

DOI: 10.5846/stxb201310141523

赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 王俊松, 朱永官. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟. 生态学报, 2015, 35(6): 1961-1972.

Zhao L, Yang F L, Yuan G L, Wang J S, Zhu Y G. Simulation of the quantity and quality of the urban runoff. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1961-1972.

昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟

赵磊^{1,2,3,4}, 杨逢乐^{1,2}, 袁国林^{1,2,*}, 王俊松^{1,2}, 朱永官³

1 云南省环境科学研究院, 昆明 650034

2 云南高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室(筹), 昆明 650034

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 选取昆明市明通河流域为研究区域, 在暴雨管理模型(SWMM 模型)参数敏感性分析、模型率定的基础上, 对明通河流域进行了降雨径流量水质模拟。结果表明: SWMM 模型水文水力模块中最灵敏参数为不透水率, 水质模块中污染物最大累积量、污染物累积速率均为灵敏参数, 而冲刷系数和冲刷指数的灵敏度受降雨强度影响波动较大。水量水质模拟结果与实测结果较为吻合, 模型率定取得了满意的结果。模拟结果显示, 研究区降雨径流总氮、总磷、化学需氧量单位面积负荷率分别为 75.6、8.5、697.8 kg hm⁻² a⁻¹, 城市降雨径流污染在滇池流域面源污染中占有较大份额。

关键词: 城市降雨径流; 暴雨管理模型(SWMM 模型); 水量水质模拟

Simulation of the quantity and quality of the urban runoff

ZHAO Lei^{1,2,3,4}, YANG Fengle^{1,2}, YUAN Guolin^{1,2,*}, WANG Junsong^{1,2}, ZHU Yongguan²

1 Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China

2 Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed(Prepare to Construct), Kunming 650034, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Simulation of the quantity and quality of urban runoff is an important process in the management and control of urban runoff pollution. Based on sensitivity analysis and calibration of the Storm Water Management Model (SWMM) parameters, we simulated the quantity and quality of urban runoff to the Mintong catchment from Kunming city. The results showed that the most sensitive parameter in the quantity model is the percentage of imperviousness. In the quality model, the maximum buildup possible and the buildup rate constant are the most sensitive parameters. The sensitivities of the washoff coefficient and washoff exponent are influenced by the rainfall intensity. The quantity and quality of the simulated and measured runoffs showed good correlation. The calibration is was satisfactory. The simulation results showed that the annual pollutant loads of urban runoff for TN(total nitrogen), TP(total phosphorus), and COD(chemical oxygen demand) were 75.6, 8.5 and 697.8 kg hm⁻² a⁻¹, respectively. The load of urban runoff pollution is an important factor in the diffuse pollution in the Dianchi basin.

Key Words: urban runoff; SWMM; stormwater quantity and quality

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102001-002); 云南应用基础研究(2008ZC103M)

收稿日期: 2013-10-14; 网络出版日期: 2014-07-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ygl@yies.org.cn

随着我国点源污染控制的不断完善,城市面源污染所占比例正在日益提高^[1]。城市中面源污染负荷占水污染总负荷的比重比过去预想的大的多,同时由于暴雨径流的初期效应时间极短,面源污染对城市水体的冲击性非常高^[2]。然而,由于城市面源污染的突发性、随机性、复杂性和监测的耗时费力,模型模拟成为研究城市面源污染管理和控制的重要手段。

目前常用的城市降雨径流量水质模拟模型主要有 STORM、SWMM、HSPF 等。SWMM 模型是美国环保署开发的城市暴雨管理模型,可模拟包括地表径流和排水网络中水流和污染物、管路中的蓄水池、暴雨径流的处理设施等完整的城市降雨径流循环,可用于计算全年城市面源污染负荷、指导合流制排水系统雨污调节、雨洪分流,模拟时段是可变的,具有较强的适用性,在全世界 100 多个城市得到了应用^[3]。近年来在国内也陆续开展了 SWMM 模型的应用研究^[4-5]。但国内相关研究大多集中于小区域,且缺乏对 SWMM 模型参数的详尽分析,参数敏感度分析、率定等方面还鲜见报道。本研究尝试在较大区域应用 SWMM 模型,采用 GIS、遥感等手段获取模型重要参数,立足于参数取值方法存在的观测误差等不确定性,选用 Morris 筛选法进行 SWMM 模型状态变量的局部灵敏度分析,从模型构建、参数分析、结果率定和应用 4 个方面对 SWMM 模型进行详细研究,为在我国应用 SWMM 模型提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为昆明市的城市纳污河明通河。流域内排水系统为合流制排水系统,污水及雨水通过排水系统进入河道输送。河道全长 8.3 km,流域面积 10.4 km²。研究区管道及河道总长度总计 100.45 km。流域内土地利用类型以居民区面积最大,其次为城郊结合部,道路及商业用地接近(图 1)。

1.2 模型参数分析

SWMM 模型主要包括水文模块和水质模块。水文模块参数根据其确定方法可分为两类。一类是根据其物理意义直接标定的,这些参数包括:(1)气候地理相关的参数,如地表高程、地面坡度、降雨过程、地表蒸发量等;(2)区域排水系统特征参数,如排水小区面积、管道特征值(管道类型、长度、管底和管顶高程等)、排水小区平均高程等。SWMM 模型的另一类参数,与流域产汇流密切相关。由于产汇流的复杂性,这些参数难以直接给定,需要利用流域实测水文资料来率定。此类参数主要包括:(1)曼宁糙率 n ,包括透水地表与不透水地表曼宁糙率、管道曼宁糙率,反映了固壁界面对水流的阻力特征;(2)滞蓄量 d ,包括透水地表、不透水地表滞蓄量,反映了降雨后地表对雨水的截留量;(3)排水小区水力宽度 w ;(4)区域透水地表下渗参数,如土壤初始含水量,土壤饱和水力传导度,湿润锋土壤吸力水头等。

SWMM 模型水质模块包括污染物累积模型和冲刷模型,累积模型集成了幂函数累积模型、指数函数累积模型和饱和函数累积模型,冲刷模型集成了指数模型、流量特性冲刷曲线模型和次降雨平均浓度模型。本研究选用饱和函数累积模型和指数冲刷模型。污染物累积冲刷参数与流域地表特征等因素密切相关,由于区域差别较大,尽管这些参数有一些研究成果,但难以直接采用,需要利用实测水质资料来率定,参数主要包括:(1)污染物最大累积量 C_1 ;(2)污染物累积率 C_2 ;(3)污染物半饱和常数 C_3 ;(4)冲刷系数 R ;(5)冲刷指数 n ;(6)径流率 Q 。

