

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.012

河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路

孔 宇^{1,2}, 孙 巍², 李小龙³, 夏阳光³, 徐 汉³, 杨小丽³

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210008;
3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:为解决我国城市化进程中的水安全和水环境问题,结合海绵城市建设理念和河道综合整治目标,分析暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)和 MIKE 11 模型的适用范围、具备优势和存在不足。结果表明,SWMM 广泛应用于径流总量控制和面源污染削减的模拟,但是无法模拟河道中污染物的对流扩散和生化过程;MIKE 11 河网模型广泛应用于城市河道水量和水质模拟,可预测特定条件下的河道水环境变化情况,但是无法反映陆域面源污染对河道水质的冲击影响。构建 SWMM-MIKE 11 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到 MIKE 11 模型中,可以实现二者优势互补。

关键词:SWMM; MIKE 11 模型; 水文水质模型; 河道海绵建设; 模型耦合

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0074-06

Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction//KONG Yu^{1,2}, SUN Wei², LI Xiaolong³, XIA Yangguang³, XU Han³, YANG Xiaoli³ (1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to solve the problems of water safety and water environment in the process of urbanization in China, combined with the construction concept of sponge city and the goal of comprehensive river regulation, the application scope, advantages and disadvantages of SWMM model and MIKE11 model were analyzed. The results show that SWMM model is widely used in the simulation of total runoff control and non-point source pollution reduction, but it cannot simulate the convection diffusion and biochemical process of pollutants in river channels. MIKE 11 river network model is widely used in the simulation of urban river water quantity and quality. It can predict the changes of river water environment under specific conditions, but it cannot reflect the impact of land-based non-point source pollution on river water quality. SWMM-MIKE 11 coupling model can be built by using the SWMM to model the sponge facilities and rainwater pipe network, and importing the pipe network discharge flow of SWMM as the boundary condition into MIKE 11 model, so as to realize the complementary advantages of the two.

Key words: SWMM; MIKE 11; hydrology and water quality model; sponge river construction; model coupling

针对我国城市化进程中的水安全和水环境问题,习近平总书记先后提出了建设“海绵城市”的号召和“节水优先、空间均衡、系统治理”的治水思路。此后,“海绵城市”相关政策纷纷出台,目前海绵城市建设已上升至国家战略层面^[1-3]。城市河道作为海绵城市建设“源头削减—过程控制—末端治理”

系统方案的天然海绵体和末端受纳系统,开展海绵河道研究能显著增强海绵城市建设的系统性和整体性,有效改善城市河道水环境。但是,城市河道多为流动性差的浅型水体,具有水环境容量小、自净能力弱的特点,其受到径流污染冲击后,往往面临较高的水质恶化和水华暴发等风险^[4]。此外,南方水系发

达,区域水系之间污染物的交换迁移、水系沟通对河道水动力条件的改善及其对河道水质的影响也必须考虑。因此,开展河道海绵建设工作必须把研究对象从水体本身扩展到整个汇水区域^[5]。汇水区域是物质和能量交换的开放系统,并且内部存在着复杂的水文和水动力反馈机制。面对实际复杂的水环境问题,传统专家决策不可避免地带有主观性和片面性,而水文水质模型用数学的语言和方法定量刻画水体水量和水质的时空分布和变化规律,具有更强的科学性和客观性,在某种程度上能够弥补传统决策机制的缺陷。其中,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)和 MIKE 11 模型在各自领域内的研究应用已十分广泛,但是关于二者耦合模型应用在海绵城市建设中却鲜有报道。本文提出利用 SWMM 进行陆域海绵方案的设计与规划,并耦合利用 MIKE 11 模型对“天然海绵体”城市河道进行水动力和水质分析与评估,实现 SWMM 和 MIKE 11 模型优势互补,以期海绵城市河道工程建设提供理论支撑和实际指导。

