

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.007

SWMM的模型改进和耦合应用研究进展

高佳玉, 李家科, 刘柯涵, 蒋春博, 姚雨彤

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 模型模拟是城市雨洪管理领域在规划、设计、预测等方面的重要工具和手段。由于现有的城市雨洪管理模型(SWMM)在功能、精度、可视化等方面存在一定短板,难以满足工程应用的多样性和复杂性,因此对模型的改进、耦合有着迫切需求。围绕SWMM的应用现状,系统阐述了国内外研究热点;从模型机理、模型精度及模型应用三个方面分析了SWMM存在的问题,并从模型改进和耦合应用两个解决途径对国内外研究进展进行了归纳总结;最后对SWMM未来的研究方向提出展望,以期为SWMM的高效应用和功能强化提供基础,为SWMM和类似模型的二次开发提供思路。

关键词: SWMM; 二次开发; 模型改进; 模型耦合

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0039-10

Research Progress on Refinement and Coupling of Storm Water Management Model (SWMM)

GAO Jia-yu, LI Jia-ke, LIU Ke-han, JIANG Chun-bo, YAO Yu-tong

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Model simulation is an important tool for planning, design and forecasting in urban stormwater management. However, the existing Storm Water Management Model (SWMM) has certain shortcomings in terms of functionality, accuracy, visualization, and other aspects, making it difficult to meet the diverse and complex demands of engineering applications. Therefore, there is an urgent need for model improvement and coupling. This paper mainly focuses on the current application status of SWMM, and systematically reviews key research areas both domestically and internationally. Subsequently, issues are identified from three perspectives: model mechanism, model accuracy and model application. The research progress was then summarized from two approaches: model improvement and coupling application. Finally, future research directions of SWMM are proposed. This study aims to provide a foundation for the efficient application and functional enhancement of SWMM, as well as insights for the secondary development of SWMM and similar models.

Key words: SWMM; secondary development; model improvement; model coupling

在气候变化和人类活动的双重影响下,我国城市洪涝问题日趋严重,在这种情况下,城市雨水管

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070157); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-115)

通信作者: 李家科 E-mail: xuat_ljk@163.com

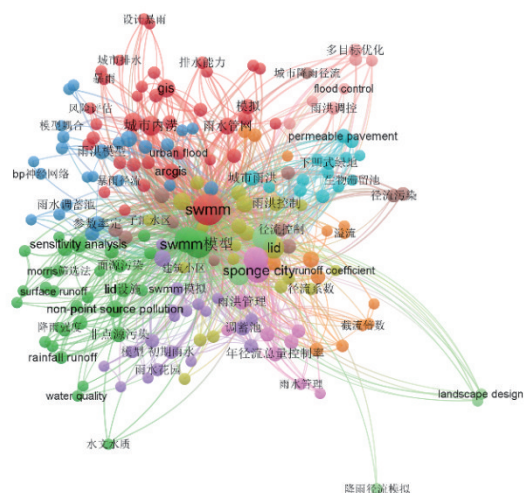
理就显得尤为重要。近年来,半分布式模型已成为评估雨水设施的径流量和污染物负荷调控效果的检验平台,并协同应用于雨水基础设施配置优化的可靠性模拟,场景包括低影响开发(LID)、最佳管理实践(BMPs)和海绵城市建设(SC)等。国内外在城市雨洪管理方面的代表性模型有SWMM、STORM、MIKE URBAN、InfoWorks ICM、DIGITAL WATER、SUSTAIN等。然而,各种技术各有其特点、适用性和局限性,广大学者致力于通过模型改进与耦合应用的方式,解决这一技术瓶颈。由美国环境保护局(EPA)开发的SWMM因操作简单、源代码开放和计算效率高而在相关研究中应用最为普遍。

为了适应复杂多变的现状问题,对模型性能的进一步提升有了更高要求。目前,对SWMM各方面进行改进和耦合应用的研究已经比较丰富,但缺少系统性的归纳。为此,针对SWMM目前的应用现状,从主要问题和解决办法入手,详细总结了SWMM存在的问题,并针对模型改进和耦合应用两种解决方法进行国内外相关研究进展的综述,最后对未来的研究可能性提出了建议,以期为SWMM及其他类似模型的二次开发提供研究思路。

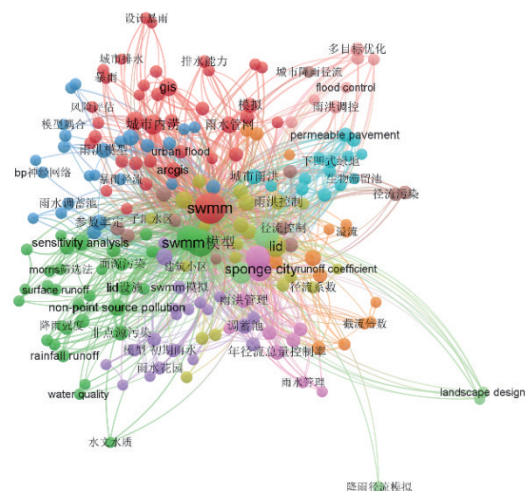
1 SWMM应用进展与现存问题

1.1 应用进展

基于VOSviewer文献计量分析软件绘制了近10年以“SWMM”为关键词发文的聚类网络可视化图谱(见图1),以揭示SWMM研究领域的发展历程、研究现状,辅助预判其研究趋势。中文期刊来源于CNKI,英文期刊来源于Web of Science。



a. CNKI



b. Web of Science

图1 近10年国内外数据库中以SWMM为关键词的聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of research fields with SWMM in the last decade

