009

Abstract Sensitivity analysis of urban rainfall runoff simulation is a crucial procedure for model calibration and validation. It also provides important information for learning about the rainfall runoff process and removing non-point source pollution. An improved Morris screening method was used to analyze the local sensitivity of water quality parameters of the Storm Water Management Model (SWMM) with the aim of identifying model parameters. Results showed that the sensitivity indexes of the water quality parameters can be influenced by many factors, such as rain intensity and land-use type. The buildup and washoff parameters of the most dominant impervious land uses have relatively high sensitivity indexes. The background value of rainfall quality has the highest sensitivity in high intensity rainfall. The results showed that parameter identification and pollution control of the dominant impervious areas are important for simulation and removal of rainfall runoff pollution. The measurement error of background concentration of rainfall will impact the accuracy of rainfall runoff simulation.

Keywords local sensitivity analysis; Morris screening method; SWMM; water quality parameters; rainfall runoff pollution

1 引言 (Introduction)

随着以城市生活污水和工业废水为代表的点源污染得到有效的控制, 城市降雨径流引起的非点源污染对城市生态环境的威胁越来越突出; 它不仅污染地表水体, 破坏城市生态环境, 而且可通过下渗影响地下水水质。利用数学模型模拟城市非点源

污染的产生和输移规律是研究污染来源和扩散方式的有效手段 (李怀恩等, 1996; 宫莹等, 2003)。20 世纪 80 年代初期国外的研究者就已经在此方面进行了研究和开发, 并建立了大量的统计模型、机理模型及管理规划模型, 如著名的暴雨管理模型 (Storm Water Management Model, 简称 SWMM)、集水区管理支持系统 (CMSS) (Davis *et al.*, 1998)、储

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2006CB403400)

Supported by the National Basic Research and Development Program of China (No. 2006CB403400)

作者简介: 赵冬泉 (1978—), 男, 博士生; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zdq01@mails.tsinghua.edu.cn

Biography ZHAO Dongquan (1978—), male, Ph.D. candidate. * **Corresponding author**, E-mail: zdq01@mails.tsinghua.edu.cn

存处理和漫流模型 (Storage Treatment Overflow Runoff Model 简称 STORM)、化学污染物径流负荷与流失模型 (Chemicals Runoff and Erosion for Agricultural Management Systems 简称 CREAMS)、非点源污染环境影响评价模型 (Areal Non-point Source Watershed Environmental Simulation 简称 ANSWERS)等。其中, SWMM 模型由于模拟计算功能强、适用性广等优点, 在世界各地被广泛应用于城市降雨径流导致的水量和水质问题的评估和管理 (Burian *et al.*, 2001; Valeo *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005)。在使用模型模拟降雨径流污染时, 分析参数灵敏度可以提高模型构建过程中参数识别和模型验证的效率。

参数灵敏度分析的作用是定性或定量的评价模型输入误差对模型输出结果的影响 (Crosetto *et al.*, 2001)。灵敏度分析主要分为局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。其中, 局部灵敏度分析检验单个参数的变化对模型结果的影响程度, 在模型分析过程中进行参数局部灵敏度分析具有以下意义。

①筛选对模型输出结果影响大、需要准确识别的参数, 对于这些参数, 在模型分析过程中需要集中精力尽可能的提高参数的准确度; 而对于那些对模型结果影响不大的不灵敏参数, 只需选取其经验值。这会在很大程度上减少模型参数率定和验证的工作量 (徐崇刚等, 2004)。②加深对模型的理解。不同参数的变化对模型的影响程度和方式都不同, 有的参数对输出曲线形状影响比较大, 有的对总量影响比较大, 有的对峰值影响比较大, 全面掌握参数对模型的影响程度和方式有助于在不同的模型使用条件下选择相应的敏感参数进行重点识别。③加深对所模拟系统行为的理解。通过灵敏度分析可以发现所模拟系统对哪些参数变化敏感, 从而可以确定各模拟因子对所模拟系统的影响程度。Zaghloul (1983)、Schilling (1994)、Drechsler (1998)、黄金良和杜鹏飞 (2007)等都曾对城市降雨径流模拟的参数灵敏度进行研究。但是, 目前的研究大部分还仅限于对降雨径流模拟水文/水力参数的灵敏度分析, 且模型输出变量多为水量模拟结果, 对于水质参数的局部灵敏度分析研究还较少。本研究中以径流污染模拟为目的, 对 SWMM 模型水质参数的局部灵敏度进行分析, 包括研究区主要土地利用类型的累积参数、冲刷参数、降雨本底浓度和街道清扫去除效率等参数。