1 SWMM

SWMM 是一种包含降雨、海绵等模块的分布式水文模型,具备水文、水力和水质过程模拟分析功能。当前,在海绵城市建设的背景下,SWMM 主要应用于海绵城市规划设计的方案评估,具体包括径流总量控制和面源污染削减两个方面。

a. 径流总量控制。SWMM 在缓解城市内涝风险应用中,主要以径流总量和径流峰值的削减率为指标,分析不同 LID 方案对“瓶颈管段”和“溢流节点”的缓解作用,以此进行方案评估与比选^[6-7]。2015 年,王文亮等^[8]利用 SWMM 验证了城市径流总量控制指标及其量化分解方法。2017 年,吴晓瑜等^[9]以中山市某工业园区为研究对象,利用 SWMM 建立了优化的 LID 改造方案。2018 年,张勤等^[10]选取昆明某片区为研究对象,采用 SWMM 模拟研究 LID 措施与雨水调蓄池联合运行的效果,表明组合措施对径流总量和径流峰值均有明显削减作用。以上研究表明,在建设海绵城市的理念下 SWMM 对于径流总量和径流峰值的控制模拟十分有效^[11]。

b. 面源污染削减。在既往研究中,黄国如等^[12]基于双层排水系统思想,在城镇流域尺度上利用 SWMM 对 3 条河道进行概化,率先实现了城区河道与排水管网系统连接,为后续学者研究面源污染提供了新思路。赵磊等^[13]利用 SWMM 对昆明市明通河流域进行径流污染模拟计算,并以单位面积负荷率为指标推算出径流污染是滇池面源污染的主要

来源。袁溪等^[14]利用 SWMM 研究了下凹式绿地对径流污染的削减效果,结果表明下凹式绿地对 SS 和 TN 的削减率分别达到了 72.7% 和 66.1%。陈新拓等^[15]以成都市某黑臭河道为研究对象,基于 SWMM 构建了面源污染负荷模型,模拟发现,当陆域不透水面积由 60% 降低到 30% 时,河道中 COD、TP 浓度分别下降了 17.8%、17.3%。以上研究表明,利用 SWMM 通过在陆域添加 LID 措施削减面源污染的效果显著。

由此可见,通过海绵城市建设提高陆域的滞留、渗透作用能显著削弱径流污染对河道水质的冲击,SWMM 在海绵城市建设中能够发挥“源头削减”的作用。因此,从水量和水质角度来看,SWMM 可以模拟径流总量控制和面源污染削减的效果,具体技术路线见图 1。

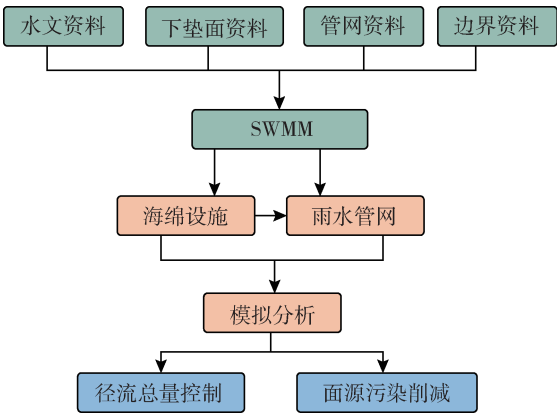


图 1 SWMM 技术路线

Fig.1 SWMM technology roadmap

对海绵城市区域性的系统建模,SWMM 通过将河道概化为管道的思路已得到广泛研究和应用。但是,SWMM 无法模拟河道中污染物的对流扩散和生化过程,无法模拟河道自净能力和进行河道水环境容量计算,所以 SWMM 在河道海绵建设实际应用中具有一定的局限性。

2 MIKE 11 模型

MIKE 11 模型是丹麦 DHI 公司研发的 MIKE Flood 洪水模拟组件的重要板块。根据城市水系、水文和水质资料,MIKE 11 模型可构建一维河网模型,用于城市河道水量和水质模拟,预测在特定条件下的河道水环境变化情况,具有节约人力、计算准确和结果可视化的优点^[16]。

a. MIKE 11 模型原理。MIKE 11 模型利用核心模块——水动力模块来模拟河道污染物的对流扩散过程,采用六点隐式差分法对一维圣维南方程组进行离散求解^[17]。该方法的计算网格由水位点和

