

城市暴雨管理模型应用研究进展

周思斯¹, 杜鹏飞^{2,3}, 逢勇^{1,4}

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084;
3. 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084;
4. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:回顾了城市暴雨管理模型 SWMM 的发展过程, 着重分析了模型开发关注的重点问题: 子流域划分尺度、模型参数的选取和设定、参数不确定性及灵敏度分析、参数的率定、模型结构的不确定性分析、模型开发与耦合等, 对模型在水文过程模拟、水动力过程模拟、水质过程模拟 3 个方面的应用进行了评述, 并对模型未来的优化应用和开发提出了建议和展望。

关键词:城市暴雨管理模型; 水文模拟; 水动力模拟; 水质模拟; 综述

中图分类号: TV125; X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)06-0089-09

Progress on appliacction of storm water management model// ZHOU Sisi¹, DU Pengfei^{2,3}, PANG Yong^{1,4} (1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, we present a review of the development process of the model and discuss the present problems such as watershed division, selections and settings of parameters, analysis of uncertainty and sensitivity of parameters, calibrations of parameters, analysis of uncertainty of model structure, and expansion of model functions. Additionally, we analyze the model applications from three aspects: hydrological simulation, hydrodynamic simulation, and water quality simulation. The review sheds light on the abilities of SWMM with suggestions for improvement and extension of its application.

Key words: storm water management model; hydrological simulation; hydrodynamic simulation; water quality simulation; review

由美国环保局推出的城市暴雨管理模型 SWMM (storm water management model, SWMM), 是一种动态降水-径流模型, 可模拟城市单一或连续降水事件的水量 and 水质。该模型由 4 个计算模块和 1 个后处理模块组成。计算模块包括径流模块 (runoff)、输送模块 (transport)、扩展输送模块 (extran) 及物质储存/处理模块 (storage/treatment), 后处理模块具有统计和绘图等数据处理功能。

1 模型的发展

1969—1971 年, Metcalf-Eddy 公司、佛罗里达大学和水资源工程公司 (现在的 Camp Dresser & McKee 公司) 3 个机构合作开发 SWMM^[1], 最初目的

是分析和设计合流制排水管网, 包括降雨-径流、水流、水质、储存/处理和排水管网运行 (如入流和渗流) 5 个过程。当前版本 SWMM5 是基于 Huber 改进的版本发展而来的。为了满足最优管理措施 (BMPs) 对降雨径流量水质的控制要求, Huber^[2] 增加了 BMPs/LID 模拟的选项, 通过改进算法, 允许降雨径流从一个子流域流经另一个子流域, 或者在子流域内部径流从不透水区域流经透水区域, 但径流水质计算路径依然只能选择前者, 因为污染物的量只在子流域计算的每个时间步长结束时输出, 另外 Huber 在径流污染物降解计算方面增加了 BMP 去除率和一级降解模拟功能。Huber^[3] 还对管道输送过程中的水质计算进行了补充。然而, 模型版本的改进也带来了模

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07302002)
作者简介: 周思斯 (1981—), 女, 辽宁义县人, 博士研究生, 主要从事水环境规划研究。E-mail: zhousisi@hotmail.com
通信作者: 杜鹏飞 (1970—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事环境规划与环境系统分析研究。E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

型系统结构的变化。Karuppasamy 等^[4]发现将 SWMM4.4 格式输入文件转换成 SWMM5 格式,关键点位(如溢流口)的流量模拟有 5% 以内的差别。最新版本 SWMM5 采用 C 语言重新编写,增加了可视化界面,更易于人机互动,而且该模型源代码开放。这些特点使 SWMM5 很快得到推广应用。随着应用范围的扩展,SWMM5 至今经历了多次升级改版,拥有复杂的数值模拟功能,包括连续模拟、统计分析输入输出时间序列、融雪过程模拟、BMPs 实施效果分析及完整的动态水流模拟等功能。

2 模型开发关注的重点问题

2.1 子流域划分尺度

a. 对水量模拟的影响。空间划分精度对水文模型有很大的影响。通常人们认为适当增加子流域划分的数目可以提高模拟准确度,从集总式到分布式,模拟情景更接近真实情况。但这种观点未必是正确的,因为过度离散化会造成数据增加,使得模拟结果与实测值的差异更大^[5]。另外,子流域划分的尺度越小,对资料的要求就越高,模拟的效率则会大幅降低,因此,对较大城市区域的空间进行划分时,应充分考虑流域地表形态和水文条件,基于流域同质水平(如尺寸和不透水率)来选择合适的空间划分精度^[6]。子流域划分尺度的大小往往对峰值流量预测值的影响较大,但是目前对该影响的方式及其机理解释还存在争议,Guo 等^[7]认为由于子流域在数值模拟时被概化为浅型水库,因此子流域尺度越大,径流时间越长,地表滞留量越大,模拟的峰值流量将越小。Ghosh 等^[8]则认为子流域尺寸效应对峰值流量预测的影响是双面的,对于强度较大的降雨,流域划分尺度大使得预测的峰值流量偏低,是由饱和导水率及子流域地表径流长度 2 个参数综合作用引起的;而对于强度较小的降雨,流域划分尺度大使预测的峰值流量偏高,则是地表漫流及管道流 2 种水流路径综合作用的结果。另外还应注意,采用 SWMM 对农村地区进行模拟时^[9],不能忽视较大的基流和壤中流,必要时还应对模型中含水层土壤组成成分进行合理调整,以便得到更好的模拟结果。

b. 对水质模拟的影响。对流域非点源污染进行模拟时,要充分考虑土地利用类型,尽可能将同类用地类型划分在同一个子流域来减少模拟误差。例如, Park 等^[10]将几个不同土地利用类型的区域进行合并,合并后子流域的径流污染负荷模拟值会随之降低,而将相同土地利用类型区域进行合并时模拟值没有发生变化。尽管土地利用类型是 SWMM 中的重要参数,但是仅仅依赖该单一参数对污染负荷