2 研究方法 (Methods)

2.1 研究区概况及模型概化

研究区位于澳门特别行政区, 占地面积 13.65hm², 各种土地利用类型所占比例为屋面 60.4%、路面 32.1%、绿地 7.5%, 研究区平均坡度为 7.75%, 服务人口约 27000 人, 是澳门典型的商住混合区。根据流域地形、土地覆盖和管网特征调查, 利用 DigiWater 软件中基于 GIS 方法开发的模型概化功能 (DigiWater, 2008; 赵冬泉等, 2008)对研究区进行概化。研究区内共有 72 个雨水检查井, 雨水排除管道 71 根, 总长 1007.71m, 子汇水区共 113 个。于 2005 年 8 月 24 日在小流域出口安装了自动采样器 (ISCO 6712)和雨量计进行监测。雨量和流量数据每分钟记录 1 次, 共采集 11 个水质样品送回实验室分析。研究区和监测点位置见图 1。

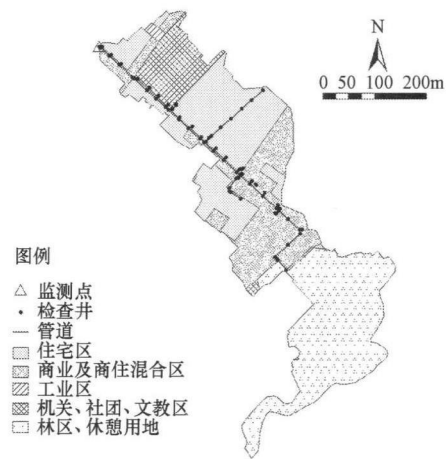


图 1 试验小流域土地利用图

Fig. 1 Land use map of the experimental catchment

2.2 SWMM 径流污染模拟原理

SWMM 是由美国环保署 (United States Environmental Protection Agency 简称 USEPA)在 20 世纪 70 年代开始开发, 是最早提出的、最广泛应用于城市非点源产生及其在排水系统中迁移转化的模型之一 (Huber *et al.*, 1992)。SWMM 模型可以对城市地下管网、明渠或城市河网中单场降雨或连续降雨过程的非点源污染产生和变化规律进行模拟, 对模拟时间和建模区域面积没有限制, 是适用性很强的模型 (沈丹, 2007)。

SWMM 模型主要通过污染物累积 (Buildup)和降雨过程中的污染物冲刷 (Washoff) 2 个过程来模拟非点源污染的产生 (Rossman, 2004)。20 世纪 80 年代, 研究者对污染物在地表的累积进行了大量的

研究,根据这些研究成果 SWMM 可将污染物在地表的累积增长过程表示为时间的线性、幂函数、指数函数和饱和函数形式,将冲刷过程 (Huber *et al.*, 1992)描述为指数方程、流量特性曲线方程和场降雨径流平均浓度 (Event mean concentration, 简称 EMC)方程. 其中,指数累积函数 (见式 (1))和指数冲刷函数 (见式 (2))是降雨径流污染模拟中应用最广泛的模型.

指数累积函数描述污染物的累积与时间成一定的指数关系,直到达到最大累积量,见式 (1). 指数函数由于形式较为简单,是应用最广泛的污染物冲刷函数 (Srinivasan *et al.*, 1994).

$$B = C_1 (1 - e^{-C_2 t}) \tag{1}$$

式中, C_1 为最大累积量 (单位面积或路长的污染物质量); C_2 为累积系数 (d^{-1}).

在指数冲刷方程中,冲刷速率与地表残留污染物量呈正比,与地表径流量呈指数关系,见式 (2).

$$W = C_3 q^{C_4} B \tag{2}$$

式中, W 为冲刷速率; C_3 为冲刷系数; C_4 为冲刷指数; q 为单位面积径流速率 ($mm \cdot h^{-1}$); B 为地表剩余污染物量 ($kg \cdot hm^{-2}$ 或 $kg \cdot m^{-1}$).

2.3 参数局部灵敏度分析方法

局部灵敏度分析是在某个参数最佳估计值附近进行“微扰动”,而其他参数保持不变的条件下,计算该参数在这一很小范围内的变化所导致模型输出结果的变化率. 局部灵敏度分析方法简单、计算量较小、易于实施,被广泛应用于环境水质模型的研究 (王建平等, 2006; 蒋颖等, 2006).