参数如表 1 所示。

1.3 模型数据库建立

模型数据库建立是为 SWMM 模型提供基本数据。

1.3.1 管网数据库

管网数据来源于昆明滇池投资有限公司于 2004 年对昆明市管网的普查数据。从已有的 CAD 图层中提取研究区的管网数据信息,主要包括代表管道图形要素的空间位置,以及管道的长度、类型、管底标高、流向、管径等属性信息,将其重新数字化、矢量化,利用 GIS 的拓扑关系和空间分析得到与管道对应的管网节点和排

水小区信息。

1.3.2 地表特征数据库

下垫面特征包括下垫面不透水率和下垫面类型 2 个内容,其中下垫面类型包括道路、庭院和屋顶 3 类。下垫面不透水率采用 2.4m 分辨率快鸟多光谱图象(2006 年 12 月成像)提取,所用方法为监督分类结合 PCA 分析、植被指数分析、波段组合,具体方法另有文章叙述。由于研究区面积较大,在较短时间内难以对整个研究区下垫面类型进行划分,因此选择研究区内的东风东路集水区进行典型研究,利用 0.61 m 分辨率的快鸟图像(2006 年 12 月成像)对研究区的下垫面类型进行了数字化,采用实地调查和室内数字化的方法将实验区下垫面划分为道路、庭院和屋顶,最后将得到的结果外推用于整个研究区。

1.3.3 降雨数据库

降雨数据采用昆明市大观楼站的实测数据,数据的年限为 1995—2007 年,共计 13a 降雨过程数据(小时数据),按照 SWMM 模型要求的输入格式进行整理,作为模型连续模拟降雨输入资料。

1.4 模型参数敏感度分析方法

模型参数敏感度分析包括局部敏感度分析和全局敏感度分析。局部敏感度分析检验单个参数的变化对模型结果的影响程度;全局敏感度分析则检验多个参数的变化对模型运行结果总的影响,并分析每一个参数及其参数之间相互作用的影响^[6-7]。全局敏感度分析考虑了多参数的综合作用,有利于得到整个参数集的最优解,但是其计算量巨大,很难适用于参数较多的复杂模型,而局部敏感度分析方法简单、计算量较小、易于实施,应用较广。鉴于此,本研究采用修正 Morris 筛选法作为 SWMM 模型参数局部灵敏度分析方法^[8-9]。Morris 筛选法选取模型中一变量 x_j ,其余参数值固定不变,在变量阈值范围内随机改变 x_j ,运行模型得到目标函数 $y(x) = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的值,用参数 e_i 判断参数变化对输出值的影响程度:

$$e_i = (y^* - y) / \Delta_i \quad (1)$$

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。

修正 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:

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i) / Y_0}{(P_{i+1} - P_i) / 100} / (n - 1) \quad (2)$$

