

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.024

基于在线水力模型的排水系统能力评估与风险分析

迟文浩^{1,2,3}, 王春虎^{1,2,3}, 顾瑞环^{1,2,3}, 周锡鑫¹, 王晓霞⁴, 郭宁⁵,
蒋晨灿⁵

(1. 青岛水务集团有限公司, 山东 青岛 266071; 2. 青岛市水质保障与水资源开发利用重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛市水质安全与水资源高效利用工程研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 青岛大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071; 5. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200030)

摘要: 以北方某沿海城市中心城区L流域排水系统为研究对象,利用SOBEK建模软件和Delft-FEWS平台,构建了排水管网在线水力模型,采用流域下游污水处理厂进水流量数据进行率定和验证,模型的纳什效率系数为0.225。基于排水管网水力模型设计开发了模型应用系统,对该排水系统能力和运行风险进行评估分析。不同情形下排水管网最大流速和最大充满度模拟结果表明,旱天条件下,部分源头支管和流域中上游干管(占比约为48.27%)最大流速<0.3 m/s,属于易淤积管段;流域中下游少部分源头支管和次级干管最大充满度超过75%,排水负荷较高,应进行清淤除砂。中小降雨条件下,L流域约69.60%的排水管网最大流速>0.6 m/s,流域中上游大量源头支管和次级干管最大充满度超过75%,结合雨水入侵分析可以推断,流域上游和下游沿河道部分区域排水管网存在一定程度的雨水入侵,应开展雨污分流排查治理工作。

关键词: 排水管网; 水力模型; 雨水入侵

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0163-06

Capacity Assessment and Risk Analysis of Drainage System Based on Online Hydraulic Models

CHI Wen-hao^{1,2,3}, WANG Chun-hu^{1,2,3}, GU Rui-huan^{1,2,3}, ZHOU Xi-xin¹,
WANG Xiao-xia⁴, GUO Ning⁵, JIANG Chen-can⁵

(1. Qingdao Water Group Co. Ltd., Qingdao 266071, China; 2. Qingdao Key Laboratory of Water Quality Protection and Water Resources Utilization, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao Engineering Research Center of Water Quality Security and Water Resources Efficient Utilization, Qingdao 266071, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 5. Shanghai Water Conservancy Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: An online hydraulic model of the drainage pipe network in the L basin, located in the central urban area of a northern coastal city, was developed using the SOBEK modeling software integrated with the Delft-FEWS platform. The model was calibrated and validated using influent flow data

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划项目(K20210951)

通信作者: 王春虎 E-mail: 342771448@qq.com

from the downstream wastewater treatment plant. The resulting Nash-Sutcliffe efficiency coefficient was 0.225. A model application system was designed and developed based on the hydraulic model of the drainage pipe network to assess and analyze the capacity and operational risks of the drainage system. The simulation results of the maximum flow velocity and maximum depth ratio in the drainage pipe network under various conditions indicated that 48.27% of the source branch pipes and trunk mains in the middle and upper reaches of L basin exhibited a maximum flow velocity below 0.3 m/s during dry weather, classifying these segments as susceptible to sedimentation. Additionally, the maximum depth ratio of a limited number of source branch pipes and secondary trunk mains in the middle and lower reaches of L basin exceeded 75%, indicating a relatively high drainage load. Therefore, pipeline dredging was recommended for these sections. Under moderate to low rainfall conditions, the maximum flow velocity in 69.60% of the drainage pipe network within the L basin exceeded 0.6 m/s, while the peak depth ratio in numerous source branch pipes and secondary trunk mains located in the mid-to-upper reaches of L basin surpassed 75%. Combined with an analysis of rainwater infiltration, these findings suggested the presence of significant rainwater intrusion into the drainage pipe network in the upstream area as well as the downstream area along the river. Therefore, systematic investigations and remedial measures for rainwater and sewage separation should be implemented.