由图1可以看出,中文期刊的研究范围相对聚焦,主要集中在SWMM本身的建模技术、不同情景的模拟优化等,还有少数将其应用于风险评估。外文期刊涉及的领域则更加广泛细致,在模型模拟的基础上,分割SWMM的不同模块,研究了降雨、冲刷、径流、下渗等不同过程,还结合其他模型模块进行了生态和经济等方面的应用。目前,SWMM的应用领域^[1-3]可归纳为城市和流域两大方面,具体如表1所示。

SWMM可以划分为水文、水力和水质三个主要模块,只需要赋予它相应的参数和降雨条件,即可获得对应的水量和水质结果,并进一步作为基础数据量化评测具体所需指标。SWMM的通用性较好,不仅能对城市进行准确的模拟,而且已逐渐应用在非城市区域^[4],在具有地表信息和过水通道数据的情况下,还能对不同尺度的流域进行模拟。最常见的用途是模拟区域径流量和水质的场次事件或长期连续事件,以获取各蓄水设施的流量、水深和污染物累积冲刷模拟结果,如绘制降雨前后排水管道、明渠或LID设施的水流规律图,模拟城市地表径流污染的产生过程以及排水管网和自然排放系统的水体水质,评估LID措施对城市地表径流水质和水量的调控效果等^[5]。此外,SWMM还能够捕捉汇水区、排水通道、水力结构和雨水滞留设施及其上

下游其他构筑物之间的水流动态,并结合路由计算确定构筑物之间的行程时间和损失^[6]。可见,无论是城市的规划分析还是流域的预测控制,SWMM都是不错的研究平台。

表1 SWMM应用领域总结

Tab.1 Summary of SWMM application aspects

对象	目的	对策
城市	城市排水管网优化	现状排水管道性能评估、可行性方案效果对比、改造方案效果模拟
	城市雨水管理规划	城市防洪排涝水量-水质综合分析、低影响开发设施综合效益明晰、城市雨水管理设施优化配置
	城市内涝防洪预警	城市排水防涝过程模拟计算、城市防洪水量及洪涝位置确定、短历时设计暴雨过程模拟

流域	降雨-径流面源污染控制	面源污染总负荷定量化、累积-冲刷机理的污染物增减过程、污染控制目标可达性及合理性论证
	流域水环境治理效果评估	水环境容量总量控制、地表水体潜在污染源识别、排污控制实施方案设计
	流域河网排涝计算	河网水动力水质模型建立、河网泵站、闸阀工况模拟、河网排涝模式优化设计

1.2 存在问题

目前,SWMM主要存在模型机理、模型精度和模型应用三方面问题,具体如图2所示。

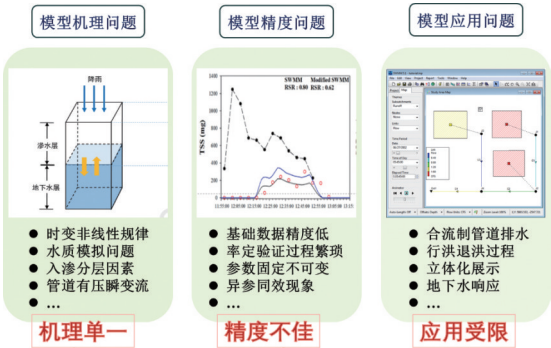


图2 SWMM存在问题

Fig.2 Shortcomings of SWMM

① 机理单一

SWMM的模型机理大体由普适性物理规律组成,对一些特殊情况考虑不够全面。因为未考虑输入数据空间分布和模型参数空间变化对雨洪形成的影响,还不能称之为完全的分布式雨洪模型,且其对城市雨洪形成的模拟建立在线性系统思维基

础上,因此只能适用于符合线性系统特征的雨洪形成问题,对于非线性作用强烈的情况,使用效果将不太理想。

除此之外,SWMM对蒸发情况的模拟也不完善,这对于长历时的流域模拟影响较大。同时,SWMM缺乏对管道瞬变流动过程中压力幅值、瞬态压力分布等的模拟能力,难以预警瞬变流工况的特殊危害。例如,SWMM中,认为水深大于1.78倍最大管径处的缝宽等于最大管径的1/100,Hodges^[7]指出,模型中设置单一狭缝获得的有压流流速远小于真实水面流速,不利于实际管道的水流模拟。SWMM假设所有土壤水分均匀分布在整個土层中,但是这种假设并不合适。同时,SWMM用于分析LID性能时,它仅将Green-Ampt方程和稀释效应应用于水文过程和水质模拟,但在稀释的同时还包括其他基本过程,如污染物的衰减、分解及吸附作用等^[8]。可见,LID建模工具需要进一步改进,以有效管理城市环境。

② 精度不佳

SWMM的不确定性是造成模拟误差的主要原因^[9],主要包括两个方面:一是模型泛化的不确定性,城市的高度空间异质性使得模型需要高分辨率的下垫面数据,这很难获得;二是模型结构的不确定性,人工建筑物、不透水表面、道路和管网改变了自然流道,水力交换条件变得非常复杂,模型计算中间过程的不确定性增加^[10]。参数的率定验证可以减少模型的不确定性,提高仿真精度,是建模过程中必不可少的重要手段^[11]。