进行预测是不全面的。McCorquodale 等^[11]对土地利用类型相同的两个区域进行研究时,发现用其中一个区域的实测数据所率定的模型来直接预测另一个地区的水文情势是可行的;但若是用来预测另一个地区的污染负荷,差别就较大,其原因是区域发展的不同阶段对污染负荷的贡献量有影响。

2.2 模型参数的选取和设定

模型参数值的选取和设定直接影响模型系统的性能以及预测结果准确度和可信度的高低。SWMM 属于分布式水文模型,因此雨量站分布情况对模拟结果有很大影响。研究发现,降雨差异与距离之间的关系很小,在研究区域内没有雨量站的情况下,如需使用邻近雨量站的资料,要满足区域内的雨量数据与相邻雨量站的雨量数据具有很好相关性的条件^[5]。从雨量站位置的选取来看,当雨量站位于流域几何重心时^[12],模拟结果误差最小。从雨量站密度的选取来看^[12],当雨量站的密度大于每 2.59 km² 1 个时,雨量站密度对模拟结果的影响很小;当雨量站的密度小于每 2.59 km² 1 个时,随着雨量站密度的减小,模拟的径流总量和峰值流量与实测值的偏差也随之增大(整个区域仅有 1 个雨量站时,偏差最大)。SWMM 在产流计算部分提供了 3 种入渗选项: Horton 入渗模型、Green-Ampt 入渗模型和曲线数值(curve number)模型,其中曲线数值模型不是下渗模型^[13],多数人在认识和使用上存在误区,尤其是以设计为目的的情况下,对峰值流量进行模拟更应慎重选择。Eli 等^[13]经过计算得知,在入渗损失相同的情况下,采用曲线数值法预测的峰值流量比采用入渗模型预测的要小。由于管道糙率值与相应水深有关,流量大时,流速快,糙率值小,而流量峰值随不同的糙率有相应的衰减和滞后时间,因此在计算排水管道中非恒定流时,采用变化的糙率值能得到更好的模拟结果^[14-15]。地表漫流宽度是计算降雨径流的重要参数,SWMM 手册推荐的初始估计方法是用子汇水面积除以平均最大地表漫流长度,Guo 等^[7]则提出采用抛物线函数和正弦函数 2 种方法将流域不规则形状转换成等效动力波矩形平面来计算,并引入表达流域歪斜程度的形状因子,在实际应用中得到较好的模拟结果。由以上研究可以看出,在模型结构不变的情况下,参数设定决定了模型的输出,合理地设定参数能获得更接近真实情况的模拟结果。

2.3 参数不确定性及灵敏度分析

SWMM 是基于现有科学认知体系而构建的复杂数学模型,模型本身的结构给建模过程带来了不确定性(包括模型结构不确定性和参数不确定性)。

而参数不确定性依赖于模型结构,并直接导致参数灵敏度问题^[16]。参数灵敏度分析是研究模型输入变化引起的模拟结果改变的量的大小。通过对模型参数灵敏度进行分析,能定量识别影响某一状态变量模拟输出的重要参数,从而提高参数率定效率。常用的参数灵敏度分析方法主要是扰动法,而近年来参数不确定性分析方法的引入为参数灵敏度分析提供了新的思路。

由于参数不确定性是普遍存在的,根据观测值优化得到的单一参数(组)不能保证寻优到模型的唯一真值,从而影响模型应用的精度和预测结果的可靠性。实际上,一定范围的参数取值所计算得到的预测值都是可以接受的,预测结果不是单一值,而是具有一定置信度的预测区间。陈吉宁团队^[16-17]较早引入不确定性理论,分别采用 HSY(Hornberger-Spear-Young)算法、最大似然法(GLUE)对 SWMM 进行了参数灵敏度分析和参数识别研究。HSY 算法的基本思想是,首先假定参数符合均一分布,用 Monte Carlo 法、拉丁超立方方法等随机采样法在参数取值范围内取值,以模拟值与实测值的偏差为目标函数,能够使目标函数值满足一定区间的参数取值可定义为“行为参数”,反之称“非行为参数”。行为参数和非行为参数各自的统计分布称为参数的后验分布。行为参数在概率密度函数中的概率峰值越明显,则可识别性越强;若越接近均一分布,则可识别性越弱。对行为参数和非行为参数两组样本进行 K-S 检验,通过比较两个分布的最大垂直距离来计算参数空间分布的差异,距离越大,该参数的局部灵敏度就越高。区别于 HSY 算法, GLUE 算法没有清晰地把参数界定为“行为”和“非行为”2 类,而是认为每个参数(组)都有一个使模拟值与真实值相符的似然度,满足一定似然度的参数组都认为是可接受的。

