

基于SWMM模型的 金川河降雨-径流预警预测平台研究

杨 庆^{1,2}, 刘志超², 李国光², 黄开龙^{1,2}, 张徐祥², 祝栋林²

(1. 南京江岛环境科技研究院有限公司, 江苏 南京 210019;

2. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要:准确模拟降雨-径流动态变化规律是河流面源污染精准治理的先决条件。在收集分析金川河子流域、交汇处、排口、导管、闸门、泵站及运营制度等相关数据的基础上,概化金川河水系,采用SWMM构建金川河河网水动力模型,并基于模型开发不同降雨特征(少量多次降雨、短期暴雨)条件下水系径流预警预测平台,展示金川河流域的流量、径流变化趋势,以实现流域降水模型的快速推演和预警预测功能。

关键词:城市内河; SWMM模型; 河网水动力; 降雨-径流; 预警预测

中图分类号:TV882.9

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)11-0064-0005

Research on rainfall-runoff early warning and forecasting platform of Jinchuan River based on SWMM model

YANG Qing¹, LIU Zhichao², LI Guoguang², HUANG Kailong^{1,2},
ZHANG Xuxiang², ZHU Donglin²

(1. *Nanjing Jiangdao Institute of Environmental Research Co., Ltd., Nanjing 210019, China;*

2. *State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment,
Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: Accurately simulating the dynamic changes of rainfall-runoff is a prerequisite for precise management of non-point source pollution in rivers. Based on collecting and analyzing data about the sub-basins, confluences, outlets, conduits, sluices, pump stations and operation systems of Jinchuan River, this paper generalized the Jinchuan river system and used SWMM model to establish the hydraulic model of Jinchuan River system. Moreover, based on the model, a rainfall early warning and prediction platform is developed under different rainfall characteristics (frequent light rain and short-term heavy rain). It shows the flow and runoff trends of Jinchuan River Basin, so as to achieve fast simulation and early warning forecasting functions of basin rainfall model.

Key words: urban river; SWMM model; hydrodynamics of river network; rainfall-runoff; early warning and forecasting

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020060); 江苏省重点研发计划项目(BE2020686)

作者简介: 杨庆(1991—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水污染生态治理与水环境评价工作。E-mail: yangqing805@foxmail.

com

金川河水系是南京市鼓楼区的两大水系(秦淮河、金川河)之一,是市区中心地带的重要城市内河,金川河流域水系复杂、排口众多、城区人口稠密。近年来在金川河流域开展了大量水环境整治工作,已取得显著成效,同时,伴随着河长制的落实,金川河水质改善显著。但降雨导致集水区排入金川河的面源污染让治污防污的长效机制举步维艰。为更好地确定金川河面源污染控制方案,模型模拟是一种有效手段。其中对城市河流降水径流时空变化的精准识别是控制城市面源污染的前提。

美国环境保护署开发的暴雨洪水管理模型(SWMM, Storm Water Management Model)是一个动态的降水-径流模拟模型,可进行长期、连续或单一事件的模拟,在雨洪管理领域应用广泛^[1]。其在雨水调蓄设施优化模拟^[2]、极端天气区域雨水径流仿真^[3]、城市河流径流污染控制等研究^[4]中适配性较高。基于SWMM开发金川河降雨-径流模拟模型,计算流域内的城市径流,模拟降雨导致的河网水量动态变化规律,并将该模型作为子模块接入金川河智慧水务管理平台中预警预测板块,旨在为建立河网水动力分析体系,开发城市污染负荷的空间识别技术,构建金川河城市水地图管理技术体系提供方法依据。

1 河网水动力模型构建

1.1 金川河雨洪模拟分析

1.1.1 研究区域概况

金川河流域总长度约为35 km,由内(外)金川河水系、西北护城河及城北护城河水系、玄武湖、鼓楼区下关街道4个不同的河段组成,范围涉及17个子流域,其中惠民河与金川河通过暗涵连接,流域面积约为58 km²。金川河水系主要由建筑区(85%)组成,可以被定性为高度城市化。其中,不透水面积占总面积的15%,包括建筑区、道路和其他不透水表面。代表透水面积的其他类别有草地、林地、花园和裸露的土壤等。