摩尔斯分类筛选法 (Morris, 1991)是目前应用较广的一种局部灵敏度分析方法 (黄金良等, 2007; Franco, 2003). 摩尔斯分类筛选法属于一次一个变量法 (One factor At a Time, 简称 OAT), 即选取模型中某一变量,其余参数值固定不变,在变量阈值范围内随机改变该参数值,运行模型得到模型输出的值,用模型输出对模型输入的变化率来表示参数变化对输出值的影响程度 (Franco, 2003). 修正的摩尔斯分类筛选法采用自变量以固定步长变化,见式 (3) (黄金良等, 2007). 参数灵敏度指数取多次扰动计算出的摩尔斯系数的平均值 (郝芳华等, 2004).

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

式中, S 为摩尔斯系数; 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.

2.4 参数初始值确定

2.4.1 SWMM 水文水力参数优化 降雨径流污染中水质的准确模拟首先需要对水量状况进行准确计算,所以进行水质参数的灵敏度分析前首先需要对水文水力参数进行优化. 蒋颖等 (2006)在对流域管理模型——WARMF 的泥沙和水质参数进行灵敏度分析前也曾首先对水文参数进行调节,直至达到模拟结果与监测数据的最佳拟合状态. 通过 SWMM 帮助文档 (Huber *et al.*, 1992)、文献中采用的经验值 (Zaghoul *et al.*, 2001; Tshrintzis *et al.*, 1998)和实验小区地表特征确定各参数的取值范围,汇水区面积和坡度通过 GIS 方法计算得到,地表曼宁粗糙率、Horton 渗透参数和洼地蓄积量参数的取值范围为文献报道的经验参数,确定参数取值范围后采用 Digital Water 软件的参数自动率定模块对水文水力参数进行了率定. 降雨和管网出口水量监测数据采用 2005 年 8 月 24 日的监测结果,该降雨历时 80 min,降雨强度 5.8 mm. 经过自动率定获得的最优参数模拟结果见图 2.

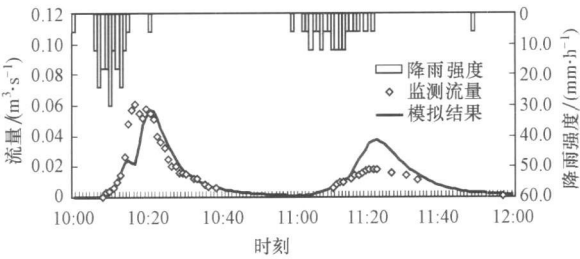


图 2 最优参数对出口水量模拟结果

Fig. 2 Simulation results of optimized parameters for outlet flow volume

2.4.2 SWMM 水质参数初始值 SWMM 模型可以对多种污染物随降雨径流的产生和传输过程进行模拟,本文选取 COD 为研究对象. COD 是城市降雨径流污染中的主要成分之一,且 COD 的监测分析方法产生的测量误差较小,有利于参数识别. 研究区土地利用类型主要为:屋面、路面和绿地. 每种土地利用包含 2 个累积和 2 个冲刷参数,路面还包含 1 个道路清扫参数,另外还包含降雨中污染物的浓度和传输过程中的衰减速率常数,本研究共选取 16 个水质参数进行分析,具体见表 1. 灵敏度分析中,一

般通过手动调参使得模拟结果与监测结果基本达到一致, 并将手动获取的参数值作为初始值, 在初始值基础上进行参数扰动设置. 但由于 SWMM 中水质参数数量较多, 相互之间影响复杂, 在没有较多先验信息的情况下很难通过手工获取较优参数使得预测结果曲线与监测曲线达到很好的拟合. 因此, 首先根据参考文献 (董欣等, 2008) 获取各参数

的取值范围以保证参数具有合理的物理意义, 然后采用 D i g i t a W a t e r 软件中的自动率定模块对参数进行初步的自动识别以使得模拟结果与监测结果基本一致. 通过上述方法利用 2005-08-24 的一场降雨实测数据对模型水质参数进行初步率定, 所获取的水质参数初始值见表 1.