SWMM 是复杂数学模型,参数较多,包括水文模块 12 个主要参数、水力模块 3 个主要参数和水质模块 6 个主要参数^[17-18]。由于采用不确定性方法对参数灵敏度进行分析的计算量很大,因此大多数研究是根据具体内容选取部分参数进行灵敏度分析。董欣等^[18]采用 HSY 算法,得到不透水区洼地蓄水深度和不透水区曼宁系数是水文模块灵敏参数,冲刷系数、最大可能累积值、冲刷指数、累积常数是水质模块灵敏参数的结论。赵冬泉等^[19]采用 GLUE 算法,得到不透水区洼地蓄水深度和不透水区比例是灵敏参数的结论。可见采用 2 种分析方法得到了同一结论,即不透水区洼地蓄水深度是灵敏参数。但是,类似结论不能类推,因为相对于不同的

状态变量(如径流深、峰值流量),其参数的灵敏度是不同的,或者说不同状态变量的灵敏参数是不同的。如,黄金良等^[20]、林杰等^[21]运用相同方法——修正的摩尔斯筛选法,来识别径流模块中影响径流深和峰值流量 2 个状态变量的灵敏参数,得到相似的结论:汇水单元不透水率和汇水单元面积是径流深和峰值流量灵敏度的参数。但也有部分参数的灵敏性差异较大,因此,林杰等^[21]引入变异度概念来表征各个参数灵敏度的稳定性,分析证明了大部分参数都具有较大的变异性,如不同场次降雨使得模型参数灵敏度分析具有很大差异性。

局部灵敏度分析法仅能反映单个参数在初始取值附近的变化对模型输出的影响,而无法对参数在整个取值空间的影响及参数之间的共同作用做出估计。目前对参数的全局灵敏度分析已有了一些探索性研究,如,赵冬泉等^[22]运用 GLUE 法分析了不同降雨间隔情景下参数的全局灵敏性;孙艳伟等^[23]采用摩尔斯法分析了入渗等 7 个水文参数对总产流量、洪峰流量及径流系数 3 个输出变量的全局灵敏度;王浩昌等^[24]采用计算量较小的逐步回归法分析了水文参数的全局灵敏度。采用全局灵敏度分析方法与局部灵敏度分析法所得结论基本一致,但对于二者的差异,目前缺乏深入的剖析和研究。

2.4 参数的率定

早期参数率定主要采用试错法,即人为不断调整参数值,使得模拟结果和监测的水文过程线尽可能接近。此类方法过多依赖人为经验。另一类参数率定方法是采用优化算法使目标函数取得最优值来确定相应的参数值。目标函数一般定义为水文学或水力学特征参数的实测值与模拟值在一定范围内的接近程度,如某场降雨对应的径流总量、峰值流量或流量峰值到达时间等,该法特别适合监测资料缺乏或不连续的情况。Baffaut 等^[25-26]较早引入拟合优化法(专家法)实现了径流模块的水文参数和水质参数的自动率定;Liong 等^[27]在专家法基础上开发了可视化预处理模块,并对径流模块参数进行了局部灵敏度分析;Liong 等^[28-29]还采用遗传算法和 Shuffled Complex Evolution(SCE)2 种方法求解目标函数的最优值,对径流模块水文参数进行率定;Choi 等^[30]采用自动率定法确定模型,发现其预测准确度比传统率定法要高。由于传统单目标优化方法会造成实际应用中将复杂问题过于简化而带来一定的误差,因此,王磊等^[31]尝试将 2 个不同目标函数分别赋以不同权重值并加和,得到一个新的目标函数,实现对模型的多目标自动率定,但该法核心还是单目标优化的方法。近年来结合多目标优化方法发展出

了第二代参数自动率定法。Muleta 等^[32]采用非支配遗传算法以成本最低和溢流量最小为目标函数,将 SWMM 应用于排水管网优化设计。Shinma 等^[33]发现非支配遗传算法对于 2 个非冲突目标函数只有一个解,而对于 2 个相互冲突的目标函数,则得到多个解组成的帕累托解集,需要通过分析帕累托前沿获得最优解。采用目标函数优化方法对参数进行自动率定,虽然可以提高运算效率,但结果受所选目标函数的影响较大,所获得的参数取值^[31]侧重满足目标函数包含的因素条件,与传统水文过程线拟合优度方法比较而言,其可靠性要差。

2.5 模型结构的不确定性分析

由于缺乏研究模型结构不确定性的基础理论和有效方法,使得模型不确定性分析难度较大,目前相关文献极少。Choi 等^[34]将 SWMM 中某些控制参数设为常量或者变量,设计出 8 个不同结构(参数组合)和不同复杂程度(未知参数数量)的模型,采用相同实测资料和优化算法,分别以 6 个不同目标函数对所设计的模型进行率定,通过探讨模型结构和模型复杂程度对参数率定过程的影响,来研究模型结构及其复杂性问题,认为模型表现受结构的影响大于受复杂程度的影响,合理的模型结构比过于细致的描述更重要。

2.6 模型开发与耦合

根据现有文献,SWMM 与其他模型相耦合的方式有 2 类:一类是基于其他模型平台(目前主要是基于 GIS 平台)进行 2 次开发;另一类是通过接口与其他模型衔接,对模型(如二维洪水扩散模型、地下水模型以及大气沉降模型^[35]等)中缺少或不够完善的部分进行拓展。