南京的气候是亚热带湿润气候,年平均降水量约为1 000 mm。降水年内分配不均匀,55%的年降水量在7至9月之间,秋季的降水量较夏季明显减少,占年降水量的20%左右,冬季降水量占年降水量的11.7%。

1.1.2 研究方法

基于SWMM 5.2对金川河排水系统进行数值建模,在模型中分别采用Horton方法计算渗透性,采用Hazen-William方程解算管道流量,采用Saint-

Venant方程来解决动态波动问题。模拟中的计算时间步长设置为5s,经过不同计算时间间隔的迭代,给出最稳定的模拟结果。

1.1.3 研究数据

金川河SWMM模型建立需要输入子流域、交汇处、排口、导管、闸门、泵站及运营制度等相关数据。其中子流域主要数据包括降水数据、土地利用、面积、宽度、坡降等;交汇处主要数据包括排水系统高程、最大深度;排口数据主要为高程;导管数据主要包括导管长度和粗糙度;闸门数据主要包括闸门高度和宽度;泵站数据主要包括流量;运营制度主要为金川河道中各闸门排口的调度方案信息。除上述参数外,于金川河河道上布设8个数据采集传感器,采集2022年7月13日至2022年9月15日期间水位数据,收集数据超过50万条,并使用实测数据对模型准确度进行校验分析。

1.2 模型构建

1.2.1 金川河水系区域概化

金川河水系及管网复杂,为提高模型精度,对河网进行了概化处理。在金川河系统的不同部分,总共有22个闸门/围堰、20个泵站来控制流量以及水位。在金川河水系概化中,通过收集的数据以及实地勘察筛选出6个对金川河系统的水位有重大影响的主要闸门和泵站。闸门/围堰筛选标准为(1)不考虑常年开放的闸门;(2)不考虑自由流动的围堰。泵站筛选标准为:(1)不考虑污水泵站;(2)包含引泵站;(3)包含对金川河上游水位影响重大或直接影响泵站。

概化处理结果如图1所示。概化图包含了17个子流域,6个泵站,6个闸口,系统的外部主要边界以及金川河系统内内部运作过程,同时展示了系统的主要边界。虚线为鼓楼行政区的边界,最上方的边界位于紫金山,水先从紫金山排到玄武湖和栖霞,然后排入城北护城河。系统中比较孤立的部分是名为惠民河北段和惠民河南段的河段,这些河段将鼓楼区下关街道的水排入秦淮河和长江。

1.2.2 模型参数设置

模型的参数设置主要包括子流域、导管、泵站、闸门4个模块。其中每个子流域的不透水面积、平均坡度、河段宽度、导管曼宁系数、泵站高程、闸门高度及宽度参数通过实际测量计算及资料数据确定,对于无法实际测量的参数,根据实地情况参考SWMM模型手册及相关文献^[5]确定,参数取值如表1所示。