手动“试错”校准是一种常用但主观的程序,依靠从业者经验和专家判断来估计给定模式的“最佳拟合”参数值。在初步输入参数后,对模拟值与实测数据进行手工比对,过程繁琐且局限性大,容易产生异参同效的结果。相反,自动校准是一种客观且可重复的程序,用于识别模型的最佳(最佳拟合)参数值,随着计算机技术的发展,一系列自动优化算法如遗传算法、粒子群优化、SCE-UA算法等已广泛应用于SWMM参数的标定^[12]。由于城市水文过程的时空复杂性程度较高,巨大的计算工作量使得算法收敛缓慢,容易陷入局部最优,从而限制了模型校准的时间效率。同时,在完整的水文水质过程中,随着时间的推移,各类参数并非一成不变。例如,城市洪水过程的模拟和预测对时空动态要求更

高,需要获得空间离散分布及其随时间动态变化的仿真信息^[13]。在时间效率和模型精度方面,仅针对洪峰流量或排口流量结果的模型校准已不能满足这一需求^[14]。

③ 应用受限

SWMM作为一种一维、地表的半分布式模型,在实际工程应用中具有很大的限制。当收集到的排水数据不足以描绘高分辨率基础地形时,基于概化的汇水分区的径流路径算法可能会限制描述真实路面在模拟中呈现的空间异质性,模型准确度也会受到模型细分的空间分辨率的影响。如果将具有不同土地覆盖的几个区域用一个汇水分区聚集在一起,可能会低估地表BOD的累积负荷。SWMM水力模块的基础是概化的雨水管网及其附属构筑物。对于老城区而言,雨污合流制管网仍是普遍现象,模型建模需要谨慎考虑这一问题。目前的解决方法主要是将污水流量作为每一个汇水分区的集中入流,或是通过测定管网内旱季流量来剥离雨季的雨污水,但都缺乏准确程度。针对日益重视的合流制溢流污染现象,SWMM缺乏对此模拟预测的能力。单一的地表水模型仅可以简单模拟计算地下水位,不可以模拟地下水位的波动与水力坡度的变化情况,以及地下含水层的动态行为;而单一的地下水模型仅能模拟简化的河流情况,不能对具有空间差异性的降雨和地表径流进行模拟^[15]。SWMM也受限于此,因此如要了解地表水-地下水的连通和转化情况,将两类模型进行耦合才具有研究意义。可视化的模拟仿真是一项对用户友好的功能,尤其是对水环境、水动力学不够了解的决策者而言,可视化的展现表达更加直观,更具有说服力。在城市内涝模拟预测中,SWMM无法给出淹没范围、淹没水深以及水流速度等重要的内涝信息,无法感知行洪退洪过程,而二维可视化的展现能够给管理人员带来良好的策略导向和监测预警方案展示,也能更好地向民众展示政策根由。

随着雨水管理的发展,数值模型已被广泛用作分析工具,如何克服SWMM中各模块的局限性,对其进行二次开发,达到更好地解决各种工程问题的目的,具有重要的现实意义。

2 SWMM二次开发应用现状

由于当今排水系统设计目标的变化,项目实施

时考虑的因素还包含了动态控制规则和优化设计,单一的SWMM已成为一种应用有限的工具,因此对其二次开发非常必要^[16]。SWMM是由C语言编译而成的城市排水系统数学模型,二次开发的本质是对SWMM源码直接进行编译或将C程序编译成其他编程语言模块进行调用,目的则是通过对模型自身不足的内部改进开发以及增强功能的外部耦合开发以契合实际应用情况。

2.1 SWMM的二次开发平台

SWMM作为一款完全开源的暴雨洪水管理模型,源代码包括7个头文件和43个C代码源文件,允许对其源代码进行修改或添加新的算法,根据需求进行相应开发,这一点对其自身缺陷改进及外部功能增强具有很大的潜力,对进一步印证新理论也极其方便。SWMM允许开发人员通过特定的参数,在不打开模型界面的情况下,后台调用SWMM计算引擎^[17],同时也支持通过集成开发环境(IDE)使用。针对SWMM源文件特点,二次开发总体思路为建立动态链接库、读取动态链接库、解析结果文件,基本步骤如下:①调用swmm.open函数读取输入文件;②调用swmm.start函数进行模拟计算的初始化;③调用swmm.step函数计算所有时间步长;④调用swmm.end函数释放资源;⑤调用swmm.close函数关闭文件。在这5个步骤中,可以根据实际情况和项目需求进行模块修改或添加,增强模型的自主性。例如,在输入文件的批量生成和批量模拟、模型参数的规律性改变即敏感性分析、针对特定的项目需求增强模拟功能上,利用SWMM的二次开发功能,将会节省大量的时间和人力。至于更深层次的二次开发,涉及改变模型结构或者替换某个计算模块等,则需要读懂程序源代码,然后进行相应的修改补充和编译。

SWMM常用的二次开发和模块调用语言包括C++、Java、C#、Matlab和Python等,本质上都是对SWMM源码直接进行编译或将C程序编译成其他编程语言模块进行调用。目前,应用最为广泛的SWMM外部调用开源工具箱是MatSWMM和PySWMM。

① MatSWMM

MatSWMM是一个通用于Matlab、Python和LabVIEW的开源软件包(<https://github.com/watersystems/MatSWMM>),用于分析和设计城市排水系统中的实