SWMM 需要输入的参数较多,而 GIS 不仅能够提供流域数字高程、土地利用类型、土壤条件、曼宁系数等常规地理信息数据,还能够计算径流曲线数和汇流时间等较难获得的参数值,在提高建模效率和输入数据可靠性的同时,利用 GIS 人性化的后处理功能使得模拟结果展示变得更加容易^[36],方案的比选和优化也更为直观。另外,GIS 强大的数据处理功能也为模型建立和问题分析提供了新的思路,如赵冬泉等^[37]在较大规模的城市排水系统建模前,依据通用空间拓扑规则和 SWMM 中特定模式下的拓扑规则,对排水系统要素之间的拓扑关系进行了检查和修正;Blumensaat 等^[38]巧妙利用 GIS 空间分析功能,在排水管道资料缺乏时,依据管道布设的一般规则和规范,由道路分布初步确定研究范围内管网的平面布局,然后根据空间地形结构确定管网的连接、走向和长度,最后视城市发展状况(如居住密

度)和降雨条件确定管道的几何尺寸。

SWMM 作为一维模型,只能计算出某区域积水的总量,无法表现洪水的动态扩散情况,不利于对城市淹水区域进行预警,还需与 TUFLOW 等二维模型进行耦合^[39-40]。而且 SWMM 对地下水模拟还不够完善,特别是当地下水水位低于河道水位时更为明显。因此,Jun 等^[41]应用 SWMM-GE (groundwater edition)模型,通过引入地下水水位-流量关系方程,解决了河道-含水层水量交换的问题,建立了反映河道长期水量变化与地下水取水量关系的模型。Delfs 等^[42]则采用达西公式作为地下含水层部分的控制方程,通过地下水与河道水量交换的通量计算实现模型耦合。

3 模型的应用

3.1 水文水动力过程模拟

随着城市的发展,土地利用类型发生了显著变化,不透水面增加,排水管网大量铺设,流域汇流过程从以往下渗为主转变为以地表径流进入地下管网系统后再注入河道为主,汇流时间缩短,使得城市水文过程改变十分明显,具有径流总量大、峰值流量大、流量峰值提前以及径流污染程度增强等特点。因此,SWMM 被广泛应用于城市排水管网运行问题分析和土地利用类型改变前后水文过程的模拟及对比。

城市排水管网运行问题主要是城市内涝和管网溢流污染,其成因源于旧的排水系统以合流制为主,同时排水管网设计标准偏低,难以满足管网服务面积迅速增加的要求,因而造成管网排水能力不足。要解决这类问题,首先应对城市雨洪和积水扩散过程进行模拟,对城市现有管网运行情况进行分析,识别管网运行瓶颈,评估管道运行状况和排水能力^[43-44],评价排水系统洪涝风险^[45]。模拟分析时一般选取不同降雨重现期,而目前的研究较多采用极端降雨条件,如飓风引发的强降雨伴随风暴潮^[46]、河口区不同雨潮叠合^[47]、低重现期暴雨等,但是 Camorani 等^[48]的模拟结果显示,由人类活动和城市化造成的土地利用类型改变,对极端降雨的水文过程影响较小,对常规降雨的水文过程影响较大,因此,对常规降雨的研究更应重视。在对现状问题进行充分分析的基础上,SWMM 被进一步应用于河湖防洪削峰方案比选^[49]、城市排水管网的布局优化^[50]、区域内涝问题分析^[51]、合流制管网雨季溢流问题分析^[52]、管道设计^[53]及设计标准制定等方面。

城市水文过程改变的显著特点是降雨径流总量增加。为了有效对城市径流量及径流污染进行控制和管理,美国实施了最优管理措施(BMPs),而低影

响开发 (LID) 侧重于 BMPs 的工程 设计方面,通过引入强化下渗等手段明显削减径流总量及峰值流量。对 LID 设施建设规模的分析,一般是建立在长序列降雨资料的基础上,以水文过程不变或改变量最小为准则。理论上,在不改变下游水文条件的情况下,区域开发过程中至少有 35% 的面积用于 LID 设施的建设,但 LID 设施占地面积大,而使用调蓄池是减少 LID 设施用地的有效方法^[54]。目前对 BMPs/LID 实施效果进行分析和评价的研究相对较多,大量模拟结果表明 BMPs/LID 绿色设施^[55],如生物增渗-滞留技术^[56]、洼地^[57]、透水路面^[57]、绿屋顶^[57]、凹式绿地^[58]、生物滤池、滞留池^[59]等,在增加入渗、削减洪峰流量、缓解城市洪水、减少合流制管网溢流量及溢流次数等方面具有显著作用。但也有学者^[60]指出,BMPs 更适用于雨量较小的情况,对于雨量较大的情况,采取 BMPs 和调蓄池相结合的方式更合适。此外,结合研究区域的降雨条件,SWMM 还应用于 LID 设施的结构设计^[61]、运行调控^[62]和布局调整^[63]等方面的模拟。

SWMM 在喀斯特地区水文过程研究方面也有特殊应用,通常是把喀斯特地区的洞穴看作天然的管道排水系统,将落水洞和大洼地概化为节点或蓄水单元。Campbell 等^[64]较早采用了这个方法,认为在没有滞后效应的情况下,一些简单的模型,如堰流公式,就可以很好地模拟流入洞穴的径流损失量,如果洞穴流-地表流之间的交换存在蓄水作用,使得洞穴涨水和退水时水位流量线差异很大,而表现出洞穴内明显水流滞后效应,则在建模时可以加入一个假想的蓄水单元进行模拟。除了对水量进行模拟外,Peterson 等^[65]还对溶质输移进行了模拟,并对部分物理参数和水力参数进行了局部灵敏度分析。吴月霞等^[66-67]通过示踪试验、泉水流量监测、土壤入渗试验等方法,确定了含水系统的结构和建模所需的参数,较好模拟了岩溶泉对降雨径流的水文响应过程,同时指出该模型还存在一些不足之处,如入渗模型计算的产流偏大、参数设置较多及部分参数不能反映岩溶含水介质特征等。束龙仓等^[68]将喀斯特含水系统的物理模型概化为管道-裂隙含水介质,研究了管道-裂隙岩溶含水介质非均质性对系统水文过程的影响,认为利用 SWMM 模拟管道-裂隙含水系统的水文过程是有效的。