流量点组成,在相同时间步长下按顺序交替对水位点和流量点进行计算,在水位点之间采用动量方程求解,在流量点之间采用连续方程求解。

b. MIKE 11 模型的应用。MIKE 11 模型已成为研究河道水环境问题的重要手段。马强等^[18]基于 MIKE 11 模型对梁滩河流域河道的水质时空变化特征进行分析,模拟结果表明生活污水是导致河道水质变差的主要污染源。张斯思等^[19]在分析河段水动力和水体污染特点的基础上,提出了 MIKE 11 模型结合稀释流量比 m 值法计算河道水环境容量的方法。周红玉等^[20]针对北运河流域水污染的严重现状,利用 MIKE 11 模型构建了水动力水质耦合模型,对 3 种水质改善方案的效果进行了模拟评估,提出提高污水厂排放标准并利用水网构建湿地系统可使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 达到地表水Ⅳ类水标准。熊鸿斌等^[21]基于 MIKE 11 模型以合肥市十五里河为研究对象构建了水动力水质耦合模型,模拟分析不同补水方案和补水流量下的水质改善效果,为河流的水环境治理提供了新思路。胡如幻^[22]通过 MIKE 11 模型对研究区域水系不同结构连通度及不同连通路径下的河流水质状况进行模拟分析,实现了区域水系沟通——“活水”的末端治理功能。由此可见,MIKE 11 模型在河道海绵建设中能够发挥着“末端治理”的作用。与 SWMM 相比,MIKE 11 模型具备强大的水动力水质模拟能力,可应用于城市河道、污染源分析、水环境容量计算、水质改善方案评估等水环境方面,具体技术路线见图 2。

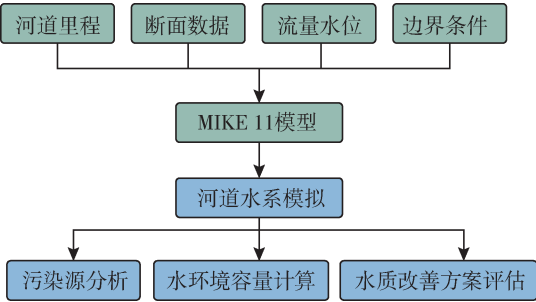


图 2 MIKE 11 模型技术路线

Fig.2 MIKE 11 technology roadmap

解决城市内涝和提升河道水质需要从海绵设施、雨水管网和河道水系整体系统入手,定量描述水量和水质的时空变化规律,以便基于海绵理念提出区域水量和水质控制规划方案。而 MIKE 11 模型研究对象是城市河道,无法对海绵设施和雨水管网进行概化建模,也就无法反映陆域面源污染对河道水质的冲击影响。虽然 MIKE 系列软件的 MIKE URBAN 可以实现对城市雨水管网的建模,但是无法添加海绵模块,所以构建 SWMM-MIKE 11 耦合模型

对于系统解决城市面临的水安全和环境问题具有重要意义。

3 SWMM-MIKE 11 耦合模型

基于 SWMM 和 MIKE 11 模型功能应用的差异化,已有学者对 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建和应用开展了一些探索研究。罗福亮等^[23]以平原河网区为研究对象,利用 SWMM 对各子汇水区进行产汇流计算,将各子汇水区的径流过程作为河网入流,为 MIKE 11 模型提供流量边界条件,实现了 SWMM 和 MIKE 11 模型的耦合计算。栾慕等^[24]采用同样方法构建 SWMM-MIKE 11 耦合模型模拟了桐庐县的降雨径流和防洪排涝情况,并以此为基础绘制了内涝风险图,结果表明 SWMM-MIKE 11 耦合模型对城市河网地区开展防洪排涝规划具有指导意义。许淑敏^[25]为了研究降雨径流对天津市海河干流水质的影响,首先利用 SWMM 计算不同重现期下沿河排口的径流量和污染物负荷量,然后将其作为旁侧入流耦合到 MIKE 11 模型建立的河道水动力水质模型中,进行河道汇流及自净模拟,并模拟评估了 3 种水质改善方案的效果差异:利用污水处理厂降污时,不同重现期条件下对河道水质改善效果有限;采用生态湿地进行降污处理时,降污效果随重现期增大而增强;采取引滦调水措施时,降污效果随重现期的增大而减弱。众多研究表明,SWMM-MIKE 11 耦合模型对解决城市河道水环境问题具有重要价值。