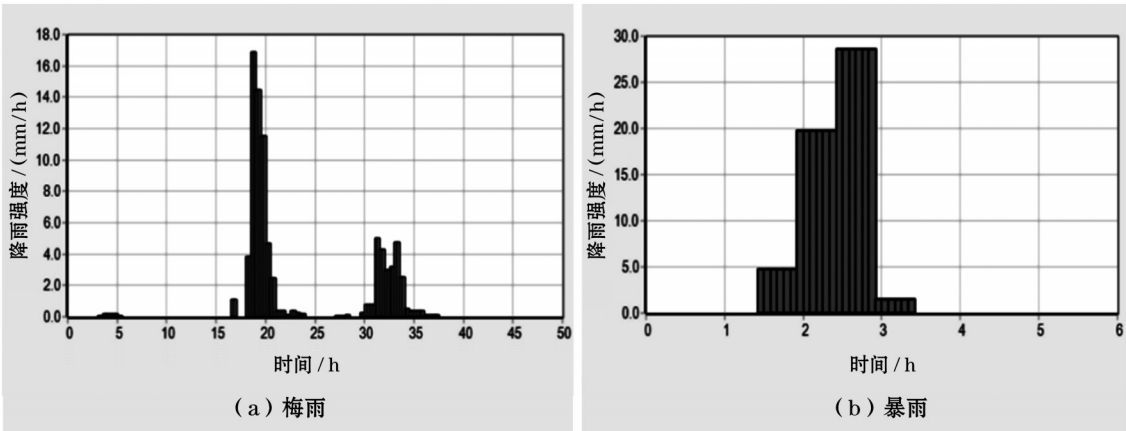


图2 不同降雨事件的模拟情况

表 3 不同工况下降雨事件

时段	总降水量/ mm	降雨体积/ m ³	持续时间/ h	降雨强度/ (mm/h)
2022-07-19T 12:00- 2022-07-21T 12:00	42.31	2 276.050	48	0.88
2022-08-02T 5:00- 2022-08-02T 11:00	27.30	1 468.593	6	4.55

水位数据与实际观测数据差别较小,误差范围在 0.3%~9.9%。吴涛等^[8]采用SWMM 模型模拟湖区水利变化时,通过对模型参数调整后,将流量误差从 200.6%~278.4%降低至 6.9%~10.4%。上述结果表明,通过SWMM 软件构建金川河水系模型,水量预测结果能满足实际使用需求。

2 降雨-径流预警预测平台开发

通过收集金川河系统内的部分水泵、闸门、水系、排水数据,并通过对整个区域进行模型概化后,

表 4 监测点水位模拟值与实测数据对比

日期	监测点位	平均水位/m		误差/%	峰值水位/m		误差/%
		模拟值	观测值		模拟值	观测值	
2022-07-19 至 2022-07-21	宝塔桥	4.440	4.503	2.30	4.532	4.573	0.90
	西北护城河	4.942	4.812	2.70	5.495	5.014	9.60
	小桃园泵站	5.071	4.834	4.90	5.225	5.209	0.30
	玄武湖	5.088	5.459	6.80	5.602	5.481	2.20
	虹桥	4.471	4.823	7.30	5.030	4.931	2.00
	城北护城河	4.755	4.503	5.60	4.795	4.580	4.70
	金川河翻板闸	5.051	5.514	8.40	6.391	5.831	9.60
2022-08-02	南十里长沟主流	5.230	4.957	5.50	5.422	5.321	1.90
	宝塔桥	5.039	5.190	2.90	5.256	5.639	6.80
	西北护城河	4.946	4.966	0.40	5.662	5.166	9.60
	小桃园泵站	4.772	4.570	4.40	5.019	4.600	9.10
	玄武湖	5.141	5.481	6.20	5.404	5.520	2.10
	虹桥	4.971	4.835	2.80	5.108	5.638	9.40
	城北护城河	4.980	4.849	2.70	5.865	5.337	9.90
	金川河翻板闸	5.251	5.707	8.00	5.683	6.020	5.60
	南十里长沟主流	4.601	5.007	8.10	5.439	5.359	1.50

基于SWMM软件构建了地表径流模型,该模型具备对金川河水系径流降雨预测的功能。模型包含了水系内主要河流的信息,部分泵站和闸门的运行规则,以及部分排水管道系统。可模拟流量、径流,并将其作为金川河智慧水务数据平台的预警预测部分的子模块。