表 1 SWMM 模型主要水质参数及初始值

Table 1 Major parameters and their initial values with respect to the SWMM water quality module					
土地利用类别	参数类别	参数	单位	参数描述	初始值
路面	街道清扫	Availability		街道清扫去除效率	0.3
	污染物累积	Max Buildup	kg hm ⁻²	最大累积量	6.27
		Rate Constant	d ⁻¹	累积速率常数	1.02
	污染物冲刷	Coefficient		冲刷系数	0.02
		Exponent		冲刷指数	0.53
		Cleaning Effic		街道清扫去除率	58.53%
绿地	污染物累积	Max Buildup	kg hm ⁻²	最大累积量	33.9
		Rate Constant	d ⁻¹	累积速率常数	0.9
	污泥物冲刷	Coefficient		冲刷系数	0.01
		Exponent		冲刷指数	0.54
屋面	污染物累积	Max Buildup	kg hm ⁻²	最大累积量	16.44
		Rate Constant	d ⁻¹	累积速率常数	0.31
	污泥物冲刷	Coefficient		冲刷系数	0.09
		Exponent		冲刷指数	1.76
其他	污染物衰减	Decay Coeff	d ⁻¹	降解速率常数	0.15
	降雨浓度	Rain Concen	mg L ⁻¹	降雨中污染物浓度	10

3 结果 (Results)

在对参数进行初步率定的基础上, 采用修正的摩尔斯分类筛选法对表 2 中所列参数的局部灵敏度进行分析, 以 3% 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%, 而其它参数值固定不变. 为比较不同降雨强度下, 水质参数对 SWMM 模型的不同输出结果 (出水口污染物浓度、浓度峰值和区域污染物负荷总量) 的灵敏度, 将 2005-08-

24 观测的降雨在原基础上 (降雨强度为 5.8mm) 分别放大 4 倍和 10 倍. 该方法是在缺乏足够的同步降雨监测数据情况下采用的分析方法, 该方法在其他文献中也有采用 (王浩昌等, 2008). 复杂模型参数的灵敏度差异主要是模型计算机理的原因, 同步放大的降雨比实测的降雨更能有效的比较不同强度的降雨情景下模型对参数扰动的反映. 根据上述扰动规则进行模拟和分析, 最终计算出的 SWMM 水质参数局部灵敏度结果如表 2 所示.

表 2 3 种不同降雨情景下参数局部灵敏度分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of the parameters of three rainfalls										
土地利用类型	参数名称	污染物浓度对参数灵敏度			浓度峰值对参数灵敏度			污染负荷对参数灵敏度		
		5.8mm	23.2mm	58mm	5.8mm	23.2mm	58mm	5.8mm	23.2mm	58mm
路面	Availability	-0.010	-0.016	-0.015	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.003	-0.005
	Max Buildup	0.048	0.079	0.069	0.010	0.004	0.008	0.013	0.020	0.024
	Rate Constant	0.007	0.012	0.011	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.004
	Coefficient	0.047	0.075	0.062	0.010	0.004	0.007	0.013	0.019	0.022
	Exponent	-0.025	0.033	0.045	0.005	0.005	0.005	0.008	0.025	0.042
	Cleaning Effic	-0.010	-0.016	-0.015	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.003	-0.005

续表 2

土地利用类型	参数名称	污染物浓度对参数灵敏度			浓度峰值对参数灵敏度			污染负荷对参数灵敏度		
		5.8mm	23.2mm	58mm	5.8mm	23.2mm	58mm	5.8mm	23.2mm	58mm
绿地	Max Buildup	0.108	0.167	0.106	0	0	0	0.015	0.018	0.023
	Rate Constant	0.021	0.033	0.021	0	0	0	0.004	0.004	0.005
	Coefficient	0.107	0.164	0.101	0	0	0	0.015	0.018	0.022
	Exponent	-0.007	0.061	0.106	0	0	0	0.001	0.012	0.028
屋面	Max Buildup	0.705	0.186	0.108	0.955	0.968	0.972	0.910	0.734	0.471
	Rate Constant	0.430	0.120	0.069	0.580	0.588	0.591	0.554	0.450	0.287
	Coefficient	0.235	0.010	0.022	0.489	0.038	0.726	0.422	-0.140	-0.037
	Exponent	0.003	-0.417	0.100	2.348	1.622	3.459	1.259	-0.853	-0.244
其他	Decay Coeff	-0.002	-0.001	-0.001	0	0	0	0	0	0
	Rain Concen	0.147	0.576	0.726	0.036	0.028	0.021	0.069	0.230	0.485

参照 Lenhart (2002)对参数局部灵敏度的分级(表 3),路面和绿地的参数除绿地最大累积量(Max Buildup)对出水口污染物浓度为中等灵敏参数外,其余均为不灵敏参数,而屋面 4个参数则在大部分情况下都为灵敏参数;这主要是由于实验小流域中屋面在不透水地表中所占比例最高造成的(表 1)。