Key words: drainage pipe network; hydraulic model; rainwater intrusion

随着城镇化进程不断加快,我国城市污水排放量快速增长,再加上气候变化的加剧,城市排水系统普遍面临着管网高水位运行、汛期溢流和内涝等问题^[1-2]。提升排水管网运行效能对于提高污水收集处理效率、黑臭水体综合治理水平和城市韧性至关重要。排水管网水力模型利用新一代信息技术将真实的排水系统和运行情况进行概化模拟,通过圣维南方程组计算管网中污水的液位和流速,可以用于评估现状排水系统能力、预测冒溢风险和辅助优化管网及泵站运行调度方案^[3]。排水管网水力模型属于机理模型,管道管径、高程、拓扑关系和监测流量、液位等多源数据的收集及处理,直接影响模型的精度和应用效果;而既有排水管道破损和雨污混接、错接导致的雨水入侵,进一步增加了准确模拟的难度^[4-5]。另外,传统的排水管网水力模型由于建模软件操作专业性等原因,管理人员难以有效利用其指导排水管网运行维护。

SOBEK是由荷兰Delft水力研究所开发的水环境模拟软件包,分为SOBEK-Rural、SOBEK-Urban、SOBEK-River三个系列,可以用于构建一维管网、二维坡面漫流和实时控制模拟等模型。Delft-FEWS是Deltares(荷兰三角洲研究院)研发的水资源管理开放式平台,用于模型系统内嵌和在线模拟,可以

实现实时监测数据导入、边界条件更新、模拟计算和预报预警发布等功能。笔者以北方某沿海城市典型流域排水系统为研究对象,收集并处理管网地理信息系统(GIS)数据、在线监测流量和液位数据,以及泵站和下游污水处理厂的运行数据,利用SOBEK-Rural构建排水管网水力模型,对模型进行率定、验证;进而将模型内嵌至Delft-FEWS平台,并开发了模型应用系统,对该排水系统能力和运行风险进行评估,以期国内同类项目提供参考。

1 研究区域概况

北方某沿海城市L流域位于中心城区,多年平均降水量为687.5 mm,降水多集中在汛期(6月—9月),约占全年降水量的60%以上。L流域排水系统为雨污分流制,汇水服务面积为143.4 km²。该流域地势整体东北高西南低,入海口处高程最低,市政污水主要依靠重力流入下游污水处理厂,流域下游配套4座合计提升能力为3.35×10³ m³/h的污水提升泵站和1座配有1×10⁴ m³初期雨水调蓄池的排水泵站,下游污水处理厂规模为30×10⁴ m³/d,尾水除用于河道生态补水外均排入胶州湾。该流域基本实现了污水收集和集中处理,但部分老旧城区雨污分流不彻底、管道混接错接,造成局部排水管道淤堵、充满度高,存在汛期冒溢风险。