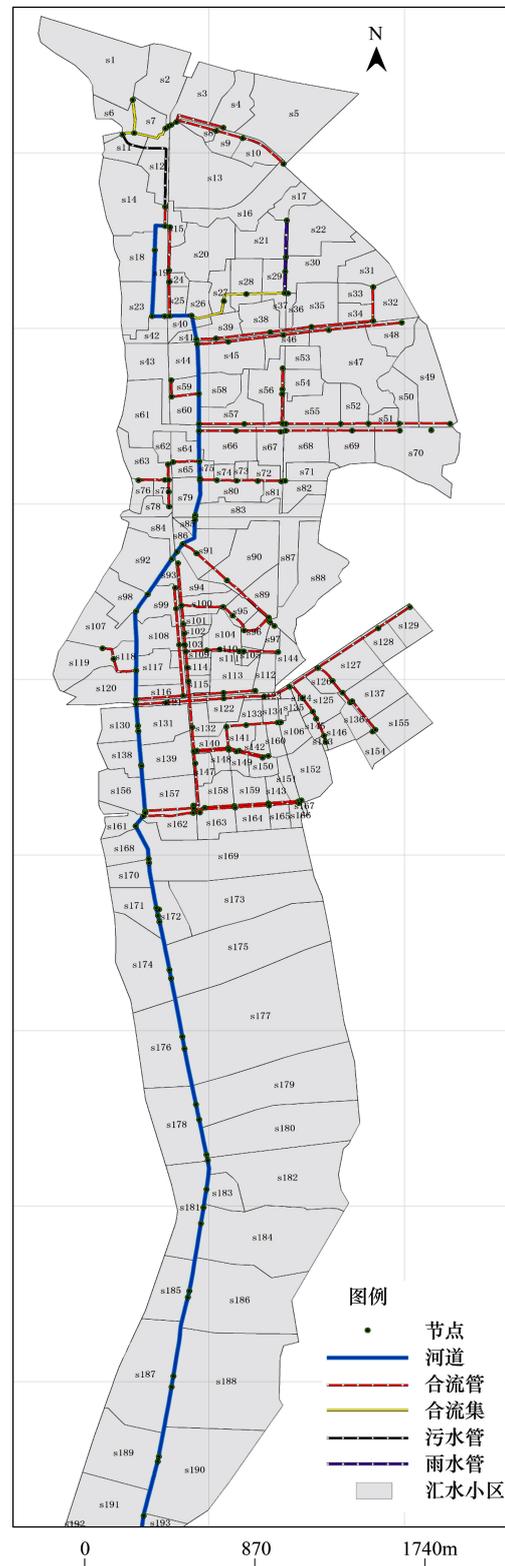


图1 研究区排水系统概化图
Fig.1 Map of the drainage system

表 1 SWMM 模型主要参数分类及其取值范围、取值方法

参数分类 Parameters type	参数编号 Parameters No.	参数名称 Name of parameters	物理意义 Physical meaning	参数取值范围 Value range of parameters	参数获取方法 Method to get parameters value
可直接标定参数 Parameters that can be get directly	参数 1	%imperv	排水小区不透水率/%	30—90	GIS 结合遥感解译
	参数 2	%slope	排水小区坡度/%	0.5—1.5	GIS
	参数 3	Con-length	管道长度/m	30—500	GIS
	参数 4	Area	排水小区面积/hm ²	0.5—25	GIS
水文水力参数;需通 过率定确定的参数 Hydrology and hydraulic parameters that can be get by calibration	参数 5	Width	排水坡面漫流宽度/m	52—250	GIS
	参数 6	N-imperv	排水小区不透水地表曼宁糙率	0.011—0.015	调查,模型手册
	参数 7	N-perv	排水小区透水地表曼宁糙率	0.014—0.8	调查,模型手册
	参数 8	Des-imperv	排水小区不透水地表注蓄深度/mm	1.27—2.56	调查,模型手册
	参数 9	Des-perv	排水小区透水地表注蓄深度/mm	2.56—7.62	调查,模型手册
	参数 10	%zero-imperv	排水小区无注蓄不透水地表所占 百分比/%	40—85	调查,模型手册
	参数 11	Ks	土壤水力传导率/(mm/h)	0.25—120	调查,模型手册
	参数 12	Su	湿润前锋的毛细水头/mm	49—320	调查,模型手册
	参数 13	IMD	初始土壤湿度亏损值	0.37—0.55	调查,模型手册
	参数 14	Con-Mann	管道曼宁糙率	0.011—0.015	模型手册
水质参数;需通过 率定确定的参数 Quality parameters that can be get by calibration	参数 15	C ₁	污染物最大累积量/(kg/hm ²)	目前这些参数尚无较好的研究结果,可参考的研究较少,难以给出取值范围	
	参数 16	C ₂	污染物累积速率/d ⁻¹		
	参数 17	R	冲刷系数		
	参数 18	n	冲刷指数		

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 $i+1$ 次运行输出值, Y_0 为参数初始值模型计算结果初始值, P_i 为第 i 次模型运算参数值相对于参数初始值变化的百分率, P_{i+1} 为第 $i+1$ 次模型运算参数值相对于初始参数值的变化百分率, n 为模型运行次数。

1.5 模型参数率定的误差分析与效率检验准则

参数率定采用人工试错法,反复调整参数取值直至模拟结果与实测结果相吻合。

Nash 与 Sutcliffe 在 1970 年提出了模型效率系数(确定性系数)来评价模型模拟的精度,它直观地体现了实测与模拟的拟和程度的好坏^[10]。本研究采用采用 3 个目标函数作为评价实测与模拟的拟和程度好坏的指标,(1)反映产流产污总量精度的总量相对误差 Er ;(2)反映出口断面流量及污染物浓度过程吻合程度的模型效率系数(确定性系数) C_e 。(3)同时辅以相关系数 r 3 个指标来评价和说明模型的适用性:

$$Er = (Q_c - Q_o) / Q_o \quad (3)$$

$$C_e = \frac{\sum (Q_{i,o} - Q_o)^2 - \sum (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2}{\sum (Q_{i,o} - Q_o)^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)(Q_{i,c} - \bar{Q}_c)}{\sqrt{\sum (Q_{i,o} - \bar{Q}_o) \sum (Q_{i,c} - \bar{Q}_c)}} \quad (5)$$

式中, Q_o 和 Q_c 分别为实测和模拟的次降雨径流量(m^3)和污染物总量(kg), \bar{Q}_o 和 \bar{Q}_c 分别为实测和模拟的次降雨平均流量(m^3/s)和污染物平均浓度(mg/L), $Q_{i,o}$ 和 $Q_{i,c}$ 分别为实测和模拟的流量系列(m^3/s)和污染物浓度系列(mg/L)。

2 结果

2.1 参数敏感度分析结果

采用表 2 所列 3 场降雨进行模型参数敏感性分析。3 场降雨降雨量分别为 11.0、41.0、28.6 mm,以 24 h 降雨标准划分,属于小雨和中雨。5 月 26 日降雨量较小,但其前期降雨强度较大,20 min 降雨量达 5.8 mm,可代表高强度、短历时降雨,第 2、3 场降雨持续时间较长,降雨量较大,且后期降雨过程有较大雨强的雨峰出现。

表 2 3 场降雨特征

Table 2 The characteristic of the three rainfall

降雨日期 Date of the rain	降雨历时/h Duration of the rain	降雨量/mm Raifall	雨峰强度/(mm/10min) Rainfall density	雨峰时间/h Rain peak time	平均雨强/(mm/10min) Average rainfall density
2006-05-26	1.3	11.0	2.8	0.33	1.1
2006-07-09	7.8	41.0	5.6	1.0	0.84
2006-09-18	14.0	28.6	3.3	1.0	0.43

采用上述方法,确定参数 1—4 的取值,设定参数 5—18 的初值,利用表 1 所列的 3 场降雨数据对 SWMM 模型参数进行局部灵敏度分析,3 场降雨模型参数中除了降雨数据不同,其余参数一致。以 10%为固定步长对某一参数值进行扰动,分别取其初值的-30%、-20%、-10%、10%、20%和 30%,其他参数值固定不变。流量结果观测不同降雨强度下径流总量和峰值流量的水文水力模块相关参数的灵敏度,水质结果观测污染物负荷总量和浓度峰值的水质模块相关参数的灵敏度。结果见表 3。