构建研究区域的 SWMM-MIKE 11 耦合模型的基本思路为:首先利用 SWMM 对各个汇水分区和管网进行概化,然后利用 MIKE 11 模型对河道水系进行概化,最后将管网排口的径流作为流量边界条件耦合到 MIKE 11 模型中进行模拟计算,实现 SWMM 和 MIKE 11 模型的耦合。在此基础上,利用 SWMM 增添陆域海绵设施,分析和评估海绵设施对研究区域水量和水质的控制效果,具体技术路线见图 3。

3.1 模型概化与参数初始值的确定

模型概化是模型构建的物理基础,SWMM-MIKE 11 耦合模型是一套可以应用于河道海绵建设的系统模型,要求模型使用者不仅对所研究的各个要素(降雨、海绵、管网、河道等)之间的联系有深刻的认识,还要熟练地掌握各研究对象的变化规律。同时,在具备大量资料和数据的基础上辅助以 CAD、GIS 等统计分析工具,更准确地进行模型概化和确定模型初始参数,实现科学化和精准化的水文水质建模。目前,SWMM 和 MIKE 11 模型概化和初始参数确定的数据来源主要有 4 个方面:环保局、水利局、气象局等政府部门的基础数据资料;设计院等

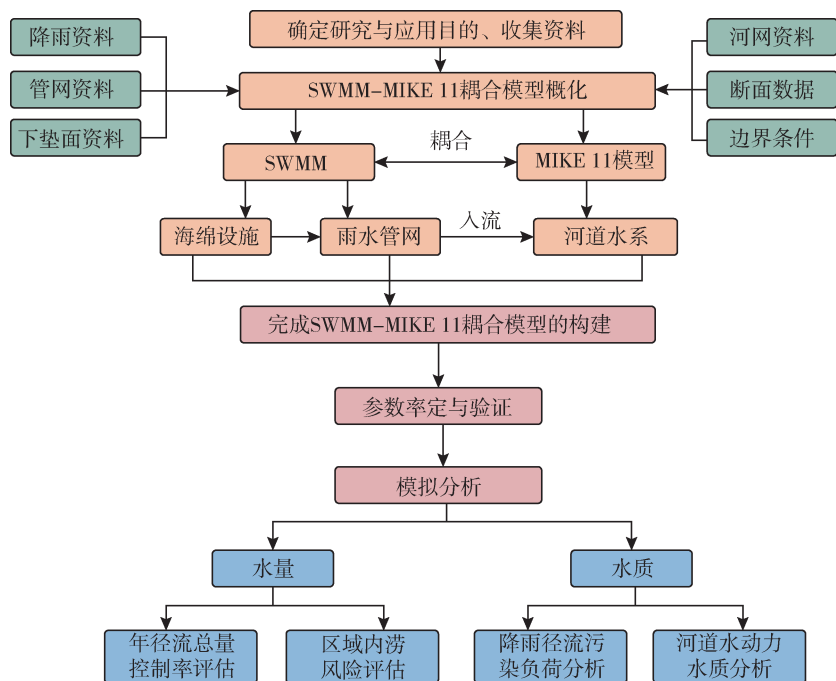


图3 SWMM-MIKE 11 耦合模型技术路线

Fig. 3 SWMM-MIKE 11 coupling model technology roadmap

企业单位的图纸资料;区域卫星影像和高程图;模型手册等相关文献的推荐值或经验值。实际工程中模型参数初始值的确定往往需要综合考虑以上各个方面。

3.2 模型参数的率定与验证

模型参数的率定与验证是模型构建成功与否的关键,直接关系到模型的可靠程度。实际建模过程中,参数众多往往无法对每一个初始参数值进行率定和验证,通过参数灵敏度分析能够识别出对模型输出结果影响较大的敏感参数,提高模型率定和验证的效率。李春林等^[27]利用 Morris 筛选法对 SWMM 参数进行了局部灵敏度分析,结果表明对径流总量和径流峰值最敏感的水文水力参数分别是不透水地面洼地蓄水量、管道曼宁系数和地表漫流宽度,对径流污染敏感性较高的水质参数是污染物最大累积量和冲刷系数。蒋元勇等^[28]研究表明 SWMM 敏感参数主要受到降雨强度、土地利用类型和输出变量类型因素的影响。许春东等^[29]研究表明河道糙率、坡度是 MIKE 11 模型水动力计算中的显著敏感参数。于永强等^[30]研究同样表明河道糙率对洪峰流量的影响最大,并且选用敏感参数可提高 59% 以上的率定效率,对模拟结果影响较大水质参数有污染物的扩散系数、综合衰减系数等。

SWMM-MIKE11 耦合模型的率定和验证,可先进行 SWMM 的率定和验证,然后将 SWMM 计算的径流结果作为边界条件导入到 MIKE 11 模型中,最后进行 MIKE 11 模型的率定和验证。在河道海绵