2 排水管网水力模型构建

排水管网水力模型的构建包括基础资料和数据收集处理以及模型的构建、率定、校核等。本研究的技术路线如图1所示。

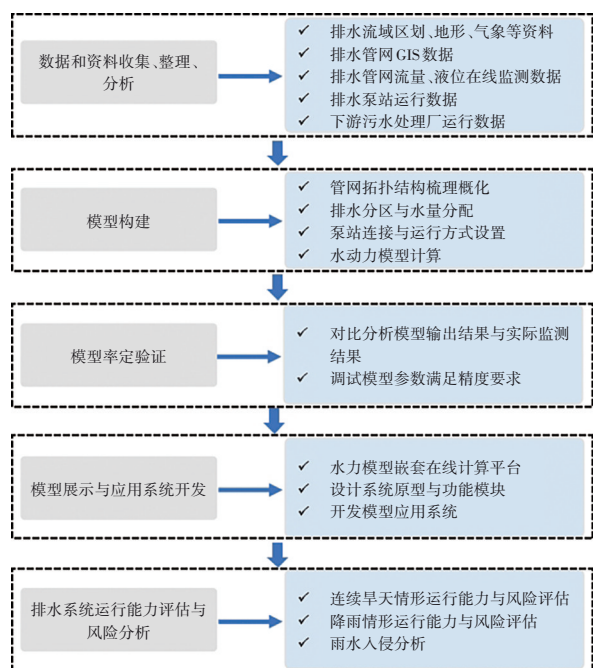


图1 技术路线

Fig.1 Diagram of technical route

2.1 数据收集和处理

2.1.1 排水管网GIS数据

管网GIS数据是水力模型构建的基础,为了提高模型精度,需要保证管道高程、埋深、流向等数据的完整和准确。由于我国城镇化进程较快,排水管网通常随着其他市政设施配套建设,加上管网抢修、改扩建等工程项目工期紧、任务重,排水管网GIS数据质量参差不齐,因此在模型构建前需要对GIS数据进行收集和处理。以L流域市政管网普查GIS导出的shp格式文件作为水力模型的管网输入数据,排水管网总长586.41 km,包括污水管段19 019个、节点19 418个。利用FME空间数据处理软件处理排水管网空间拓扑和属性数据,采用管道上下游连通性分析、管道纵断面分析等手段对GIS数据进行处理,必要时进行现场勘察复核,确保管网拓扑关系、高程等信息准确。对于GIS中少量缺失的管段信息,通过查阅管网施工项目竣工图纸和分析上下游管段连通性,补充相应管段信息,确保数据完整。本研究共修正管道流向2 547处、修正管径242

处、修正高程327处、补充连接管道317处、补充管道节点100处。

2.1.2 运行监测数据

L流域排水管网已安装在线液位监测计6个、流量监测计28个、雨量站6个,收集2021年1月—2022年1月监测数据。对监测数据进行连续性、完整性、合理性分析,剔除污水管网液位和流量数据连续12 h没有波动、明显超出测量范围等异常数据;叠加分析所在区域气象降雨信息,剔除不合理的降雨数据;共筛选出可用的液位数据259 200个、流量数据775 600个、降雨量数据5 800个。

L流域排水系统的4座污水提升泵站和1座初期雨水调蓄泵站均配备上位机,上位机系统接入集水池液位、水泵启停、流量等运行数据,共收集2022年1月—2023年1月泵站运行数据262 800个。通过L流域下游污水处理厂的数据采集与监控系统(SCADA)导出2022年1月—2023年1月进水流量数据35 040个、集水池液位数据17 520个。对污水提升泵站、污水处理厂流量计数据与水泵功率、扬程、启停时间等数据进行复核,数据相关性较好,符合模型构建要求。

2.2 模型建立

利用SOBEK建模软件,根据L流域排水管网主干管、支管、泵站和污水处理厂的连接拓扑关系进行管网概化。采用沃洛诺伊图法对整个排水流域进行概化,共划分为21个服务区,其中污水泵站提升服务片区3个,概化模型见图2。