表 3 SWMM 模型参数局部灵敏度分析结果

Table 3 Results of sensitivity analysis on parameters of SWMM model

参数类型 Parameters type	参数编号 Parameters No.	参数 Parameters	3 场降雨总径流量灵敏度 S_1			3 场降雨峰值流量灵敏度 S_2		
			Runoff volume sensitivity of the three rain			Peak flow sensitivity of the three rain		
			2006-05-26	2006-07-9	2006-09-18	2006-05-26	2006-07-9	2006-09-18
水文水力参数 Hydrology and hydraulic parameters	参数 1	%imperv	0.8150	0.8378	0.8825	0.7916	0.9973	0.8608
	参数 2	%slope	0.1077	0.0098	0.0248	0.2031	0.0350	0.0759
	参数 3	Con-length	-0.3152	-0.1289	-0.1583	-1.1738	-0.4088	-0.3379
	参数 4	Area	0.8150	0.8320	0.8766	0.7916	0.9992	0.8636
	参数 5	Width	0.2191	0.9174	0.0494	0.4253	0.1408	0.1572
	参数 6	N-imperv	-0.2042	-0.0258	-0.0533	-0.4264	-0.1592	-0.1491
	参数 7	N-perv	0	-0.0055	0	0	-0.0043	0
	参数 8	Des-imperv	-0.2079	-0.0306	-0.0790	-0.2503	-0.0078	-0.0092
	参数 9	Des-perv	0.0000	-0.0077	0	0	-0.0145	0
	参数 10	%zero-imperv	0.1200	0.0186	0.0539	0.1491	0.0213	0.0052
	参数 11	K_s	0	-0.0259	0	0	-0.0477	0
	参数 12	S_u	0	-0.0165	0	0	-0.0322	0
	参数 13	IMD	0	-0.0190	0	0	-0.0342	0
	参数 14	Con-Mann	-0.1961	-0.2306	-0.2232	-0.6364	-0.3373	-0.3888
参数类型 Parameters type	参数编号 Parameters No.	参数 Parameters	3 场降雨总径流量灵敏度 S_3			3 场降雨峰值流量灵敏度 S_4		
			Runoff volume sensitivity of the three rain			Peak flow sensitivity of the three rain		
			2006-05-26	2006-07-9	2006-09-18	2006-05-26	2006-07-9	2006-09-18
水质参数 Water quality parameters	参数 15	C_1	0.6683	0.8078	0.4790	0.9015	0.9888	0.8705
	参数 16	C_2	0.6558	0.6955	0.4614	0.8847	0.8511	0.8402
	参数 17	R	0.0588	0.2580	0.0929	0.0035	0.4092	0.2647
	参数 18	n	-0.2217	-0.7964	-0.4734	-0.1411	-0.6050	0.0267

参照文献^[11]对敏感度的分级: $|S_i| \geq 1$ 为高灵敏度参数; $0.2 \leq |S_i| < 1$ 为灵敏参数; $0.05 \leq |S_i| < 0.2$ 为中灵敏参数; $0 \leq |S_i| < 0.05$ 为不灵敏参数(i 为模型的第 i 个状态变量)

由表 3 可以看出,SWMM 模型参数中影响径流总量的灵敏参数包括%imperv、Width、Con-Mann、N-imperv,其中 Width 对于降雨较大 2 场降雨(05-26 和 07-09)为灵敏参数,强度较小的降雨则为不灵敏参数,N-imperv、Des-imperv 和%zero-imperv 只有在降雨强度较大时(05-26)才是灵敏参数。入渗模型参数(K_s 、 S_u 和 IMD)均为不灵敏参数。

3 场降雨影响峰值流量的灵敏参数均为%imperv、Con-Mann、Width、N-imperv 在降雨强度较大时为灵敏参数,其它 2 场降雨则为中灵敏参数。与径流总量结果相同,Des-imperv 和%zero-imperv 只有在降雨强度较大时(05-26)才是灵敏参数,入渗模型参数(K_s 、 S_u 和 IMD)均为不灵敏参数。

由以上分析可知,SWMM 模型水文模块主要的灵敏参数为%imperv、Width、Con-Mann 和 N-imperv,这与其他研究者的结果相同^[12]。

由表 3 可以看出,3 场降雨污染物累积模块参数 C_1 、 C_2 的灵敏度较为稳定,在 3 场降雨中均是影响污染物负荷和污染物峰值浓度的灵敏参数,其中 C_1 对污染物峰值浓度的灵敏度接近 1,影响非常大。

3 场降雨污染物冲刷模块参数 R 、 n 的灵敏度波动较大,07-09 降雨参数 R 是影响污染物负荷和污染物峰值浓度的灵敏参数,而 05-26 和 09-18 降雨 R 则是中灵敏参数;参数 n 是影响污染物负荷的灵敏参数,其对污染物峰值浓度的灵敏度则随降雨特性有所不同,07-09 降雨为灵敏参数,05-26 降雨为中灵敏参数,而 09-18 降雨则为不灵敏参数。

2.2 参数率定结果

2.2.1 水文水力参数率定结果

研究区为合流制排水系统,因此首先确定研究区晴天流量。晴天流量依据晴天 24 h 监测数据确定,据监测数据,晴天明通河福德立交桥断面日流量约为 83056.53 m^3 ,该断面控制区域面积约为 635 hm^2 ,则研究区单位面积污水量为 130.8 m^3/hm^2 ,乘以排水小区面积得到每个排水小区晴天污水量。

通过参数分析可知,SWMM 模型部分参数可通过资料直接标定,部分参数需要通过率定获取。本研究对可直接标定的参数利用资料直接获取,通过参数敏感度分析可知影响降雨径流的敏感性参数主要为:Width、Con-Mann、N-imperv、Des-imperv 和%zero-imperv,本研究主要对以上参数进行率定。率定后主要参数取值见表 4。

水力参数率定误差分析结果见表 5。由于研究区面积相对较大,且人工干扰较为严重,模型模拟有较大难度,从模拟结果来看,确定性系数在 0.60 以上,相关系数在 0.82 以上,径流总量误差在 3%—28%之间;图 2 给出了 2006-05-26、2006-07-08 降雨实测与模拟流量过程,可以看出,模拟与实测峰值流量基本同时出现,峰现时间误差在 20 min 以内,峰值流量误差小于 20%。流量过程模拟精度尚可接受,可满足工程需要。

2.2.2 水质参数率定结果

SWMM 模型水质模块较为灵活,根据用户需要指定污染物类型,本研究选择固体悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、COD 和 BOD 5 个水质指标进行模拟,5 个指标中 SS 是城市地表污染物的最主要携带者,TN、TP 是富营养化污染物指标,COD、BOD 为有机污染物指标。研究区晴天污染物浓度根据监测结果确定,SS、TN、TP、COD 和 BOD 的取值分别为 100、40.8、4.0、164 和 46 mg/L 。

表 4 水文水力参数率定结果

Table 4 Parameters obtained in the hydraulic calibration of the model

参数 Parameters	参数取值 Parameters value
%imperv/%	平均 77.1,范围 29.06—97.62
%slope/%	平均 0.73,范围 0.013—6.54
Con-length/m	平均 0.73,范围 0.013—6.55
Area/ hm^2	平均 5.06,范围 0.076—44.53
Width/m	平均 100.61,范围 10.57—531.85
N-imperv	0.012
N-perv	0.25
Des-imperv	1.5
Des-perv	5.2
%zero-imperv/%	50
K_s	1.5
S_u	219
IMD	0.35
Con-Mann	0.015