时控制策略。因为它基于三种高级编程语言(即 Matlab、Python 和 LabVIEW)构建,轻松保证了实现接口和物理应用程序的可能性,对于具有 SWMM 和计算机编程语言基础的学者而言易于掌握。MatSWMM 工具箱的基本结构如图 3 所示。Python 和 Matlab 模块主要通过计算机平台从 SWMM 读取信息,并允许修改初始条件和属性,再通过计算机平台执行模拟,最后进行数据分析。与 Python 和 Matlab 工具箱不同,LabVIEW 工具箱的功能是使用具有输入和输出的块开发的,可以再现 SWMM 模拟、提取参数和修改执行器的设置。MatSWMM 不仅考虑典型降雨场景和关键设施运行条件,还考虑在系统调试之前添加包括传感器和执行器的可能性,并分析如何适当管理这些要素以显著提高排水系统的性能。

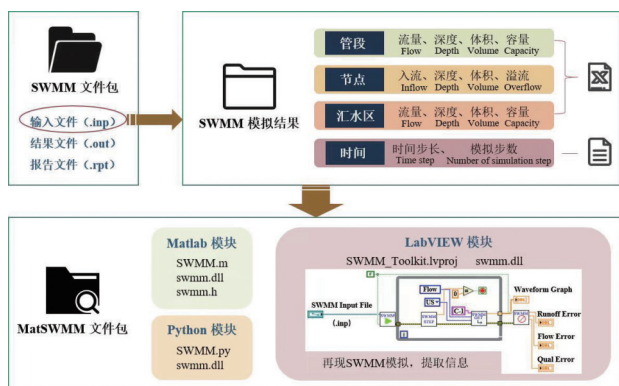


图3 MatSWMM 工具箱的结构

Fig.3 Structure of the MatSWMM toolbox

② PySWMM

PySWMM 是一个简单的扩展包(<https://github.com/OpenWaterAnalytics/pyswmm>),在 Python 中实现对 SWMM 的调用和控制^[18]。目前,控制算法可以用 Python 开发,它允许使用函数、对象以及存储的动态控制,且从版本 v1.1.0 开始,包含了处理存储在 SWMM 二进制输出文件中元数据和时间序列的新特性。目前,已有学者对这一工具进行了应用。Sytsma 等^[19]使用 PySWMM 研究了“可变不透水区域”连接对不同土壤条件、坡度、降雨特性和山坡几何形状的敏感性,证明 PySWMM 运行结果具有良好的保真度。王轩等^[20]利用 ArcGIS 自带的 Python 脚本语言,通过 PySWMM 建立了一个简便、快捷的雨水管道积水自动化系统,既便于 shape 与 inp 文件的转换,又能实现管道水流自动监测。Xu 等^[21]运用

PySWMM 和遗传算法开发了反向优化模型来定位非法连接和管道损坏的高风险聚集区域,以方便准确地诊断和抢修。Sadler 等^[22]基于 PySWMM 开发了 SWMM-Mpc 模型用于城市排水系统的模拟、预测和控制。

可见,SWMM 的二次开发已经成为研究热点和趋势,尤其是基于 Python 或 Matlab 等高级编程语言,使其更加容易上手。国内外已有很多学者基于这种开发思路做了大量研究,均收到了不错的效果。

2.2 基于自身改进的二次开发

为了使 SWMM 更加准确地支持水文气候极端模拟、城市管网精确现状描述、海绵城市的设计规划等,需要对模型自身包含的普适性定理模块以及缺陷进行适当改进。

① 改进模型机理

基于自身机理设定,SWMM 无法应对城市排水管道中快速有压瞬变流现象。周领等^[23]提出并采用“设置虚拟节点、修改 Preissmann 狭缝宽度”的改进方法,以提高 SWMM 在这方面的模拟能力。由此可以联想到城区雨水管道破损变形、外水入侵污染水质等问题,也可以考虑增加外水入渗量、混接量、漏损量等参数或方程来提高 SWMM 管网模拟的完整程度。

许多模型都将渗透过程的介质简化为初期完全干燥状态,而生物滞留系统或降雨前晴天数较少的土壤,在降雨前期及降雨过程中存在可变饱和状态。SWMM 的下渗模块也不例外,它无法处理模拟开始时土壤处于不完全干燥状态的情况。贺娟等^[24]通过在 Horton 模型中引入初始下渗速率参数、在 Green-Ampt 模型中引入初始湿度亏损参数、在曲线数模型中引入初始曲线数参数,使土壤初始状态得以被考虑进 SWMM 计算过程中。对于 LID 模块而言,通常只侧重于减少径流量而忽略了 LID 设施内的水文路径(排水、溢流、渗出和蒸散等),往往这些过程决定了污染物的去向和对流域水文方面的影响^[6]。鉴于此,Baek 等^[8]修改了 LID 水质模块,增加了一个新的水质函数来表征污染物在渗透过程中由植被引起的衰减效应、分解效应及吸附效应。研究结果显示,改进的 LID 水质模块可以提高模型精度并改善其性能,模拟的污染物质与观测值吻合更好,而 SWMM 原本的水质模块因仅使用降雨的稀释效应,高估了其污染物模拟值。