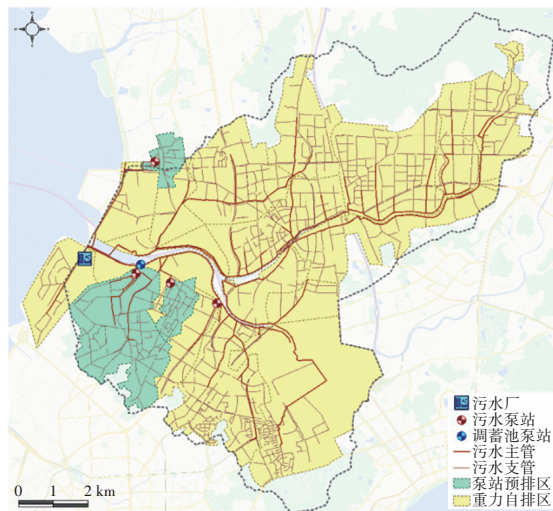


图2 L流域排水服务区划分

Fig.2 Division of L basin drainage service areas

2.3 模型率定和验证

以L流域下游污水处理厂进水流量、污水提升泵站出水流量以及管网关键管段流量和液位作为模型率定指标,对污水水量分配系数、管道糙率、淤积厚度等参数进行率定。采用纳什效率系数(NSE)评价模型精度,NSE值范围为 $-\infty \sim 1$,通常 $NSE > 0$ 说明模型可信度较高,模拟结果与实测值较为接近。以连续旱天情形下L流域下游污水处理厂进水流量作为模型精度验证项,模型输出结果和实测数据的吻合情况如图3所示,NSE为0.225,说明模型精度和可信度较高。为进一步验证模型精度,对比污水处理厂进水流量时变化系数的模型输出结果和实测数据,结果如图4所示,二者变化趋势一致,且具有较高的吻合度。

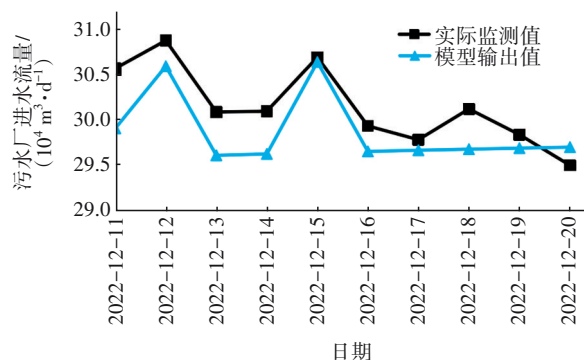


图3 L流域下游污水处理厂进水流量的模型输出结果与实测结果对比

Fig.3 Comparison of model checking results and measured results of inflow rate of downstream wastewater treatment plant in L basin

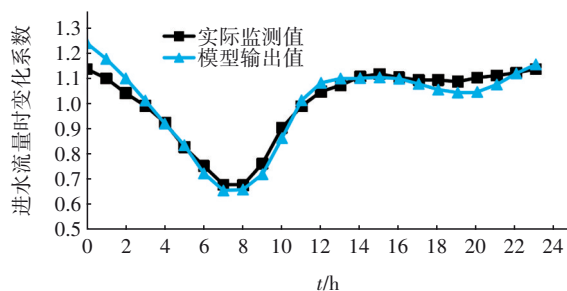


图4 L流域下游污水处理厂进水流量时变化系数的模型输出结果与实测结果对比

Fig.4 Comparison of model checking results and measured results of time-varying coefficient of inflow rate of downstream wastewater treatment plant in L basin

3 模型成果应用

3.1 模型成果展示与应用系统开发

依托开源的PostgreSQL数据库开发模型成果展

示与应用系统,通过L流域物联网平台对气象、管网、污水提升泵站和污水处理厂等实时监测数据进行采集并接入系统监测数据库,将构建的排水管网水力模型内嵌到Delft-FEWS模型在线计算平台,利用实时监测数据进行结果模拟和预报预警,辅助城市排水运行调度决策,具体见图5。