还有一些研究巧妙地利用了 SWMM 来分析问题。Tsihrintzis 等^[69]把潟湖内辐射状相连通的多条水道概化为节点-管道,模拟潟湖内部的水量交换,以及各方案情景下湖内水体的流量、流速等流态变化。She 等^[70]将改进的 Green-Ampt 入渗方程、达西

定律与 SWMM 径流模块相结合,建立了绿色屋顶的排水模型,模拟了植物生长层前期润湿、中期饱和和渗流及后期干燥的全过程。Smith 等^[71]设计了雨水收集回灌系统,分别用 SWMM 和 EPA-NET 模型模拟了雨天屋顶排水贮存和晴天用泵提水灌溉绿屋顶的循环利用效果。Debusk 等^[72]提出采用径流曲线 CN 结合 SWMM,半定量地分析区域开发前后水文参数的改变量,并以此为基础建立土地开发前后水文过程影响的评价标准。Kim 等^[73]提出出口流量过程是所有上游节点入流的叠加过程,当某个节点可以与下游多个节点连接时,应考虑最优连接方式,使得出口处叠加的流量峰值最小,并开发了最优管网布局模型,包括基于遗传算法建立的管网连接优化模块和基于 SWMM 的水动力计算模块。

3.2 水质过程模拟

近年来点源污染的控制已卓有成效,非点源逐渐成为水体污染不可忽视的来源,非点源污染的控制正日益被人们所重视。城市非点源污染按空间来源主要分地表径流污染和地下管网非点源污染。基于 SWMM 开展的水文、水动力与水质相结合的综合模拟分析,除了应用于排水管网水质计算^[74-75]以外,目前主要应用于区域非点源污染负荷计算^[76]、合流制管道溢流污染模拟^[77]、下垫面污染物沉积^[78]及降雨径流污染规律分析^[79-80]、排水管道沉积物累积冲刷规律研究等。SWMM 虽然是城市暴雨管理模型,但也适用于非城市地区,如 Chen 等^[81]模拟了卡斯特罗谷溪流域内二噁农的施用、累积、降解、冲刷和输移全过程;Nix 等^[82]将蓄滞洪区概化为蓄水设施,研究其对悬浮物的去除行为。

4 SWMM 应用的建议与展望

SWMM 作为一个相对成熟的模型,已成功应用于水文、水动力和水质等方面的研究,对实际工作具有重要的指导意义。然而任何一个模型都不能解决所有问题,其使用也是有局限的,在模型应用过程中仍存在诸多问题需要进一步优化。

a. 由于该模型的开发是基于单核处理技术,而现有的模型不确定性分析方法都需要对几千组参数进行计算,完成一次不确定性分析的计算量很大,使其在管网实时调控应用等方面受到限制,而借助多核处理技术^[83],采用并行计算方法,能有效提高运算效率,大幅缩减运行时间。

b. 将 SWMM 与其他模型相耦合,可以拓展模型的应用,发挥各自的优势。如 SWMM 对水质的模拟过程过于简单,主要采用一级降解模型、经验模型和百分比去除率,很难满足对水质模拟要求较高的

情况,将 SWMM 与较成熟的水质模型相耦合可以得到较好的模拟结果。

c. 加强对模型预测结果的不确定性分析。模型预测结果的不确定性分析给出的预测区间,突破了传统单一预测值,降低了单一最优参数组带来的预测风险,提高了模型应用的精度和预测结果的可靠性。模型预测不确定性研究在参数可接受范围的合理确定、目标函数选用、目标函数优化、采样效率提高、模型结构不确定性分析等方面还有广阔的探索空间。

d. 对全局灵敏度分析与局部灵敏度分析的优劣及各自特点、全局灵敏度应用理论等的研究还有待深入。

e. 合理的模型结构比过于细致的描述更为重要,因此分析模型适用性,优化建模过程,对研究对象的合理概化,参数的合理设定和选取是十分必要的。

f. SWMM 在我国的应用和研究起步较晚,且以模拟应用较多,尤其在城市雨洪相关方面的简单模拟应用过于集中,而研究开发较少。由于基础数据比较缺乏,因此对参数的地域适用性还需深入探讨。在模型开发利用方面,需要更多创新性的研究和探讨。SWMM 的开放性为其功能拓展提供了空间,不仅可节省成本,还能够提高研发效率,在缩短周期的同时,可针对不同需求进行多样性的二次开发。

参考文献:

[1] HUBER W C. Hydrologic modeling processes of the EPA storm water management model (SWMM) [C]// Proceedings of the World Water & Environmental Resources Congress. Reston: ASCE,2004:1-10.

[2] HUBER W C. New options for overland flow routing in SWMM[C]//Proceedings of the EWRI World Water and Environmental Resources Congress. Reston: ASCE,2001: 22-29.

[3] HUBER W C. Wet-weather treatment process simulation using SWMM [C]//Proceedings of the Watershed Management Symposium. Reston: ASCE,2004:253-264.

[4] KARUPPASAMY E,MACKE B,SAUER A,et al. Topeka collection system facility plan update: the modeling challenge[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. Reston: ASCE,2011:3479-3488.