表 3 参数灵敏度分级 (Lenhart et al., 2002)

Table 3 Sensitivity Classes		
等级	灵敏度范围	灵敏度
I	$0 \leq S_i < 0.05$	不灵敏
II	$0.05 \leq S_i < 0.2$	中等灵敏
III	$0.2 \leq S_i < 1$	灵敏
IV	$S_i \geq 1$	高灵敏

注: S_i 为模型输出的第 i 个状态变量的摩尔斯系数 (黄金良等, 2007)。

SWMM 水质模拟的输出结果包括:出水口污染物浓度、水质浓度峰值、场次降雨污染物负荷总量。污染物的浓度变化有助于分析降雨径流污染的初始冲刷效应和浓度变化规律;浓度峰值有助于分析最不利的水质浓度状态和确定雨水截留倍数;区域污染物负荷总量有助于分析研究区的非点源污染物产生总量。在参数灵敏度分析过程中,研究者发现,参数的扰动对模型不同的输出结果将产生不同的影响。如, Zaghboul (1983)对 SWMM 模型水文参数灵敏度分析研究表明,在其扰动范围内,峰值流量变幅为 8%,而径流量变幅为 25% (Zaghboul 1983)。Schilling (1994)和 Drechsler (1998)的研究结果也证明了复杂的降雨径流模型参数的灵敏度取决于状态变量的类型。在本研究中,将对不同的输出结果对于城市降雨径流模拟水质参数的灵敏度分别进行分析。由于修正的摩尔斯分类筛选法获得的参数

灵敏度结果为参数不同扰动对模型输出影响的平均值,所以本研究同时分析了不同扰动下各水质参数灵敏度的标准偏差。

图 3 为 3 场不同强度 (降雨量分别为 5.8mm, 23.2mm 和 58.0mm)降雨情景下,实验区出水口 COD 对 SWMM 模型水质参数的局部灵敏度分析结果,灵敏度指数通过上节式 (3)计算得到,其中图 3a 为扰动在 -20%、-15%、-10%、-5%、+5%、+10%、+15% 和 +20% 变化时利用修正摩尔斯分类筛选法计算的灵敏度指数,图 3b 为所有扰动下计算出的灵敏度的标准偏差。从图 3a 中可以看出,绿地和路面参数的灵敏度都很小,且在不同降雨情景下波动不大。在小强度降雨时,屋面累积和冲刷参数灵敏度都较高,其中屋面最大累积量 (Max Build) 灵敏度最高 ($S=0.705$),而在中等强度和大强度降雨时,雨水中 COD (Rain Concen) 灵敏度最高 (S 分别为 0.576 和 0.726),屋面的累积和冲刷参数的灵敏度则降低。值得注意的是,对于中等强度的降雨,屋面冲刷指数 (Exponent) 的影响甚至为负影响 ($S=-0.417$),说明了 SWMM 模型中冲刷过程的复杂性。图 3b 也证明了这一点,图中除屋面冲刷指数 (Exponent) 外,其余参数的灵敏度标准偏差都很小。对于不同降雨强度下参数对出口 COD 影响的差异可通过图 6 解释。在小强度降雨时,暴雨的初始冲刷效应不明显,在降雨的后期水中 COD 仍然很高,而对于较大强度暴雨,在降雨后期污染物浓度则很低,几乎与雨水水质相同。这与其他研究者的结论是一致的,郭琳等 (2003)通过研究发现,当一次性降水 20~25mm (降水历时 1h) 则可将街道地表物基本冲刷干净。