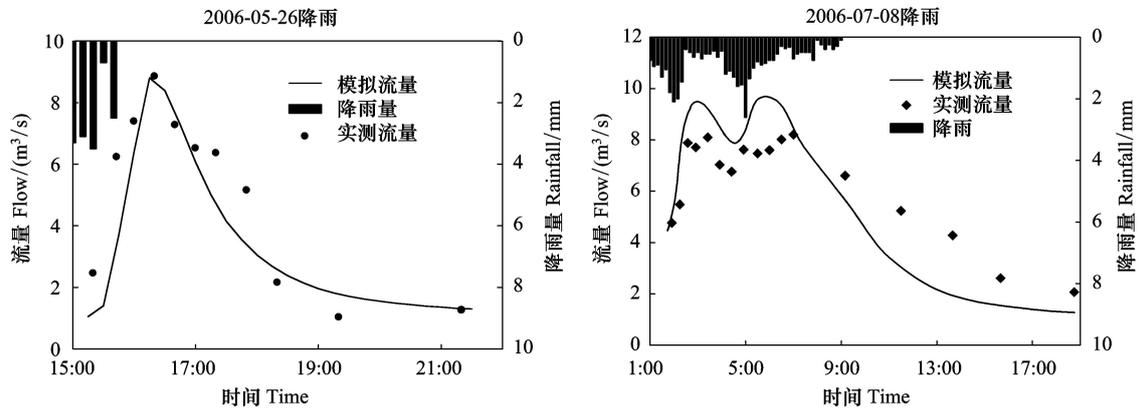


图 2 实测与模拟流量过程线

Fig.2 Measurement and simulation of the hydrograph

利用表 2 所列 3 场降雨水质数据进行了水质参数率定。表 6 列出了水质参数率定结果,水质参数率定误差结果见表 7,污染负荷总量误差在 2%—17%之间,确定性系数 C_e 在 0.6 以上,其中 TN、TP 确定性系数 C_e 在 0.8 以上,相关系数在 0.8 以上。图 3 给出了 2006-07-08 降雨实测与模拟污染物浓度过程,可以看出,模拟与实测污染物浓度过程趋势基本一致,模拟与实测 TN、TP、COD 和 BOD 浓度峰值绝对值相差小于较小 (<10 mg/L),SS 相差较大,考虑到水质的测定和采样误差^[13],本研究模拟精度较好,可满足工程需要。

表 5 水力参数率定误差分析

Table 5 Error of the hydraulic parameter calibration

降雨日期 Date of the rain	Er	C_e	r
2006-05-26	-0.03	0.87	0.92
2006-07-08	0.08	0.59	0.82
2006-09-18	0.28	0.77	0.89

Er : 产流产污总量相对误差, Relative error of the total volume;

C_e : 模型效率系数, Model efficiency index; r : 相关系数, Correlation coefficient

表 6 水质参数率定结果

Table 6 Parameters obtained in the quality calibration

污染物 Pollutants	下垫面类型 Underlying surface type	参数 Parameters			
		C_1	C_2	R	n
固体悬浮物(SS) Suspended solid	道路	400	0.5	0.004	2.2
	庭院	300	0.5	0.004	2.2
	屋顶	250	0.5	0.004	2.2
总氮(TN) Total nitrogen	道路	35	0.5	0.006	2.5
	庭院	28	0.5	0.0015	1.8
	屋顶	22	0.5	0.0015	1.8
总磷(TP) Total phosphorous	道路	3	0.5	0.004	2.2
	庭院	2.2	0.5	0.004	2.2
	屋顶	1.8	0.5	0.004	2.2
化学耗氧量(COD) Chemical oxygen demand	道路	200	0.5	0.01	1.8
	庭院	150	0.5	0.01	1.8
	屋顶	100	0.5	0.01	1.8
生物需氧量(BOD) Biological oxygen demand	道路	80	0.5	0.01	1.9
	庭院	50	0.5	0.01	1.9
	屋顶	30	0.5	0.01	1.9