2.1 模型推演功能

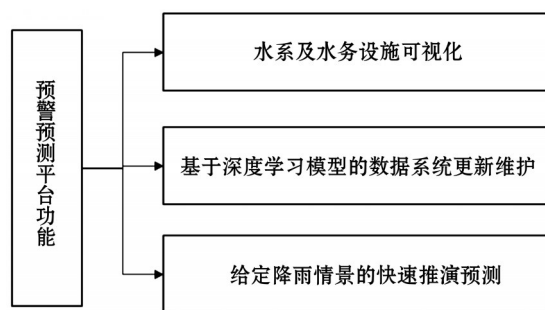
模型推演是预警功能的重要部分。在SWMM模型基础上,由前端JS代码结合Leaflet实现地图可视化和动态播放功能,其余逻辑由后端Python Flask代码实现。通过按需组织模型数据,系统能够实现由后端逻辑响应用户请求,并通过MySQL快速检索响应,将相关时刻的信息返回给前端,由前端制图可视化。鉴于目前研究所用的水动力模型需要的参数过多,也无法在后台实时运行的局限性,平台研发了基于深度学习的替代模型。该模型使用完整流域长时序过程信息为训练数据,实现对1~8 h内,各种降雨条件下,73个空间实体(位置)流量值的预测,以支持管理人员和机构预判可能出现水量问题的关键位置,提前安排和组织开展相关准备工作。

2.2 预警预测平台内容

对不同降雨强度下金川河流量进行预警预测。平台GIS数据以shape文件的形式提供GeoServer发布为标准化Web地图服务,用于地图生成和可视化显示。结合水位监测的实时统计数据,平台自动进行统计、分析、计算。根据季节限定,输入降雨强度,选择目标着色值,系统通过检索历史信息,寻找最接近情景,调取最接近情景下水系模型状态切片,以切片状态为起始,运行替代模型,预测持续降雨后流量状态,并将预测情景可视化并动态播放。

以2个降雨事件推演效果为例,针对少量多次降雨事件与突发暴雨事件进行平台预测,预警预测平台功能模块结构见图3。平台目标预测时间为8 h,共设置1 h、2 h、4 h、6 h、8 h 5个档位,模型预测开始后,即可对金川河河系主流73个空间位置流量进行预测推演,并在平台上进行动态显示,根据不同降雨特征,调取最接近情景下的降雨-径流模型进行预测。

预警预测平台覆盖金川河水系水网,实现了对河流水系的全面预警监测。该平台集成多源数据,采用深度学习算法,可大幅提高暴雨洪水及河道流



量预警的准确性,预警模型快速迭代更新,信息传播迅速,可缩短预警响应时间。预测信息可视化展示,为精准决策提供诸多便利,助力构建绿色低碳、安全高效的防洪治污体系。

3 结 语

通过对金川河系统内的水泵、闸门、水系以及排水数据进行统计筛分,对整个区域进行模型概化后,通过SWMM软件构建立金川河地表径流模型,该模型可模拟不同降雨条件下,金川河道水系水位变化情况,基于该模型结合深度学习算法开发了金川河降雨-径流预警预测平台,实现了对不同降雨条件下金川河水系径流的预警预测,提升了金川河治理的规范化、智能化和精细化水平。平台可模拟不同降水量下的流量、径流变化情况,支撑流域降水的快速推演,以帮助快速制定应急预案,为河长制提供了一个可视化的决策环境和智慧决策系统。

参考文献:

- [1] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4): 1-5.
- [2] 席慕凡,王先锋,黎世苻,等. 基于SWMM模型的城市初期雨水调蓄设施优化设计模拟[J]. 工业用水与废水,2023,54(3):42-46.
- [3] 董毅. 基于SWMM的小区雨水系统极端暴雨模拟分析[J]. 科学技术创新,2023(20):158-161.
- [4] 袁绍春,牟伟,吕波,等. 基于SWMM模型的万州龙宝河片区径流污染控制研究[J]. 环境污染与防治,2023,45(6):765-770,776.
- [5] 杨森雄,卿晓霞,朱韵西. 一种耦合SWMM计算的参数自动率定算法及实现[J]. 给水排水,2021,47(1):148-154.
- [6] 吴涛,孙孝天. SWMM模型原理及其在翡翠湖区域的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2020,30(4): 1-7,23.