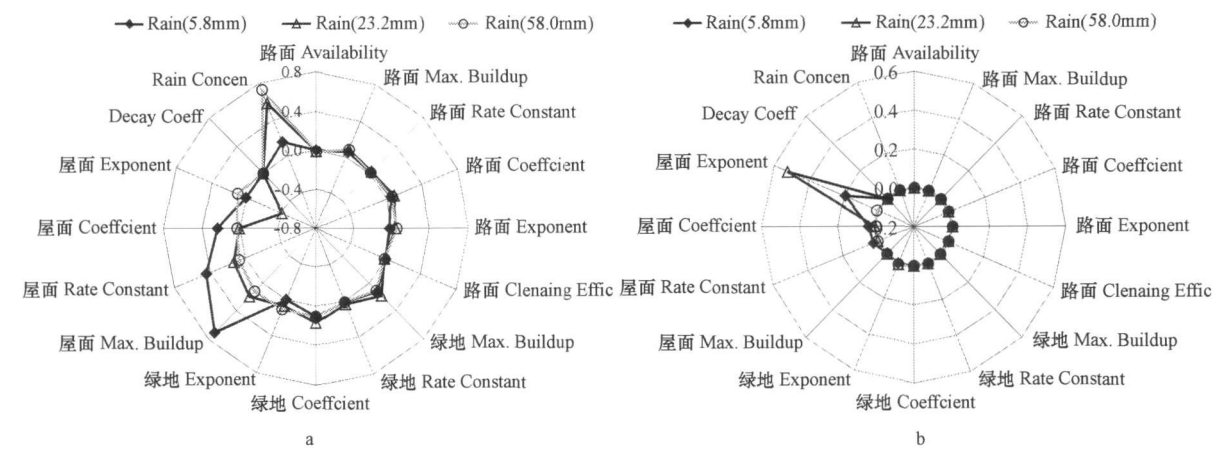


图 3 3场降雨过程中出水口 COD 对参数的灵敏度分析结果 (a 敏感度指数; b 标准偏差)
Fig 3 Sensitivity analysis results of the parameters with respect to the water quality of three rain falls

图 4为 3场不同强度降雨情景下, 实验区出水口 COD 峰值对 SWMM 模型水质参数的局部灵敏度分析结果. 水质参数对浓度峰值的影响, 与对浓度变化曲线的影响相似, 也是屋面的冲刷累积参数灵敏度较高, 而其余则较低; 标准偏差也是屋面冲刷



图 4 3场降雨过程中出水口 COD 峰值对参数的灵敏度分析结果 (a 敏感度指数; b 标准偏差)
Fig 4 Sensitivity analysis results of the parameters with respect to the peak value of three rain falls

图 5为 3场不同强度降雨情景下, 实验区 COD 污染负荷总量对模型水质参数的局部灵敏度分析结果. 通过图 5分析可以看出, 对于区域污染负荷总量, 屋面累积冲刷参数仍是灵敏度较高的参数, 绿地和路面的参数灵敏度在 3种降雨情景下仍然几乎为 0 与对 COD 变化的影响相同的是, 屋面冲刷指数 (Exponent)在中等强度降雨 (降雨量 23.2mm)时会产生负灵敏度 (-0.14), 而小强度降雨 (5.8mm)

时, 该参数的灵敏度为 0.422 说明了屋面冲刷指数对模型输出结果影响的复杂性. 通过图 5b中的标准偏差分布可发现, 对于污染负荷总量, 参数灵敏度标准偏差分布与其他模型输出相比有很大不同, 小强度降雨 (5.8mm)时偏差会相对较大, 而只有中等强度降雨 (23.2mm)时, 屋面冲刷指数 (Exponent)的灵敏度偏差较大.

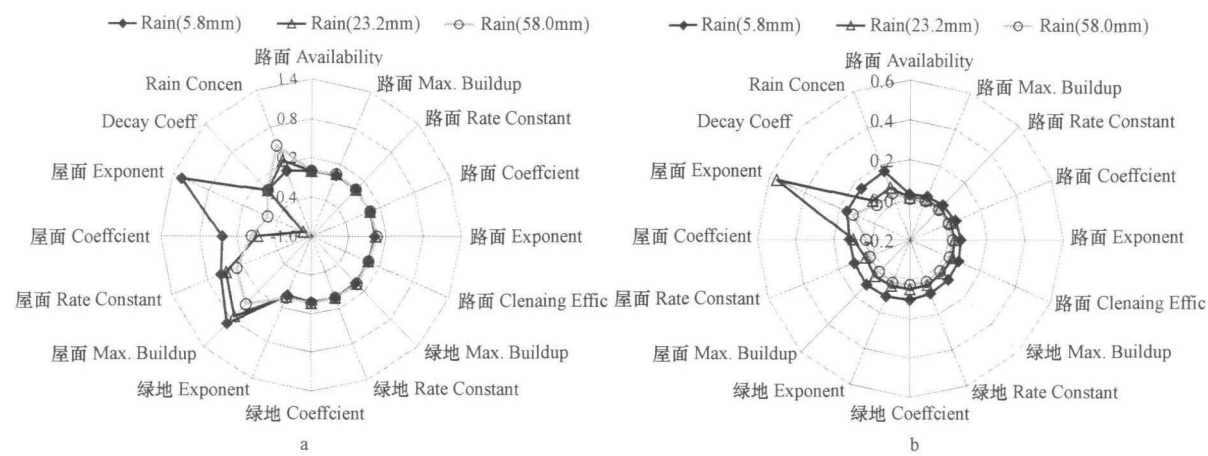


图 5 3场降雨过程中区域污染物负荷总量对参数的灵敏度分析结果 (a 敏感指数; b 标准偏差)