[5] SMITH D, LI J, BANTING D. A PCSWMM/GIS-based water balance model for the Reesor Creek watershed[J]. Atmospheric Research,2005,77: 388-406.

[6] RIVAS I, ROESNER L A. Spatial discretization of large urban watersheds [C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007. Reston: ASCE,2007:1-10.

[7] GUO J C Y, CHENG J C Y, WRIGHT L. Field test on conversion of natural watershed into kinematic wave rectangular plane[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011(1): 341.

[8] GHOSH I,HELLWEGER F L. Effects of spatial resolution in urban hydrologic simulations [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(1): 129-137.

[9] DAVIS J P,ROHRER C A,ROESNER L A. Calibration of rural watershed models in the North Carolina Piedmont ecoregion[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007. Reston: ASCE, 2007:111-120.

[10] PARK S Y, LEE K W, PARK I H, et al. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation [J]. Desalination,2008,226 (1/ 2/3): 328-337.

[11] MCCORQUODALE J A, MOULTON D, BARBE D, et al. Reliability of NPDES derived loads in urban runoff[C]// Urban Drainage Modeling. Reston: ASCE,2001:301-312.

[12] MACKENZIE K, BEN U, JANSEKOK M, et al. Effect of raingage density on runoff simulation modeling [C]// Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007. Reston: ASCE, 2007: 1740-1750.

[13] ELI R N, LAMONT S J. Curve numbers and urban runoff modeling-application limitations [C]//Proceedings of the International Low Impact Development Conference 2010. Reston: ASCE,2010:405-418.

[14] ZAGHLOUL N A. Unsteady gradually varied flow in circular pipes with variable roughness [J]. Advances in Engineering Software,1997,28(2): 115-131.

[15] ZAGHLOUL N A. Flow simulation in circular pipes with variable roughness using SWMM-EXTRAN model [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998,124(1): 73-76.

[16] 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. (LIU Yi, CHEN Jining, DU Pengfei. Parameters identification and uncertainty analysis for environmental model [J]. Environmental Science,2002,23(6): 6-10. (in Chinese))

[17] 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. (ZHAO Dongquan, CHEN Jining, WANG Haozheng, et al. Local sensitivity analysis for pollution simulation of urban rainfall-runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(6): 1170-1177. (in Chinese))

[18] 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. (DONG Xin, DU Pengfei, LI Zhiyi, et al. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff[J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1495-

1501. (in Chinese))
- [19] 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. (ZHAO Dongquan,WANG Haozheng,CHEN Jining,et al. Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation[J]. Advances in Water Science,2009,20(1):45-51. (in Chinese))
- [20] 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. (HUANG Jinliang,DU Pengfei,HE Wanqian,et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling[J]. China Environmental Science,2007,27(4):549-553. (in Chinese))
- [21] 林杰,黄金良,杜鹏飞,等.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[J].环境科学,2010,31(9):2023-2028. (LIN Jie,HUANG Jinliang,DU Pengfei,et al. Local sensitivity and its stationarity analysis for urban rainfall runoff modelling[J]. Environmental Science,2010,31(9):2023-2028. (in Chinese))
- [22] 赵冬泉,董鲁燕,王浩正,等.降雨径流连续模拟参数全局灵敏性分析[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))
- [23] 孙艳伟,把多铎,王文川,等.SWMM模型径流参数全局灵敏度分析[J].农业机械学报,2012,43(7):42-49. (SUN Yanwei,BA Duoduo,WANG Wenchuan,et al. Global sensitivity analysis of runoff parameters of SWMM model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(7):42-49. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] BAFFAUT C,DELLEUR J W. Expert system for calibrating SWMM[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1989,115(3):278-298.
- [26] BAFFAUT C,DELLEUR J W. Calibration of SWMM runoff quality model with expert system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1990,116(2):247-261.
- [27] LIONG S Y,CHAN W T,LUM L H. Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1991,117:507.
- [28] LIONG S Y,CHAN W T,SHREERAM J. Peak-flow forecasting with genetic algorithm and SWMM[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1995,121(8):613-617.
- [29] LIONG S Y, Van NGUYEN V T,GAUTAM T R,et al. Alternative well calibrated rainfall-runoff model: genetic programming scheme[C]//Urban Drainage Modeling. Reston: ASCE,2001:777-787.
- [30] CHOI K,BALL J E. Parameter estimation for urban runoff modelling[J]. Urban Water,2002,4(1):31-41.
- [31] 王磊,周玉文.微粒群多目标优化率定暴雨管理模型(SWMM)研究[J].中国给水排水,2009,25(5):70-74. (WANG Lei,ZHOU Yuwen. Study on PSO multi-objective calibration of SWMM[J]. China Water & Wastewater,2009,25(5):70-74. (in Chinese))
- [32] MULETA M K,BOULOS P F. Multiobjective optimization for optimal design of urban drainage systems[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007. Reston: ASCE,2007:1720-1730.
- [33] SHINMA T A,REIS L. Multiobjective automatic calibration of the storm water management model (SWMM) using non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. Reston: ASCE,2011:598-607.
- [34] CHOI K S,BALL J E. Investigation of model complexity and structure on the calibration process[C]//Global Solutions for Urban Drainage. Reston: ASCE,2002:1-9.
- [35] BURIAN S J,STREIT G E,MCPHERSON T N,et al. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of nitrogen compounds[J]. Environmental Modelling and Software,2001,16(5):467-479.
- [36] HO C F,SU J,TONG J. The usage of GIS in stormwater management master plan[C]//Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2001. Reston: ASCE,2001:1-9.
- [37] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等.基于GIS的城市排水管网模型拓扑规则检查和处理[J].给水排水,2008,34(5):106-109. (ZHAO Dongquan,CHEN Jining,TONG Qingyuan,et al. Inspection and modification of GIS based topological relationships in urban drainage modeling[J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(5):106-109. (in Chinese))
- [38] BLUMENSAAT F,WOLFRAM M,KREBS P. Sewer model development under minimum data requirements[J]. Environmental Earth Sciences,2012,65(5):1427-1437.
- [39] HSU M H,CHEN S H,CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology,2000,234(1/2):21-37.
- [40] RANGARAJAN S,TAKAMATSU M,GREY G,et al. An integrated modeling approach to stormwater management[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008. Reston: ASCE,2008:1-7.
- [41] JUN S,PARK J,LEE W,et al. The changes in potential