② 提高模型精度

为了提高缺乏排水系统基础数据地区的模型精度,Dai等^[25]通过将SWMM与元胞自动机(CA)方法集成来构建CA-SWMM,保留SWMM强大的管道水力模块,但用CA方法替换其地面汇流模块。CA-SWMM在缺乏市政排水数据的典型小城市的应用结果表明,降雨径流和非点源污染模拟相比于SWMM获得了显著的性能改善,基于CA改进的SWMM具有良好的适用性,可以达到足够的精度和更高的计算效率。在此基础上,若是将SWMM管道一维模拟确定的节点溢流过程线与基于CA方法的二维模块相结合,考虑到排水系统和地表水流之间的复杂相互作用,CA-SWMM可用于模拟洪水行为和城市淹没区。同时,可靠的模型校准也是使模型保持高精度的坚实基础,如Ma等^[14]根据梯度下降法不断调整参数,提出了一种面向过程的SWMM参数实时率定方法,具有较高的实时精度;此外,利用R语言编程环境,使用多目标优化包和非排序遗传算法(NSGA-II)可为SWMM开发一个强大的自动校准工具等。

③ 增大应用范围

SWMM大多执行短历时场次降雨模拟,时间在3 h左右,模型运行速度较快;但SWMM也可以用于长历时模拟,如用于评估某区域年径流总量控制率,甚至还可以用于几年甚至几十年的降雨情景中,这时运行速度就是必须要考究的问题。对此,Li等^[26]提出了用流量传输链(FTC)来取代雨水管理模型(SWMM)的路由部分,并将其与SWMM的径流部分相结合,结果表明,改进的SWMM-FTC和校准的SWMM之间的相对误差小于0.25%,而计算效率提高了19.3倍。同时为了扩大SWMM在不同问题上的应用可能性,如地表水-地下水模型之间的通用性,Zhang等^[27]将地下水响应纳入LID模拟的改进SWMM-LID-GW模型开发、校准、验证和测试,模拟了不同环境条件下LID设施的水文性能,并在此基础上评估了LID设施对初始地下水位深度、降雨类型和原位土壤类型的影响,提出了一些通用的非线性多元公式来预测浅层地下水环境中LID设施的水文性能,可有效应用于项目实施前LID实践的可行性分析。

综上,为了使SWMM适应各种复杂的应用环境,模型的改进工作也在不断完善。但单一模型的

作用始终不足,此时耦合SWMM与其他模型(模块)的方法应运而生。

2.3 基于耦合链接的二次开发

模型耦合是指不同的模型(模块)在时间和空间上进行计算交互的过程,包括耦合机制和耦合算法两方面。针对SWMM本身不具备的功能,与其他外部模型(模块)的耦合将会达到事半功倍的效果。

2.3.1 将SWMM嵌入其他模型

一些情况下,一些商业模型会将SWMM中的优势模块嵌入自身模型中。例如,SUSTAIN模型以ArcGIS为平台,在成本分析和技术优化的基础上,融合SWMM模型的水文模块,并耦合HSPF模型中沉积物模拟方法,以实现城镇或单元范围内雨洪整治方案有效性和经济性的评估和分析。丹麦水利研究所DHI开发的MIKE系列,也结合了部分SWMM功能,不论是老版本MIKE URBAN模型还是新版本MIKE+模型,均考虑了用户不同的数据需求,将SWMM编译在二者中,以满足用户不同的建模习惯并兼容数据格式^[28]。但这两个模型均为商业模型,不开放源程序,其灵活应用受到限制,大量的研究还是集中在对SWMM与其他开源模型联用上。

2.3.2 SWMM与其他模型平行联用

在大多数情况下,SWMM与其他完整模型平行联用的目的是为了达到放大两个模型各自的优势,实现功能补全和应用范围扩大的效果。

① 快捷建模

SWMM建模时,首先应用AutoCAD软件对原始管网数据进行处理,概化过程较为繁琐。孙潭等^[29]结合市政排水管道AutoCAD图形信息的存储特点,提出使用C#语言的AutoCAD软件二次开发技术,形成可在AutoCAD软件环境中交互式构建SWMM的SWMMTools插件,实现了将图纸信息自动转化成SWMM软件可识别的管段、节点及汇水区域信息,进而转化成SWMM文件,完成SWMM的自动构建。SWMMTools插件的开发和应用,有助于提高雨水管理模型构建的效率和准确度。

② 二维模拟

想要实现城市洪水演进和内涝模拟的功能,除了基于二维CA方法改进SWMM的陆面汇流模块外,还可以将SWMM与其他二维模型进行耦合。例如,雷向东等^[30]以广州车陂涌流域为研究区,尝试

将二维水动力模型 ANUGA 与 SWMM 进行耦合并构建城市内涝模型 AGSWM,验证结果表明耦合模型能较好地模拟研究区暴雨内涝时空演变过程,进而将其用于不同情景下城市内涝情况的模拟。房亚军等利用 CCHE2D 模型可更精准、快速地模拟受高密度建筑物影响的洪水过程这一优点,分别以我国西南地区典型山地城市区域^[31]和北京市通州区海绵城市建设试点区^[32]为两个研究区域,基于高精度地形数据和多方位的实时监测数据,构建了暴雨管理模型-平面二维水沙模型(SWMM-CCHE2D)单向耦合模型。王兆礼等^[33]以广州长湴地区为例,通过历史暴雨事件验证、模型对比等方式分别对比了 SWMM 与 LISFLOOD-FP、WCA2D 及 TELEMAT-2D 三种二维水力模型耦合的效果,结果表明基于 SWMM 和 TELEMAT-2D 模型构建的耦合模型 TSWM 可得到更为精细的模拟结果。另外,SWMM 耦合二维模型后,可以更加直观地展现城市内涝行洪退洪过程,方便决策者进行防洪管理和规划。