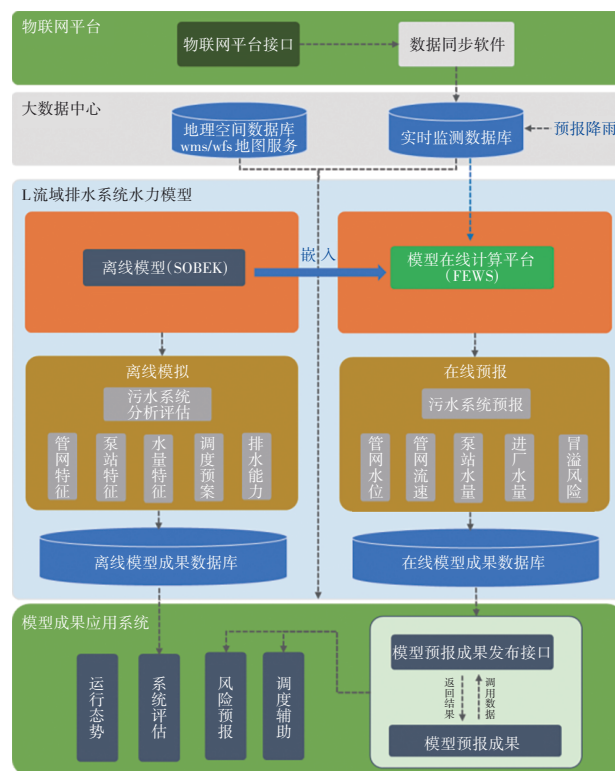


图5 模型成果展示与应用系统总体技术框架

Fig.5 Technical framework of model results presentation and application system

3.2 排水系统能力评估和运行风险分析

3.2.1 连续旱天情形

连续旱天条件下L流域排水管网最大流速模拟结果如图6所示。主干管网最大流速基本超过0.6 m/s,管道长度约为149.54 km,占比约为28.34%,发生淤积的风险较低;部分源头支管和流域中上游干管最大流速 < 0.3 m/s,管道长度约为254.67 km,占比约为48.27%,属于易淤积管段。因此,在日常运行维护中应适当增加源头支管和流域中上游干管清淤除砂作业频次,以保障排水畅通。

连续旱天条件下L流域排水管网最大充满度模拟结果如图7所示。除下游污水处理厂附近主干管网最大充满度较高外,约81.95%的管网最大充满度低于50%,排水负荷较低;中下游部分源头支管

和次级干管最大充满度超过75%,占比约为12.00%,排水负荷较高。结合管网最大流速和最大充满度模拟结果可以看出,中游部分管段流速低且充满度高,应尽快开展清淤除砂作业,在制定管网更新改造计划时可优先考虑更换为大管径管道。

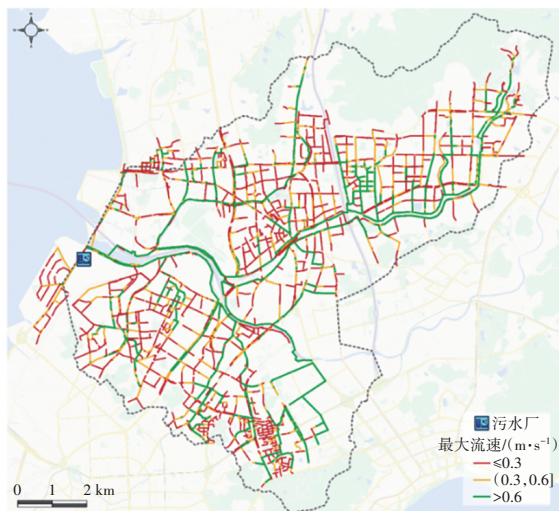


图6 旱天情形下排水管网最大流速模拟结果

Fig.6 Simulation results of maximum velocity of drainage pipe network under dry weather condition

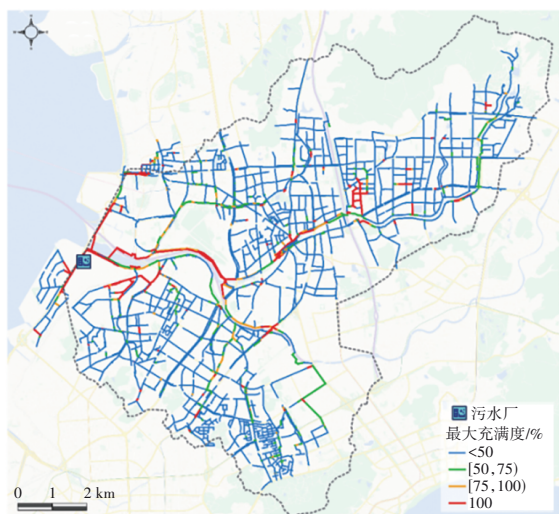


图7 旱天情形下排水管网最大充满度模拟结果

Fig.7 Simulation results of maximum depth ratio of drainage pipe network under dry weather condition