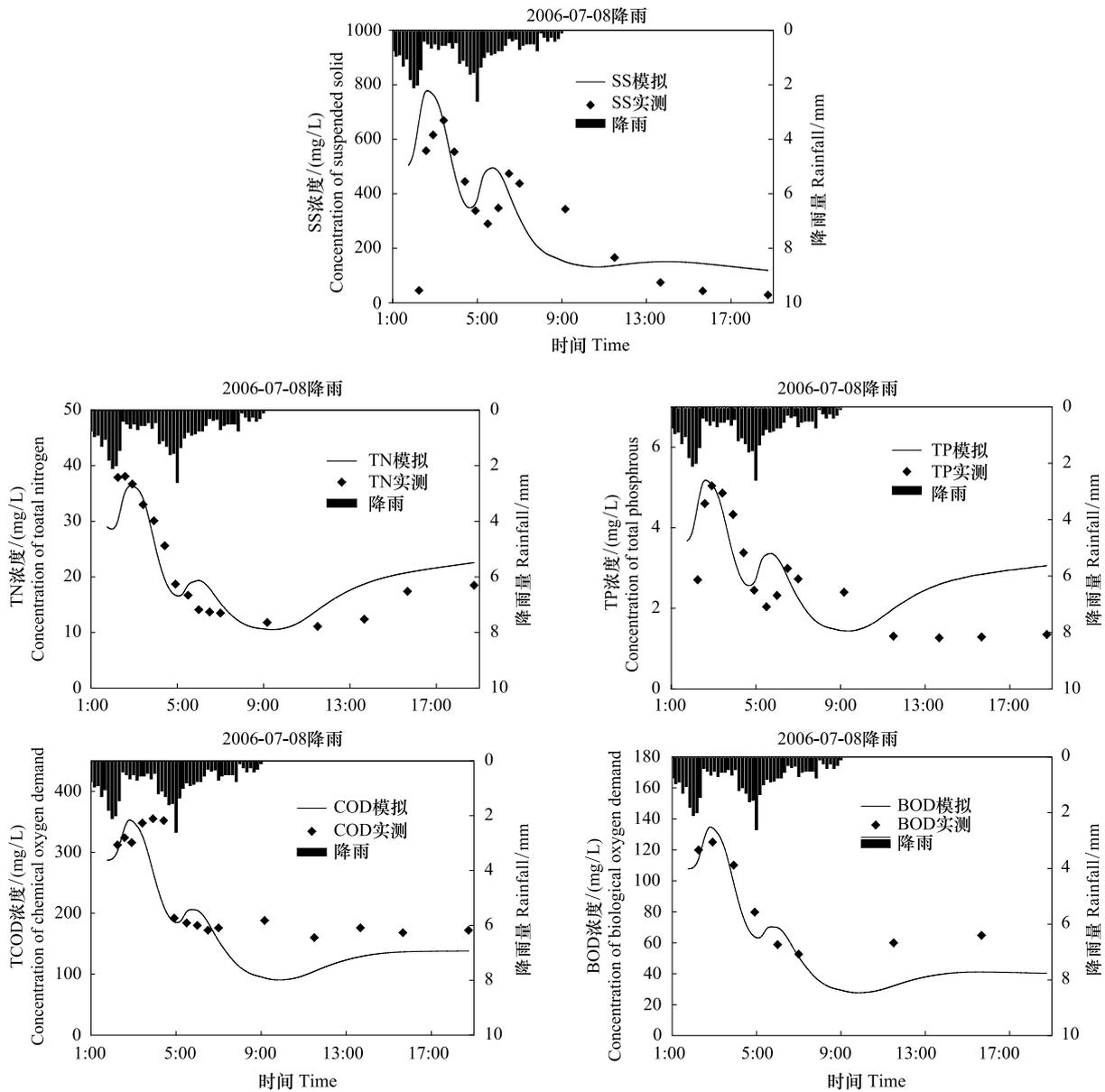


图3 实测与模拟污染物浓度过程线

Fig.3 Measurement and simulation of the pollutographs

2.3 连续模拟结果

通常有 2 种模型模拟方法:设计暴雨和连续模拟。设计暴雨是较为常用的方法,该方法通过设计降雨重现期得到典型降雨过程,通过典型降雨模拟得到典型流量过程和污染物浓度过程,但该方法无法考虑前期干旱时间和降雨的空间分布,另外典型降雨所得到的模拟结果无法满足城市径流控制设施的长时间运行需要的设计条件^[14]。连续模拟一般采用实测数据进行模拟,能够有效避免设计暴雨存在的问题,主要表现在:(1)实测降雨资料充分反映了降雨间隔时间对径流水质的影响,降雨间隔时间是影响径流水质的主要因素,2 场降雨之间的间隔时间越短则第 2 场降雨的径流水质越好;(2)能够充分反映降雨特性,同时能够反映间隔降雨之

表 7 水质参数率定误差分析

Table 7 Error of the quality parameter calibration

污染物 Pollutants	E_r	C_e	r
SS	-0.20	0.64	0.81
TN	-0.02	0.85	0.93
TP	-0.11	0.76	0.93
COD	0.17	0.57	0.84
BOD	0.16	0.72	0.92

间的相互影响^[15]; (3) 长时段的连续模拟能够真实反映年内不同降雨持续时间、不同雨量大小下径流的流量过程, 能够有效指导城市径流控制设施的设计, 避免出现设施设计工程量不适的问题。因此利用 1995—2007 年降雨(小时数据)作为输入进行了长时间序列模拟。数据统计用 SPSS 软件完成。

经模拟计算, 研究区年均地表径流量为 572.2 mm, 径流系数为 0.64。研究区雨季(4 月至 9 月)日径流量频率分布如图 3 所示, 累积频率 50% 对应的研究区雨季日流量为 1.36 m³/s, 累积频率 95% 对应的雨季日流量为 2.33 m³/s。研究区末端为昆明市第 2 污水处理厂, 处理能力为 10×10⁴ m³ d⁻¹, 只能满足处理晴天污水, 以上结果表明, 通过改扩建第 2 污水处理厂将其日处理能力提升至 20 万 m³ 并采用一定的调蓄措施可处理研究区 95% 的雨季污水。

研究区年均雨天径流负荷量 TN、TP、SS、COD 和 BOD 分别为 78.7、8.9、1148.5、725.7 和 128.1 t。雨季日负荷累积频率分布如表 8 所示。根据第二污水处理厂 1996 至 2006 年生产报表统计, 第二污水处理厂日处理 TN、TP、SS、COD 和 BOD₅ 总量分别为 1.25、0.19、5.08、11.84 和 5.7 t, 由表 8 可以看出, 在现有污水处理能力条件下, 第二污水处理厂对雨季 TN、TP、SS 和 COD 的处理率仅为 26.57%、41.94%、44.05% 和 62.67%。

表 8 雨季日污染物负荷累积频率

Table 8 The cumulative frequency for daily pollutant loading of weather season

累积频率/% Cumulative percentage	污染物日负荷 Daily load of pollutants/(t/d)				
	TN	TP	SS	COD	BOD
5	4.59	0.45	11.44	18.72	3.67
50	4.70	0.46	11.52	18.90	5.28
95	7.33	0.78	51.33	42.80	15.55

3 讨论

3.1 模型参数灵敏度的不确定性

参数敏感度分析在建模过程中主要有 2 个作用, 一是评价各个参数的不确定性, 确定模型中哪些方面最容易在系统描述中引进不确定性; 二是确定参数对输出结果影响的大小, 在模型校正过程中重点考虑那些对输出结果影响大的参数。本研究参数敏感性分析的主要目的在于确定参数对输出结果影响的大小从而有针对性地进行参数校正。已有的 SWMM 模型参数敏感性分析结果表明, 模型参数的敏感度取决于状态变量的类型, %imperv 为最灵敏参数, 其次为 Width, N-imperv、Des-imperv、%zero-imperv 等参数受分析所用的雨强影响敏感度有所不同。赵冬泉采用最大似然法对各个参数的不确定性进行了分析, 发现 Width、N-imperv、%zero-imperv 等参数在较大的区间内任意取值, 都可能获得较好的模拟效果, 存在“异参同效”的现象^[16]。这说明以上参数具有较大的不确定性, 雨强仅是引起灵敏度有所差异的一个因素。

3.2 模型参数率定的局限性

参数取值是决定模型应用成功与否的决定因素。然而机理模型, 如 SWMM 模型, 包含了大量参数, 这些参数中的大部分无法直接测定, 或者直接测定需要耗费大量时间, 实际上即使完全采用直接测定的参数也并不一定取得完全令人满意的模拟结果^[17]。这可能是从事模型研究的人员最为困惑的问题。目前最为常用的方法是利用实测数据进行参数率定, 有许多自动参数优化方法得到应用, 然而参数率定只能使用所能拥有的实测数据, 由于实际系统的复杂性, 优化率定所得到的参数往往不具备良好重现性, 优化率定只能是一定范围内