③ 增大应用范围

为了探明更大范围的水量、水质变化过程,Baek 等^[34]通过耦合 SWMM 和 HYDRUS-1D 模型,开发了一种新的建模工具 SWMM-H,对中试规模的绿色屋顶和城市底基层进行了降雨径流试验,可以更准确地模拟绿化屋顶的土壤水分和底槽的径流量。Zhang 等^[35]耦合 SWMM 和 MODFLOW 模型,实现了在区域尺度上模拟绿色设施和地下水之间精细的相互作用,同时作为进一步评估生物滞留系统空间分配对地表径流和地下水位动态影响的基础。可见,SWMM 与地下水模型耦合可以用来模拟海绵城市规划方案的城市水文以及地下水响应效应,但耦合时往往需要分析 SWMM 和 MODFLOW 模型的模拟原理和结构特点,从空间尺度和源汇项两方面来实现模型的耦合。

还值得一提的是,SWMM 模拟河道时,往往采用以不规则断面的“conduit”作为河道的过水路径,用节点的“inflow”功能作为流量供给,这种方法误差较大,且无法模拟河道中污染物的对流扩散和生化过程。为了同时对接河道水环境的变化情况和陆域面源污染对河道水质的冲击影响,孔宇等^[36]构建了 SWMM-MIKE11 耦合模型,利用 SWMM 进行海绵设施和雨水管网模拟,将 SWMM 中管网排口径流作为边界条件导入 MIKE11 模型中,可以实现二者优

势互补。SWMM 和 MIKE11 耦合模型还可以应用在城市感潮河网中,将各分块的径流过程作为河网入流,为河网水动力学模型提供流量边界条件,实现降雨径流模型与水动力模型的耦合计算,这将为水环境综合治理项目的成效模拟和预测提供模型基础。同理,为科学评估新风河水环境综合治理工程效果,陈焰等^[37]构建了基于 SWMM 与环境流体动力学模型 EFDC 水陆一体化耦合模型,开展流域截污治污、湿地建设、引水补水和初期雨水调蓄工程的环境效应定量模拟评估。基于 SWMM 和 EFDC 构建的水陆一体化耦合模型在水环境治理工程效果评估中具有较好的适用性,对城市河道的水污染控制具有一定的指导意义。

④ 嵌入优化框架

对于一个实际项目,不同方案之间的最优化比选是不可回避的问题,如排水系统的优化设计、海绵设施的配置优化等。配置优化一般采用多种方案模拟优选的方式,主观性较大且最优解难以穷尽,此时将优化框架与模拟平台相结合就成为最便捷的方式。例如,Saadatpour 等^[38]在 Matlab 环境中开发了多目标多回路优化算法,并将其与 SWMM 耦合,以解决绿色设施在面积和位置两个因素影响下的方案优选问题。Yu 等^[39]也以 Matlab 为平台,将 SWMM 与改进的 PICEA-g 优化算法集成在一起,获得了 LID 实施的最佳解决方案。Shojaeizadeh 等^[40]则在 ExcelVBA 平台下开发了 GIP-SWMM 集成工具,用于绿色基础设施(GI)的配置优化,为多个相互作用和竞争的备选方案提供了一种客观的分析方法,以找到 GI 的最佳组合和位置。

除了上述比较常见的功能增强外,针对特定目的对模型其他方面的优化也很多。例如,同时考虑 SWMM 模型的水文水质模拟功能和 GIS 的空间分析及结果表达功能,建立二者集成平台;开发贝叶斯推理与 SWMM 相结合的随机源识别模型,以重建下水道网络中瞬时水饺发病率的分布^[41]等。可见,识别现状问题,并通过改进模型的方式恰当解决问题是目前环境管理的迫切需要和技术需求。

3 总结与展望

SWMM 因源代码开放给水文模型的二次开发提供了很好的平台,有效解决了特定情况下异质性的机理问题,提高了模型应用的精度和广度。得益

于计算机语言的快速发展,类似于MatSWMM、PySWMM等很多调用工具包在模型改进和外部耦合方面提供了极大的帮助,进一步增强了SWMM的可操作性。在应用时,模型(模块)之间应根据问题所需和实际状况进行灵活选择,取长补短。基于开源模型的有效改进能够促使模型真正为人所用,为实际所用。

在对SWMM各个方面改进之后,可以使得模型模拟结果更加贴近现实情况,应用范围更加广泛,可视化效果更加突出等,但仍有部分问题值得进一步探讨。

① 在城市雨水管理和内涝防控方面,深入探究水循环规律和水质迁移转化规律有助于杜绝措施实施的盲目性;开发确切的城市水文水动力模型,可以有效重现城市产汇流变化过程。因此,夯实模型物理基础、发展耦合城市水文过程和水动力过程的模型,是城市雨水管理的一个重要发展趋势。在城市水系统纵向连通循环方面,建立降水-径流-下渗-补给等完整的水量、水质相关关系,耦合地表水-地下水模型,对水系统平衡、水环境健康发展尤为重要。