- usable water resources by increasing the amount of groundwater use: the case of Gapcheon watershed in Korea[J]. *Geosciences Journal*, 2010, 14(1): 33-39.
- [42] DELFS J, BLUMENSAAT F, WANG W, et al. Coupling hydrogeological with surface runoff model in a Poltva case study in Western Ukraine [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(5): 1439-1457.
- [43] KLEINER J, JACOBSON C. Evaluation, inspection, and rehabilitation of a major storm sewer in the city of Aurora, Colorado [C]//*Proceedings of the Pipelines Conference 2010*. Reston: ASCE, 2010: 1440-1450.
- [44] 刘兴坡, 刘遂庆, 李树平, 等. 基于 SWMM 的排水管网系统模拟分析技术[J]. *给水排水*, 2007, 33(4): 105-108. (LIU Xingpo, LIU Suiqing, LI Shuping, et al. SWMM based simulation analysis for sewer network[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(4): 105-108. (in Chinese))
- [45] 王磊, 周玉文. 基于投影寻踪的城市排水系统洪涝风险评估模型[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(23): 78-82. (WANG Lei, ZHOU Yuwen. Flood risk evaluation model for urban drainage system based on projection pursuit [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(23): 78-82. (in Chinese))
- [46] BARBE D, NEEDHAM W J, MCCORQUODALE A. Simulated flooding of a New Orleans watershed caused by precipitation from hurricanes Fran and Danny [C]//*Urban Drainage Modeling*. Reston: ASCE, 2001: 408-417.
- [47] 龚清宇, 刘伟, 李晶竹. 基于潮汐暴雨过程的城市设计及其数值模拟[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(4): 461-466. (GONG Qingyu, LIU Wei, LI Jingzhu. Tidal and storm responsive urban design with numerical simulation [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(4): 461-466. (in Chinese))
- [48] CAMORANI G, CASTELLARIN A, BRATH A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(8/9/10): 561-574.
- [49] HETTIARACHCHI S, BEDUHN B, CHRISTOPHERSON J, et al. Managing surface water for flood damage reduction [C]//*Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2005*. Reston: ASCE, 2005: 321.
- [50] 董欣, 陈吉宁, 赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用[J]. *给水排水*, 2006, 32(5): 106-109. (DONG Xin, CHEN Jining, ZHAO Dongquan. Application of SWMM model in urban drainage system planning [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(5): 106-109. (in Chinese))
- [51] PARK H, JOHNSON T J. Hydrodynamic modeling in solving combined sewer problems: a case study [J]. *Water Research*, 1998, 32(6): 1948-1956.
- [52] 马俊花, 李婧菲, 徐一剑, 等. 暴雨管理模型(SWMM)在城市排水系统雨季溢流问题中的应用[J]. *净水技术*, 2012, 31(3): 10-15. (MA Junhua, LI Jingfei, XU Yijian, et al. Solution to the problem on urban drainage system overflow in rainy season with storm water management model (SWMM) [J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(3): 10-15. (in Chinese))
- [53] 程伟, 王宏峰, 谌志涛. 基于 SWMM 的雨水管道优化设计[J]. *山西建筑*, 2013, 39(25): 135-137. (CHENG Wei, WANG Hongfeng, CHEN Zhitao. Optimization of rainwater drainage system based on SWMM in the flat area [J]. *Shanxi Architecture*, 2013, 39(25): 135-137. (in Chinese))
- [54] STRECKER E W, HESSE E T. A low-impact development approach for a coastal resort in Southern California [C]//*Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2005*. Reston: ASCE, 2005: 203.
- [55] JAWDY C, REESE A, PARKER J. The potential for green infrastructure practices to reduce combined sewer overflows as examined in Nashville, Tennessee [C]//*Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2010*. Reston: ASCE, 2010: 3452-3461.
- [56] LUCAS W C. Modeling impervious area disconnection with SWMM [C]//*Proceedings of the International Low Impact Development Conference 2010*. Reston: ASCE, 2010: 897-909.
- [57] QIN H, LI Z, FU G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 577-585.
- [58] 王雯雯, 赵智杰, 秦华鹏. 基于 SWMM 的低冲击开发模式水文效应模拟评估[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012(2): 1-7. (WANG Wenwen, ZHAO Zhijie, QIN Huapeng. Hydrological effect assessment of low impact development for urbanized area based on SWMM [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012(2): 1-7. (in Chinese))
- [59] 孙艳伟, 魏晓妹, 薛雁. 基于 SWMM 的滞留池水文效应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2010(6): 5-8. (SUN Yanwei, WEI Xiaomei, XUE Yan. Hydrological effect of detention ponds based on SWMM [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(6): 5-8. (in Chinese))
- [60] GAMBI G, MAGLIONICO M, TONDELLI S. Water management in local development plans: the case of the old fruit and vegetable market in bologna [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 21: 1110-1117.
- [61] PARK D, JANG S, ROESNER L A. Multipurpose detention pond design for improved watershed management [C]//*Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007*. Reston: ASCE, 2007: 11-20.
- [62] URBONAS B, WULLIMAN J. Stormwater runoff control using full spectrum detention [C]//*Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007*. Reston: ASCE, 2007: 385-393.
- [63] JIA H, LU Y, YU S L, et al. Planning of LID-BMPs for

- urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village [J]. Separation and purification technology, 2012, 84: 112-119.
- [64] CAMPBELL C W, SULLIVAN S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the storm water management model[J]. Engineering Geology, 2002, 65(2/3): 133-139.
- [65] PETERSON E W, WICKS C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM) [J]. Journal of hydrology, 2006, 329(1): 294-305.
- [66] WU Y X, JIANG Y J, YUAN D X, et al. Modeling hydrological responses of karst spring to storm events: example of the Shuifang spring (Jinfo Mt., Chongqing, China) [J]. Environmental Geology, 2008, 55(7): 1545-1553.
- [67] 吴月霞, 蒋勇军, 袁道先, 等. 岩溶泉域降雨径流水文过程的模拟: 以重庆金佛山水房泉为例 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 41-48. (WU Yuexia, JIANG Yongjun, YUAN Daoxian, et al. Simulation of hydrological response of Karst spring to precipitation: Case study of Shuifang Spring, Jinfo Mt., Chongqing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 41-48. (in Chinese))
- [68] 束龙仓, 张颖, 鲁程鹏. 管道-裂隙岩溶含水介质非均质性的水文效应 [J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 115-121. (SU Longcang, ZHANG Ying, LU Chengpeng. Hydrologic effects caused by the heterogeneity of karstic conduit-fissure medium [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(1): 115-121. (in Chinese))
- [69] TSIHRINTZIS V A, SYLAIOS G K, SIDIROPOULOU M, et al. Hydrodynamic modeling and management alternatives in a Mediterranean, fishery exploited, coastal lagoon [J]. Aquacultural Engineering, 2007, 36(3): 310-324.
- [70] SHE N, JOSEPH PANG P E. A deterministic lumped dynamic green roof model [C]//Proceedings of the International Low Impact Development Conference. Reston: ASCE, 2008: 1-14.
- [71] SMITH C A, YUEN E E. Rainwater harvesting and green roof irrigation design for a peaked roof a graduate directed study [C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2011. Reston: ASCE, 2011: 4370-4378.
- [72] DEBUSK K M, HUNT W F. Alternative site-assessment hydrologic metrics for urban development [C]//Proceedings of the International Low Impact Development Conference 2010. Reston: ASCE, 2010: 661-670.
- [73] KIM J H, LEE J H, PARK J H, et al. Developing an optimal sewer layout model to reduce peak outflows [C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008. Reston: ASCE, 2008: 1-10.
- [74] 徐速, 陈吉宁, 曾思育, 等. 城市排水系统的集成化模拟研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(15): 50-53. (XU Su, CHEN Jining, ZENG Siyu, et al. Study on integrated simulation of urban drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(15): 50-53. (in Chinese))
- [75] KANG O, LEE S, WASEWAR K, et al. Determination of key sensor locations for non-point pollutant sources management in sewer network [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(1): 20-26.
- [76] 马晓宇, 朱元励, 梅琨, 等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 95-102. (MA Xiaoyu, ZHU Yuanli, MEI Kun, et al. Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(1): 95-102. (in Chinese))
- [77] 孙全民, 胡湛波, 李志华, 等. 基于 SWMM 截流式合流制管网溢流水质水量模拟 [J]. 给水排水, 2010, 36(7): 175-179. (SUN Quanmin, HU Zhanbo, LI Zhihua, et al. Modeling of overflow quantity and quality based on SWMM interception combined drainage network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 175-179. (in Chinese))
- [78] WICKE D, COCHRANE T A, O'SULLIVAN A. Build-up dynamics of heavy metals deposited on impermeable urban surfaces [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 347-354.
- [79] 吴建立, 孙飞云, 董文艺, 等. 基于 SWMM 模拟的城市内河区域雨水径流和水质分析 [J]. 水利水电技术, 2012, 43(8): 90-94. (WU Jianli, SUN Feiyun, DONG Wenyi, et al. SWMM simulation based analysis on rainfall runoff and water quality within urban inland river area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(8): 90-94. (in Chinese))
- [80] OUYANG W, GUO B, HAO F, et al. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 467-473.
- [81] CHEN C L, SCANLIN J, FENG A. Simulating the fate of diazinon in Castro Valley watershed by SWMM [C]//Global Solutions for Urban Drainage. Reston: ASCE, 2002: 1-16.
- [82] NIX S J, HEANEY J P, HUBER W C. Suspended solids removal in detention basins [J]. Journal of Environmental Engineering, 1988, 114(6): 1331-1343.
- [83] BURGER G, SITZENFREI R, KLEIDORFER M, et al. Parallel flow routing in SWMM 5 [J]. Environmental Modelling & Software, 2013(53): 27-34.

(收稿日期: 2013-09-22 编辑: 彭桃英)