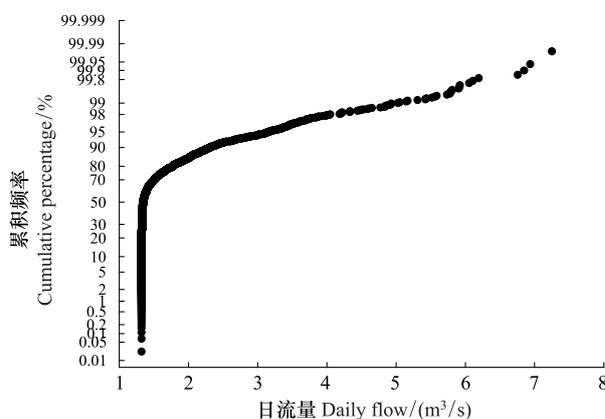


图 4 雨季日流量累积频率

Fig.4 The cumulative percentage for daily flow of the weather season

的优化,而非全局优化^[17]。在这种状况下,模型的意义在于提供给研究者一定精度的模拟结果,利于研究者把握研究区域整体状况,同时研究者可利用模型模拟不同情景模式下的动态变化,分析未来可能出现的情况,制定相应的方案。

3.3 合流污水模拟水质参数取值分析

目前常用的城市径流模型,包括本研究所采用的 SWMM 模型,其水质模块主要考虑了地表污染物累积冲刷,在进行合流制排水系统降雨径流污染模拟时,只考虑了日常污水与地表径流污染的简单累加。然而降雨期间管道沉积物是重要的污染来源,根据 Gromaire 等在巴黎的研究^[18],管道沉积物产生输出规律与地表污染物有类似之处。其规律应表现为:晴天累积、雨天随径流冲刷,输出强度主要受降雨强度、降雨间隔时间、降雨量等因素影响。在目前的研究状况下,还无法定量刻画其输出规律。在进行合流制排水系统降雨径流污染模拟时可通过以下方法将管道沉积物负荷考虑进去:调整地表污染物累积参数,将管道沉积物负荷加至地表污染物,结合监测数据通过参数率定的方法,确定符合污染物输出现状的地表污染物累积参数,这种方法可用于次降雨模拟,能够较好的模拟次降雨污染物输出过程。

通过以上分析可知,在现有研究条件下,为合理模拟合流制排水系统污染物,必须对参数作出非常规调整。

表 9 列出了现有的一些地表颗粒物累积量研究成果。为与现有研究成果对比,对表 6 列出了的水质参数率定结果进行了转换。本研究将城市下垫面分为街道、庭院和屋顶 3 种类型,模型水质参数是根据 3 种下垫面类型来取值。根据下垫面数字化结果,街道、庭院和屋顶 3 种下垫面面积百分比为:27%、43%和 30%,研究区综合污染物累积参数利用 3 种下垫面面积加权得到,参照已有研究结果 SS 约为 TSS 的 20%,则本研究颗粒物累积量为 151.2 g/m²,颗粒物中 TN、TP、COD_{Cr}、BOD₅含量分别为 18.05、1.47、94.21 和 32.4 mg/g。由表 9 可以看出,本研究所取的颗粒物累积量处于已有研究的上限。颗粒物 COD 含量超过现有的一些研究结果(24.6—61.3 mg/g),TN 含量远远超过现有的研究结果(0.73—1.38 mg/g)。

表 9 地表颗粒物累积量
Table 9 Pollutant accumulation on surface

城市 City	平均值(范围) Average value(range)	样点环境状况 Environment of the sample site
成都 ^[19]	20.2(2.6—235.2)(g/m)	商业区
	38.4(1.5—537.8)(g/m)	居民区
	41.7(7.7—349.4)(g/m)	工业区
	36.7(3.3—359.1)(g/m)	交通区
上海 ^[20]	12.4(5.04—23.2)(g/m)	交通区(67774 车次/12h)
	6.1(3.8—10.0)(g/m)	校园
	10.6(6.5—15.6)(g/m)	居民区
	11.8(7.3—16.78)(g/m)	广场
Brisbane, Queensland, Australia ^[21]	2.45(g/m ²)	城郊居住区(ADD=2)
	6.88(g/m ²)	轻工业区(ADD=7)
	15.89(g/m ²)	商业停车点(ADD=1)
Aberdeen, Scotland ^[22]	288.6(77.1—834.8)(g/m ²)	25cm 边石,大学校园路面
	101.9(18.3—321)(g/m ²)	75cm 边石,沥青路面
Melbourne, Australia ^[23]	50—102(g/m ²)	商业区,沥青路面
Sydney, Australia ^[24]	7.24(3.57—18.73)(g/m ²)	中密度居住区,沥青路面
Le Marais, district, Paris, France ^[25]	1.6—3.8(g/m ²)	商业区人行道
	8.5—17(g/m ²)	沥青路面

3.4 城市径流污染在滇池流域水污染中的重要性分析

单位面积负荷率是衡量区域污染强度的一个重要指标,通过污染物单位面积负荷率和城市的面积,可以

初步测算出城市径流污染对滇池总体污染的贡献率^[26]。表 10 列出了本研究通过模拟计算得到的昆明和国内外部分研究城市径流污染物单位面积负荷率。需说明的是本研究地表径流非严格意义上的地表径流,而是包括了管道沉积物。可已看出,本研究所得到的结果基本在已有研究的范围内。与国内研究相比,尽管本研究为合流制排水系统,但各项污染物单位面积负荷率要略低于武汉与上海,这可能与昆明年均降水量较小、空气污染程度较低有关。滇池流域总面积为 2920 km²,扣除滇池水面和上游水库控制的汇水面积后,对滇池有直接影响的实际汇水面积约为 1505 km²,昆明城区面积为 182.06 km²,采用表 10 单位面积负荷率可推算出昆明城区降雨径流 TN、TP、COD 污染负荷为 1377、155、12703 t a⁻¹。昆明城区面积为实际汇水面积的 12.1%,但城市径流 TN、TP、COD 负荷占滇池流域面源污染负荷的比例为 45.01%、32.15%、56.52%(滇池流域面源污染负荷数据来源于文献^[27])。城市径流污染是滇池面源污染的重要来源,并且此类污染将随着城市面积的扩大而日趋严重。如何在今后的城市建设中充分考虑有效控制城市径流污染,将是滇池富营养化污染、建设资源环境友好型城市面临的重大问题。