② 在水环境模拟领域,在保证数值格式稳定性的同时,提高模型的计算精度和计算效率的优化配置,增加模型的功能,将模型应用于流域范围的洪涝灾害及水环境综合整治,是今后需要深入研究的方向之一;同时,大数据时代的数据捕捉和方案动态规划也是未来的研究方向,如极端天气变化条件下的调控设施布局与动态控制、天-地-网-泵-河的整体水量水质输移与转化过程等。如何应用SWMM集成其他优势点、达到想要的效果,仍在不断探索之中。

③ 在进一步改进工作上,针对所使用的编程语言特点,为改进后的SWMM程序添加并行计算技术,解决运行速度过慢、资源利用率过低、过度依赖代理模型等问题。继续扩展模型工具箱,包括更多的控制策略(如实时控制、定位控制、优化控制等),以及更多的外部耦合模块(如天气发生模块、地下水模块、供水模块等),将会有效提升SWMM的可用性和连贯性,为问题解决提供更便捷的手段。总而言之,模型改进与耦合应用会随着新问题的出现不断变革,在各个应用领域展现出更大的发展和应用潜力。

参考文献:

- [1] 李家科,蒋春博,李怀恩,等.海绵城市低影响开发设施优化设计与配置研究[M].北京:科学出版社,2021.
LI Jiako, JIANG Chunbo, LI Huai'en, *et al.* Study on Optimal Design and Allocation of LID Facilities in Sponge City [M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 吴锦世.道路低影响开发措施的雨洪径流控制效果研究[D].南京:东南大学,2020.
WU Jinshi. Research on Storm Water Runoff Control Effect of Road Low Impact Development Measures [D]. Nanjing: Southeast University, 2020 (in Chinese).
- [3] XUE J Y, WANG Q R, ZHANG M H. A review of non-point source water pollution modeling for the urban-rural transitional areas of China: research status and prospect [J]. Science of the Total Environment, 2022, 826: 154146.
- [4] 常潮.基于SWMM对蒿坪河流域地表径流和面源污染的研究[D].西安:长安大学,2019.
CHANG Chao. Study on Surface Runoff and Non-point Source Pollution in Haoping River Basin Based on SWMM [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese).
- [5] LIU K, LI J, XIA J, *et al.* Study on LID facilities comprehensive effect evaluation: a case in campus [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2022, 22(3): 530-540.
- [6] LISEN BEE W A, HATHAWAY J M, WINSTON R J. Modeling bioretention hydrology: quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128179.
- [7] HODGES B R. An artificial compressibility method for 1D simulation of open-channel and pressurized-pipe flow [J]. Water, 2020, 12(6): 1727.
- [8] BAEK S S, LIGARAY M, PYO J, *et al.* A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124886.
- [9] GUO Q, CHEN J, ZHANG X C J, *et al.* Impacts of using state-of-the-art multivariate bias correction methods on hydrological modeling over North America [J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): e2019WR026659.
- [10] CAO X J, LYU H H, NI G H, *et al.* Spatial scale effect of surface routing and its parameter upscaling for urban flood simulation using a grid-based model [J]. Water

- Resources Research, 2020, 56(2):e2019WR025468.
- [11] QI W, ZHANG C, FU G T, *et al.* Impact of robustness of hydrological model parameters on flood prediction uncertainty [J]. Journal of Flood Risk Management, 2019, 12(S1):e12488.
- [12] KUMAR S, KAUSHAL D R, GOSAIN A K. Evaluation of evolutionary algorithms for the optimization of storm water drainage network for an urbanized area [J]. Acta Geophysica, 2019, 67(1): 149–165.
- [13] BRENDEN C E, DYMOND R L, AGUILAR M F. Integration of quantitative precipitation forecasts with real-time hydrology and hydraulics modeling towards probabilistic forecasting of urban flooding [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 134: 104864.
- [14] MA B Y, WU Z N, HU C H, *et al.* Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation [J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127269.
- [15] WANG Y, CHEN N W. Recent progress in coupled surface-ground water models and their potential in watershed hydro-biogeochemical studies: a review [J]. Watershed Ecology and the Environment, 2021 (3): 17–29.
- [16] 蒋春博, 李家科, 高佳玉, 等. 海绵城市建设雨水基础设施优化配置研究进展[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 19–29.
- JIANG Chunbo, LI Jiake, GAO Jiayu, *et al.* Advances in research of optimal rainwater infrastructure configuration in sponge city construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (3): 19–29 (in Chinese).
- [17] 陈文杰. 城市洪涝水文水动力模型构建与洪涝管理关键问题研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- CHEN Wenjie. Urban Flood Hydrological and Hydrodynamic Model Construction and Flood Management Key Issues Exploration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [18] MCDONNELL B E, RATLIFF K, TRYBY M E, *et al.* PySWMM: the python interface to stormwater management model (SWMM) [J]. Journal of Open Source Software, 2020, 5(52): 1–3.
- [19] SYTSMA A, BELL C, EISENSTEIN W, *et al.* A geospatial approach for estimating hydrological connectivity of impervious surfaces [J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125545.
- [20] 王轩, 李长坡, 沈宁娟. 基于 pyswmm 的雨水管道积水自动化分析系统设计[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(23): 247–248.
- WANG Xuan, LI Changpo, SHEN Ningjuan. Design of automatic analysis system for rainwater pipeline water based on pyswmm [J]. Rural Economy and Science–Technology, 2018, 29(23): 247–248 (in Chinese).
- [21] XU Z X, QU Y, WANG S Y, *et al.* Diagnosis of pipe illicit connections and damaged points in urban stormwater system using an inversed optimization model [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126011.
- [22] SADLER J M, GOODALL J L, BEHL M, *et al.* Leveraging open source software and parallel computing for model predictive control of urban drainage systems using EPA–SWMM5 [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 120: 104484.
- [23] 周领, 陆燕清. 排水管道瞬变流的 SWMM 模拟能力研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 108–115.
- ZHOU Ling, LU Yanqing. SWMM Simulation capability for transient flow in drainage pipe [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5): 108–115 (in Chinese).
- [24] 贺娟, 梁小光, 温卫华, 等. SWMM 下渗模型算法改进研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 122–125.
- HE Juan, LIANG Xiaoguang, WEN Weihua, *et al.* Algorithm improvement of SWMM infiltration model [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 122–125 (in Chinese).
- [25] DAI Y, CHEN L, SHEN Z Y. A cellular automata (CA)-based method to improve the SWMM performance with scarce drainage data and its spatial scale effect [J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124402.
- [26] LI S S, WANG Z L, WU X S, *et al.* A novel spatial optimization approach for the cost-effectiveness improvement of LID practices based on SWMM–FTC [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 307: 114574.
- [27] ZHANG K, CHUI T F M, YANG Y. Simulating the hydrological performance of low impact development in shallow groundwater via a modified SWMM [J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 313–331.
- [28] DHI. MIKE+ FLOOD V2022 新功能—SWMM 与 2D Overland 耦合[EB/OL]. (2022–01–28)[2022–04–12]. <http://dhichina.cn/h-nd.html>.
- DHI. MIKE+FLOOD V2022 new feature—SWMM coupled with 2D Overland [EB/OL]. (2022–01–28)[2022–04–12]. <http://dhichina.cn/h-nd.html> (in