建设中,应根据具体工程从“海绵”到“河道”分别对 SWMM 和 MIKE 11 模型实际应用中难以测量的参数进行率定和验证,从而提高耦合模型的整体可靠性。

3.3 耦合模型应用思路

为推进 SWMM-MIKE 11 耦合模型指导海绵城市河道建设工作,选择江苏省首批海绵城市试点片区——丁家庄作为研究区域,面积 3.94 km²,有北十里长沟东支、丁家庄沟和柳塘沟 3 条河道,河道里程共计约 5.3 km。主要思路为:

a. 基于 SWMM 和 ArcGIS 软件对陆域下垫面和雨水管网进行概化,共划分了 198 个子汇水区和 473 条管段。首先,根据实测降雨时排口流量和水质对 SWMM 进行参数率定和验证;然后,通过 SWMM 分析在不同降雨重现期下节点溢流量和管网承载力,进行区域内涝风险评估;最后,利用 SWMM 将径流污染(面源污染)转换为管网点源污染对河道水质的冲击,并计算沿河各个排口的径流量以及污染物量。

b. 根据河网资料和实测断面数据,利用 MIKE 11 模型对 3 条河道进行概化,生成河网文件和断面文件,将由 SWMM 计算得到的各排口流量作为边界流量条件耦合到 MIKE 11 模型中;根据实测河道控制断面的水位和水质对 MIKE 11 模型进行参数率定和验证。利用 MIKE 11 模型,分析河道水质污染情况,进行河道自净模拟及水环境容量评估。

c. 采取基于海绵理念的源头削减和沟通水系的末端治理措施,并利用 SWMM-MIKE 11 耦合模型

分别评估不同降雨重现期下区域内涝风险缓解程度和河道水质改善效果,为海绵城市河道建设工作决策提供参考。

3.4 耦合模型存在问题

SWMM-MIKE 11 耦合模型要运用到实际工程中,必须考虑实际陆域情况、河流水系的复杂性和监测条件的不完整性问题,因为这些问题会导致耦合模型计算误差较大。所以,耦合模型建模过程中,首先必须保证 SWMM 和 MIKE 11 模型的参数来源资料的时效性和一致性,并且善于运用卫星影像地图、ArcGIS 等软件进行分析提取敏感参数;其次,要善于把复杂问题进行概化,抓住主要矛盾,运用计算平均值或综合系数等方法,提高建模的效率和模型的实用性。

此外,由于 SWMM 和 MIKE 11 模型分别是两家机构独立开发的两套代码框架,并且 SWMM 为开源,MIKE 11 模型为闭源,所以难以实现两者真正在结构上的耦合。但是建模时,可以将 SWMM 和 MIKE 11 模型各取所长,优势互补,利用 SWMM 进行陆域的内涝风险模拟评估,将 SWMM 计算的管网排口流量运用 EXCEL 做成时间序列文件,输入到 MIKE 11 模型中,再利用 MIKE 11 模型进行河道水环境的模拟评估,以确保耦合模型的整体性和系统性。