Fig 5 Sensitivity analysis results of the parameters with respect to the total load of three rainfalls

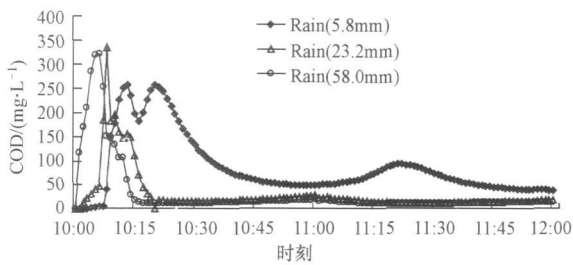


图 6 3种模拟情景下的出水口 COD模拟结果

Fig 6 Simulation results of COD concentration at the outlet under the 3 different simulation conditions

由于城市降雨径流污染模拟中水质参数在不同降雨强度下和对不同的状态变量灵敏度存在差异, 因此在不同降雨强度不同状态变量计算需求下, 可筛选相应灵敏度较高的参数加强识别和率定工作, 以提高非点源污染建模和参数率定的效率.

4 结论 (Conclusions)

- 1)占区域比例较大的不透水地表的 4个累积冲刷参数灵敏度较高, 在参数率定时应仔细识别.
- 2)降雨强度对城市非点源污染模拟的参数灵敏度有很大影响. 占区域比例较大的不透水地表的累积冲刷参数在小强度降雨时灵敏度较高, 在大强度降雨时雨水中污染物浓度 (Rain Concn) 的灵敏度最高. 因此, 对强降雨过程的雨水中污染物浓度进行更为准确和精细的测量, 可以提高对城市降雨径流污染模拟的准确度.
- 3)不同土地利用类型的相同参数灵敏度不同. 占区域比例较大的土地利用类型的累积冲刷参数灵敏度较高.

- 4)不同模型输出变量在相同降雨强度下对相同参数的灵敏度存在差异.
- 5)灵敏度标准偏差分析表明, 不同扰动下屋面冲刷指数 (Exponent) 的灵敏度变化较大, 说明冲刷指数 (Exponent)对模型输出影响的复杂性.

责任作者简介: 赵冬泉 (1978—), 男, 博士生, 主要从事GIS在环境规划管理中应用、城市排水管网模拟分析、非点源污染模拟等方面的研究.

参考文献 (References):

Burian S J, Streit G E, McPherson T N, *et al*. 2001. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of nitrogen compounds [J]. *Environ Mod Soft* 16: 467—479

Valeo C, Ho C L I. 2004. Modelling urban snowmelt runoff [J]. *J Hyd*, 299: 237—251

Chen A S, Hsu M H, Chen T S, *et al*. 2005. An integrated inundation model for highly developed urban areas [J]. *Wat Sci Tech*, 51(2): 221—229

Crosetto M, Tarantola S. 2001. Uncertainty and sensitivity analysis tools for GIS-based model implementation [J]. *International Journal of Geographic Information Science* 15(4): 415—437

Davis J R, Farley J F N, Young W J *et al*. 1998. The experiences of using a decision support system for nutrient management in Australia [J]. *Water Sci Technol* 37(3): 209—216

DigitalWater. 2008. 数字排水平台功能与专业应用模式简介 [OL]. <http://www.digitalwater.cn> 2008

DigitalWater. 2008. Introduction of function and professional application of DigitalWater [OL]. <http://www.digitalwater.cn> 2008

董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 2008. SWMM模型在城市不透水区地表径流参数的识别与验证 [J]. *环境科学*, 29(6): 1495—1501

Dong X, Du P F, Li Z Y, *et al*. 2008. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface

- runoff[J]. *Environmental Science* 29 (6): 1495—1501 (in Chinese)
- Drechsler M. 1998 Sensitivity analysis of complex models [J]. *Biological Conservation* 86(3): 401—412
- Francois A. 2003 Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale [J]. *Reliability Engineering and System Safety* 79(2): 205—218
- 宫莹, 阮晓红, 胡晓东. 2003 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 19(3): 21—23
- Gong Y, Ruan X H, Hu X D. 2003 Research progress of urban water environmental non point source pollution in China [J]. *China Water & Wastewater* 19(3): 21—23(in Chinese)
- 郭琳, 曾光明, 程运林. 2003 城市街道地表物特性分析 [J]. *中国环境监测*, 19(6): 40—42
- Guo L, Zeng G M, Cheng Y L. 2003. Identity analysis of the surface sediment on the urban streets [J]. *Environmental Monitoring in China* 19(6): 40—42(in Chinese)
- 郝芳华, 任希岩, 张雪松, 等. 2004 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*, 24(3): 270—274
- Hao F H, Ren X Y, Zhang X S *et al* 2004 Uncertain affecting factor of the non point source pollution load [J]. *China Environmental Science*, 24(3): 270—274(in Chinese)
- 黄金良, 杜鹏飞, 何万谦, 等. 2007 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*, 27(4): 549—553
- Huang J L, Du P F, Ho M H, *et al* 2007. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modeling [J]. *China Environmental Science* 27 (4): 549—553 (in Chinese)
- Huber W C, Dickinson R E. 1992. Storm Water Management Model User's Manual Version 4 [M]. Georgia USA: Environmental Protection Agency, 101—113
- 蒋颖, 王学军, 罗定贵. 2006 流域管理模型的参数灵敏度分析——以 WARMF 在巢湖地区的应用为例 [J]. *水土保持研究*, 13(3): 165—168
- Jiang Y, Wang X J, Luo D G. 2006 Parameters sensitivity analysis of Watershed Management Model—application of WARMF Model in Chaohu Lake area [J]. *Research of Soil and Water Conservation* 13 (3): 165—168 (in Chinese)
- Lei J, Schilling W. 1994. Parameter uncertainty propagation analysis for urban rainfall runoff modeling [J]. *Water Science and Technology* 29(1-2): 145—154
- Lenhart L, Eckhardt K, Fohrer N *et al* 2002 Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 645—654
- 李怀恩, 沈晋. 1996 非点源污染数学模型 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 3—6
- Li H E, Shen J. 1996 Non point source pollution models [M]. Xi'an: Northwestem Polytechnical University Press, 3—6 (in Chinese)
- Morris M D. 1991 Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. *Technometrics* 33(2): 161—174
- Rossman L A. 2004 Stormwater Management Model User's Manual Version 5. 0 [M]. Cincinnati OH 45268 50—51
- 沈丹. 2007 城市雨水排水系统健康状况研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2—3
- Shen D. 2007. Study on healthy conditions of urban storm sewer system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2—3 (in Chinese)
- Srinivasan R, Engel B. 1994 A spatial decision support system for Assessing Agriculture (AGNPS) pollution model [J]. *Water Resources Bulletin* 30 441—451
- Tsirlintzis V, Hamid R. 1998 Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. *Hydrol Process* 12 (2): 311—329
- 王浩昌, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 2008 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析 [J]. *中国环境科学*, 28(8): 725—729
- Wang H C, Du P F, Zhao D Q *et al* 2008. Global sensitivity analysis for urban rainfall runoff model [J]. *China Environmental Science* 28 (8): 725—729(in Chinese)
- 王建平, 程声通. 2006 软计算技术在环境复杂模型参数识别中的应用研究 [J]. *系统工程理论与实践*, (2): 118—126
- Wang J P, Cheng S T. 2006 Parameter identification of complicated environmental model using the soft computing approach [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice* (2): 118—126(in Chinese)
- 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 2004 生态模型的灵敏度分析 [J]. *应用生态学报*, 15(6): 1056—1062
- Xu C G, Hu Y M, Chang Y, *et al* 2004 Sensitivity analysis in ecological modeling [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 15 (6): 1056—1062(in Chinese)
- Zaghboul N Z. 1983. Sensitivity analysis of the SWMM runoff transport parameters and the effects of catchment discretisation [J]. *Advances in Water Resources* 6 214—223
- Zaghboul N A, Abu Khef A. 2001 Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations [J]. *Advances in Engineering Software* 32(7): 587—595
- 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 2008 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型 [J]. *中国给水排水*, 24(7): 88—91
- Zhao D Q, Chen J N, Tong Q Y, *et al* 2008. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS [J]. *China Water & Wastewater* 24(7): 88—91 (in Chinese)