- Chinese).
- [29] 孙潭, 李树平, 彭绪华. AutoCAD图形文件与SWMM耦合技术的开发与应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 110-114.
- SUN Tan, LI Shuping, PENG Xuhua. Re-development of coupling technology between AutoCAD drawings and SWMM and its application [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 110-114 (in Chinese).
- [30] 雷向东, 王兆礼, 曾照洋, 等. 基于ANUGA和SWMM耦合模型的车陂涌流域城市内涝模拟分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 82-90.
- LEI Xiangdong, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, *et al.* Simulation analysis on Chenbei watershed waterlogging based on ANUGA and SWMM coupling model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 82-90 (in Chinese).
- [31] 房亚军, 于川淇, 金鑫, 等. 基于SWMM-CCHE2D单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 898-906, 941.
- FANG Yajun, YU Chuanqi, JIN Xin, *et al.* Research on water-logging control effect of mountain sponge city based on SWMM-CCHE2D unidirectional coupling model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 898-906, 941 (in Chinese).
- [32] 房亚军, 于川淇, 金鑫. 基于SWMM-CCHE2D耦合模型的海绵城市内涝管控效果评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 582-591.
- FANG Yajun, YU Chuanqi, JIN Xin. Evaluation of SWMM-CCHE2D model-based sponge city inland food control effects [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 582-591 (in Chinese).
- [33] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于TELEMAC-2D和SWMM模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124.
- WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124 (in Chinese).
- [34] BAEK S, LIGARAY M, PACHEPSKY Y, *et al.* Assessment of a green roof practice using the coupled SWMM and HYDRUS models [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 109920.
- [35] ZHANG K, CHUI T F M. Assessing the impact of spatial allocation of bioretention cells on shallow groundwater—an integrated surface-subsurface catchment-scale analysis with SWMM-MODFLOW [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124910.
- [36] 孔宇, 孙巍, 李小龙, 等. 河道海绵建设中SWMM-MIKE 11耦合模型的构建及应用思路[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 74-79.
- KONG Yu, SUN Wei, LI Xiaolong, *et al.* Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 74-79 (in Chinese).
- [37] 陈焰, 夏瑞, 王璐, 等. 基于SWMM-EFDC耦合模拟的新凤河流域水环境治理工程效应评估[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 777-788.
- CHEN Yan, XIA Rui, WANG Lu, *et al.* Effects assessment of water environment treatment projects based on SWMM-EFDC coupling simulation in Xinfeng River basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 777-788 (in Chinese).
- [38] SAADATPOUR M, DELKHOSH F, AFSHAR A, *et al.* Developing a simulation-optimization approach to allocate low impact development practices for managing hydrological alterations in urban watershed [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102334.
- [39] YU Y, ZHOU Y C, GUO Z Y, *et al.* A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale: integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform [J]. Science of the Total Environment, 2022, 831: 154843.
- [40] SHOJAEIZADEH A, GEZA M, HOGUE T S. GIP-SWMM: a new green infrastructure placement tool coupled with SWMM [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111409.
- [41] SHAO Z Y, XU L, CHAI H X, *et al.* A Bayesian-SWMM coupled stochastic model developed to reconstruct the complete profile of an unknown discharging incidence in sewer networks [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 297: 113211.

作者简介:高佳玉(1995-),女,陕西西安人,博士生,
主要研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: gjy_7421@163.com

收稿日期: 2022-12-02

修回日期: 2023-03-25

(编辑: 丁彩娟)