3.2.2 中小降雨情形

中小降雨条件下L流域排水管网最大流速模拟结果如图8所示。管网最大流速基本>0.6 m/s,占比约为69.60%,远高于旱天条件下管网最大流速模拟结果。对比降雨情形和连续旱天情形下管网最大流速模拟结果可以推测出,L流域中上游源头支

管和次级干管可能存在一定程度的雨水入侵,造成降雨情形下管网流速加快。

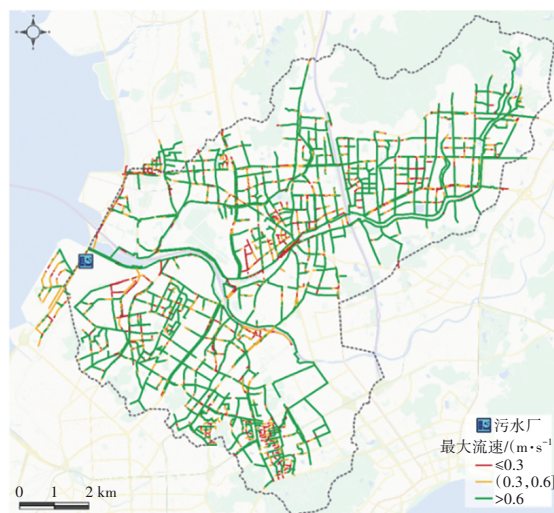


图8 降雨情形下排水管网最大流速模拟结果

Fig.8 Simulation results of maximum velocity of drainage pipe network under rainfall condition

中小降雨条件下L流域排水管网最大充满度模拟结果如图9所示。流域中上游大量源头支管和次级干管最大充满度超过75%,约占35.49%,远高于旱天条件下管网最大充满度模拟结果。对比降雨情形和连续旱天情形下管网最大充满度模拟结果,结合管网最大流速模拟结果,可以推断出,L流域中上游源头支管和次级干管存在一定程度的雨水入侵,造成降雨情形下管网充满度较高,存在一定的冒溢风险。

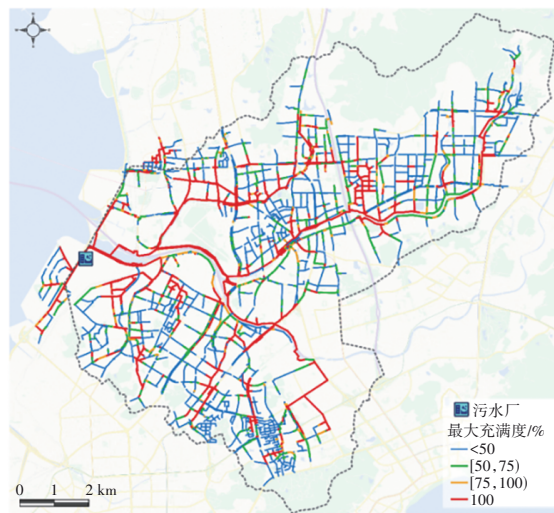


图9 降雨情形下排水管网最大充满度模拟结果

Fig.9 Simulation results of maximum depth ratio of drainage pipe network under rainfall condition

3.2.3 雨水入侵比例分析

L流域排水管网雨水入侵比例模拟结果如图10所示。流域上游和下游沿河道部分区域排水管网雨水入侵比例[计算方法见式(1)]相对较高,推测存在雨污管道混接、错接和污水管道渗漏等问题,一方面应在汛期前加强清淤和下游泵站运行调度,降低管网冒溢风险;另一方面,要开展问题管网集中排查治理,结合实际进行管网更新改造,以实现雨污分流,提升管网排水效能。