4 结 语

通过构建 SWMM-MIKE 11 耦合模型完成海绵设施、雨水管网和河道水系的系统建模,进行年径流总量控制率、面源污染负荷、河道水环境容量等指标的模拟分析,具有良好的应用前景。利用耦合模型解决实际工程问题时,要善于把复杂的实际情况进行抽象概化,运用 ArcGIS 等辅助软件和综合系数等分析方法,以提高建模的效率和模型的实用性。由于 SWMM 和 MIKE 11 模型文件结构不同,并且 MIKE 11 模型是闭源的商业软件,目前 SWMM-MIKE 11 模型的耦合是将 SWMM 模拟结果输入到 MIKE 11 模型,以实现模型优势互补,但是难以实现 SWMM 和 MIKE 11 模型在结构上真正耦合。此外,模型率定和验证过程缺乏统一可靠的参照标准和方法,今后需加强相关研究,从而更好地为河道海绵建设提供参考指导。

参考文献:

[1] 袁再健,梁晨,李定强. 中国海绵城市研究进展与展望[J]. 生态环境学报,2017,26(5):896-901. (YUAN Zaijian,LIANG Chen,LI Dingqiang. Progress and prospect of the study on sponge city in China[J]. Ecology and

Environmental Sciences, 2017, 26(5):896-901. (in Chinese))

- [2] 翟慧敏,程启先,李书覃,等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护,2020,36(2):34-40. (ZHAI Huimin,CHENG Qixian,LI Shuqin,et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):34-40. (in Chinese))
- [3] 刘家宏,王东,李泽锦,等. 厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J]. 水资源保护,2019,35(6):9-13. (LIU Jiahong,WANG Dong,LI Zejin,et al. Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area [J]. Water Resources Protection,2019,35(6):9-13. (in Chinese))
- [4] 邹丹. 城市景观水体的污染防治技术研究[D]. 武汉:武汉科技大学市政工程,2008.
- [5] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua,CHEN Yingwu,WU Xiaoling,et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))
- [6] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming,ZOU Ying,SUN Jinhua,et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):58-65. (in Chinese))
- [7] 陈焱,何智伟,张琦,等. 基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价[J]. 水资源保护,2019,35(6):1-8. (CHEN Yao,HE Zhiwei,ZHANG Qi,et al. Evaluation of reconstruction schemes for small-and medium-scale sponge city based on hydrological control target[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):1-8. (in Chinese))
- [8] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之城市径流总量控制指标[J]. 中国给水排水,2015,31(8):18-23. (WANG Wenliang,LI Junqi,CHE Wu,et al. Explanation of sponge city development technical guide:planning index for urban total runoff volume capture [J]. China Water & Wastewater,2015,31(8):18-23. (in Chinese))
- [9] 吴晓瑜,黄维,周密. 基于 SWMM 的某工业园区 LID 方案及模拟评估[J]. 中国给水排水,2017,33(11):139-142. (WU Xiaoyu,HUANG Wei,ZHOU Mi. Low impact development planning and evaluation in an industrial park based on SWMM simulation [J]. China Water & Wastewater,2017,33(11):139-142. (in Chinese))
- [10] 张勤,陈思飘,蔡松柏,等. LID 措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. 中国给水排水,2018,34(9):134-138. (ZHANG Qin,CHEN Siyao,CAI Songbai,et al. Simulation of lid measures combined with stormwater detention tank[J]. China Water & Wastewater,2018,34