表 10 不同区域污染物单位面积负荷率

Table 10 Annual pollutant loads of urban runoff in different region

城市 City	污染物 Pollutant/(kg hm ⁻² a ⁻¹)					排水系统类型 Drainage system type	年均降水量/mm Average annual rainfall
	SS	TN	TP	COD	BOD		
昆明(本研究)	1104.3	75.6	8.5	697.8	123.2	合流制	953
武汉 ^[28]	1061.0	86.9	10.4	602.0	—	分流制	1285
上海 ^[29]	1218.0	—	—	1151.0	392.0	分流制	1200
Chongju, Korea ^[30]	1802.8	22.4	7.3	694.8	202.3	分流制	1225
Chongju, Korea ^[31]	1471.0	51.7	15.0	1502.0	636.0	合流制	1225

4 结论

模型模拟是城市径流污染管理和控制的有效手段,本研究从模型构建、参数敏感性分析、参数率定及模拟结果 4 个对 SWMM 模型进行了详细分析。结果表明:SWMM 模型水文水力模块中最灵敏参数为%imperv,其次为 Width、Con-Mann 和 N-imperv。SWMM 模型水质模块中的累积参数 C_1 和 C_2 均是影响污染物负荷和污染物峰值浓度的灵敏参数,而冲刷模块参数 R 、 n 对污染物负荷和污染物峰值浓度的影响受降雨类型的影响,波动较大。模型率定取得了较为满意的结果,径流总量误差在 3%—28%之间,模拟与实测峰值流量基本同时出现,峰现时间误差在 20 min 以内,峰值流量误差小于 20%。污染负荷总量误差在 2%—17%之间,模拟与实测污染物浓度过程趋势基本一致。模拟结果显示,研究区降雨径流 TN、TP、COD 单位面积负荷率分别为 75.6、8.5、697.8 kg hm⁻² a⁻¹,城市降雨径流污染在滇池流域面源污染中占有较大份额。

参考文献 (References):

- [1] 尹澄清. 城市面源污染问题:我国城市化进程的新挑战——代"城市面源污染研究"专栏序言. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1053-1056.
- [2] 杨逢乐, 赵磊. 合流制排水系统降雨径流污染物特征及初期冲刷效应. 生态环境, 2007, 16(6): 1627-1632.
- [3] Huber W C, Dickinson R E. Storm Water Management Model, Version 4, User's Manual. Report EPA-600/3-88-001a. Athens, GA, USA: US Environmental Protection Agency, 1988.
- [4] 黄金良, 杜鹏飞, 何万谦, 欧志丹, 王浩昌, 王志石. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析. 中国环境科学, 2007, 27(4): 549-553.
- [5] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 田富强, 张彤. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析. 水利水电技术, 2006, 37(4): 64-67.
- [6] 蒋颖, 王学军, 罗定贵. 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. 水土保持研究, 2006, 13(3): 165-168.
- [7] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 姜艳, 李秀珍, 布仁仓, 贺红士. 生态模型的灵敏度分析. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056-1062.
- [8] Francos A, Elorza F J, Bouraoui F, Bidoglio G, Galbiati L. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 79(2): 205-218.

- [9] Zádor J, Zsély I G, Turányi T. Local and global uncertainty analysis of complex chemical kinetic systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(10/11): 1232-1240.
- [10] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [11] Lenhart L, Eckhardt K, Fohrer N, Frede H G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002, 27(9/10): 645-654.
- [12] Zaghoul N A. Sensitivity analysis of the SWMM runoff-transport parameters and the effects of catchment discretisation. *Advances in Water Resources*, 1983, 6(4): 214-223.
- [13] Uhl M. Uncertainty of quantity and quality data measure in combined sewer system//Proceedings of the 6th International Conference on Urban Storm Drainage. Victoria; Seapoint Publishing, 1993: 682-687.
- [14] Chen J Y, Adams B J. Development of analytical models for estimation of urban stormwater runoff. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3/4): 458-469.
- [15] Loganathan G V, Delleur J W. Effects of urbanization on frequencies of overflows and pollutant loadings from storm sewer overflows: a derived distribution approach. *Water Resources Research*, 1984, 20(7): 857-865.
- [16] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 王浩昌. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究. *水科学进展*, 2009, 20(1): 45-51.
- [17] Beven K J. 降雨—径流模拟. 马俊, 刘晓伟, 王庆斋, 等. 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 13-16.
- [18] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, Chebbo G. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, 2001, 35(2): 521-533.
- [19] 施为光. 街道地表物的累积与污染特征——以成都市为例. *环境科学*, 1991, 12(3): 18-23.
- [20] 常静. 城市地表灰尘-降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 41-43.
- [21] Hermgren L, Goonetilleke A, Ayoko G A. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 571(2): 270-278.
- [22] Deletic A, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(1): 49-59.
- [23] Vaze J, Chiew F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. *Urban Water*, 2002, 4(4): 379-389.
- [24] Ball J E, Jenks R, Aubourg D. An Assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces. *Science of the Total Environment*, 1998, 209(2/3): 243-254.
- [25] Bris F J, Garnaud S, Apperry N, Gonzalez A, Mouchel J M, Chebbo G, Thévenot D R. A street deposit sampling method for metal and hydrocarbon contamination assessment. *Science of the Total Environment*, 1999, 235(1/3): 211-220.
- [26] 刘忠翰, 贺彬, 王宜明, 周如海, 彭江燕, 余良谋. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响. *地理研究*, 2004, 23(5): 593-604.
- [27] 昆明市人民政府. 滇池流域水污染防治规划(2006—2010年), 2007
- [28] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例. *环境科学学报*, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [29] 张善发, 李田, 高廷耀. 上海市地表径流污染负荷研究. *中国给水排水*, 2006, 22(21): 57-60, 63-63.
- [30] Choe J S, Bang K W, Lee J H. Characterization of surface runoff in urban areas. *Water Science and Technology*, 2002, 45(9): 249-254.
- [31] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff. *Water Research*, 2000, 34(6): 1773-1780.