$$k = [(Q_r - Q_d) \div Q_d] \times 100\% \quad (1)$$

式中: k 为雨水入侵比例,%; Q_r 、 Q_d 分别为雨天和旱天对应时段的污水流量, m^3/h 。

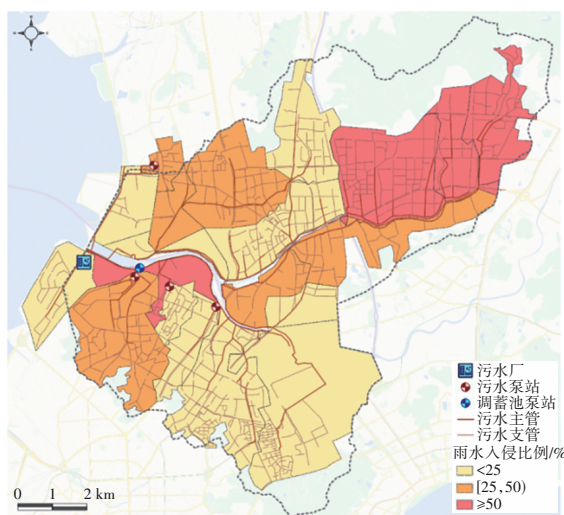


图10 L流域排水管网雨水入侵比例模拟结果

Fig.10 Simulation results of rainwater intrusion ratio in L basin drainage pipe network

4 结论

① 对北方某沿海城市中心城区L流域排水管网GIS、管网流量以及液位监测、排水泵站和下游污水处理厂运行等基础数据进行收集、处理,利用SOBEK软件,建立排水管网在线水力模型,采用下游污水处理厂进水流量和时变化系数验证模型精度,结果显示,纳什效率系数为0.225,模型精度和可信度较高。

② 基于水力模型,设计开发模型成果展示与应用系统,模拟旱天和中小降雨情形下管网最大流速、最大充满度及雨水入侵情况,进行L流域排水系统能力评估和运行风险分析。模拟结果表明,旱天条件下,L流域部分源头支管和中上游干管(占比约

为48.27%)最大流速<0.3 m/s,属于易淤积管段;中下游少部分源头支管和次级干管最大充满度超过75%,排水负荷较高,应进行清淤除砂。中小降雨条件下,L流域约69.60%的排水管网最大流速>0.6 m/s,中上游大量源头支管和次级干管最大充满度超过75%,结合雨水入侵分析可以推断出,流域上游和下游沿河道部分区域排水管网存在一定程度的雨水入侵,应开展雨污分流排查治理工作。

参考文献:

- [1] 李文秋, 张维, 孙永利, 等. 城市排水系统旱季阶段性冒溢成因及对策建议[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 17-22.
- LI Wenqiu, ZHANG Wei, SUN Yongli, *et al.* Causes and countermeasures of periodic overflow of urban drainage system in dry season [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 17-22 (in Chinese).
- [2] 王川涛, 黄丽娇, 王俊佳. 基于MIKE FLOOD模型的老城区内涝防治研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15): 128-132.
- WANG Chuantao, HUANG Lijiao, WANG Junjia. Prevention and control of waterlogging in old urban district based on MIKE FLOOD model [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15): 128-132 (in Chinese).
- [3] 王浩正, 冯宇, 孙文超, 等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 1-10.
- WANG Haozheng, FENG Yu, SUN Wenchao, *et al.* Review of urban drainage system models [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 1-10 (in Chinese).
- [4] GUO X C, ZHAO D Q, DU P F, *et al.* Automatic setting of urban drainage pipe monitoring points based on scenario simulation and fuzzy clustering [J]. Urban Water Journal, 2018, 15(7): 700-712.
- [5] ANNUS I, VASSILJEV A, KÄNDLER N, *et al.* Automatic calibration module for an urban drainage system model [J]. Water, 2021, 13(10): 1419.

作者简介:迟文浩(1987-),男,山东烟台人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水处理新技术、新工艺、新材料、新装备。

E-mail: wenhaonk@163.com

收稿日期: 2024-10-14

修回日期: 2024-11-06

(编辑:刘贵春)