- (9):134-138. (in Chinese))
- [11] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35 (2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):32-36. (in Chinese))
 - [12] 黄国如,张灵敏,雒翠,等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 16-20. (HUANG Guoru, ZHANG Lingmin, LUO Cui, et al. Application of SWMM model in Minzhi River basin of Shenzhen City[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4):10-14. (in Chinese))
 - [13] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1961-1972. (ZHAO Lei, YANG Fengle, YUAN Guolin, et al. Simulation of the quantity and quality of the urban runoff[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1961-1972. (in Chinese))
 - [14] 袁溪,李敏. 基于 SWMM 模型的下凹式绿地污染物削减效应分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(3): 49-55. (YUAN Xi, LI Min. Analysis on reduction effect of different pollutants by sunken green space based on SWMM[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(3):49-55. (in Chinese))
 - [15] 陈新拓,陈琳,余佳,等. 成都市典型黑臭河道水质特征的 SWMM 模型分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊1): 218-223. (CHEN Xintuo, CHEN Lin, SHE Jia, et al. Analysis on water quality character of typical malodorous river in Chengdu City by SWMM model[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(Sup1): 218-223. (in Chinese))
 - [16] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护, 2013, 29(3): 6-9. (ZHU Maosen. One-dimensional water quality model based on MIKE11 for Liaohe Basin[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(3):6-9. (in Chinese))
 - [17] 王领元. 丹麦 MIKE11 水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J]. 中国水运(学术版), 2007, 7(2): 106-107. (WANG Lingyuan. Study on the application of Danish MIKE11 hydrodynamic module in river network simulation [J]. China Water Transport(Academic Version), 2007, 7(2):106-107. (in Chinese))
 - [18] 马强,陈福容,王颖. 基于 MIKE 11 Ecolab 模型的梁滩河流域水污染问题探讨[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 33-36. (MA Qiang, CHEN Furong, WANG Ying. Research on water pollution problem of Liangtanhe basin based on MIKE 11 ecolab model[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11):33-36. (in Chinese))
 - [19] 张斯思. 基于 MIKE11 水质模型的水环境容量计算研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
 - [20] 周红玉,王培京,刘操. 基于 MIKE11 的北运河流域水质改善方案效果评估[C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集. 北京:《环境工程》编辑部, 2018.
 - [21] 熊鸿斌,陈雪. 基于 MIKE11 的污染河流水质改善最佳方案研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(3): 61-65. (XIONG Hongbin, CHEN Xue. Exploration of the optimal scheme for improving water quality of a polluted river based on MIKE11[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3):61-65. (in Chinese))
 - [22] 胡如幻. 乡村水系连通的数值模拟研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
 - [23] 罗福亮,元媛,范剑斌. SWMM 和 MIKE11 耦合模型在城市感潮河网中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2013(3): 98-102. (LUO Fuliang, YUAN Yuan, FAN Jianbin. Application of SWMM and MIKE11 coupled model in urban tidal river network [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(3):98-102. (in Chinese))
 - [24] 栾慕,袁文秀,刘俊,等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):57-61. (in Chinese))
 - [25] 许淑敏. 天津市降雨径流对海河干流水质的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
 - [26] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3):15-21. (in Chinese))
 - [27] 李春林,胡远满,刘淼,等. SWMM 模型参数局部灵敏度分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 1076-1081. (LI Chunlin, HU Yuanman, LIU Miao, et al. Local sensitivity analysis of parameters in Storm Water Management Model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 1076-1081. (in Chinese))
 - [28] 蒋元勇,丰锴斌,刘学文,等. 城市雨洪 SWMM 模型的敏感参数研究综述[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 194-200. (JIANG Yuanyong, FENG Kaibin, LIU Xuewen, et al. Summary of sensitive parameters SWMM model of urban stormwater[J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 194-200. (in Chinese))
 - [29] 许春东,殷丹. 基于 MIKE 11 的河道糙率灵敏度分析[J]. 水电能源科学, 2014(11): 101-103. (XU Chundong, YIN Dan. Sensitivity analysis of bed roughness by MIKE 11 model [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11):101-103. (in Chinese))
 - [30] 于永强,沙晓军,刘俊,等. MIKE11 模型的参数全局敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 64-67. (YU Yongqiang, SHA Xiaojun, LIU Jun, et al. The global sensitivity analysis for MIKE11 model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6):64-67. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-11 编辑:王 芳)