

工程实例

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.015

城镇污水处理提质增效“十步法”研究与应用

吕永鹏^{1,2}

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 上海城市排水系统工程
工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 构建了以水量水质监测和管道检测为基础、污水排水系统模型为支撑的城镇污水处理提质增效“十步法”研究总体框架。开展了某试点城市的案例研究, 确定了2.6 km²的试点区域, 并选择该区域最下游的管网出口节点作为提质增效成效的关键目标节点。基于建立的污水排水系统模拟模型, 开展了7种排水管网整治方案情景的水量水质模拟。结果分析表明, 在对区域内关键管网缺陷和排口修复改造的情景下, 近期关键节点BOD₅浓度可从现状63.57 mg/L提升至大于100 mg/L的目标值。

关键词: 城镇污水处理; 提质增效; 排水系统模型; 管网整治; 管网缺陷; 排口修复及改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)10-0082-07

Research and Application of Ten-step Framework for Improving Municipal Wastewater Treatment Quality and Efficiency

LÜ Yong-peng^{1,2}

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Sewerage System, Shanghai 200092, China)

Abstract: A 10-step research framework for improving municipal wastewater treatment quality and efficiency based on water quantity and quality monitoring and pipeline detection was established and supported by a sewage drainage system model. A pilot area of 2.6 km² in a pilot city was studied and the downstream outlet node of sewage pipe network was selected as the key target node for improving quality and efficiency. Based on the established sewage drainage system model, the simulation analysis of water quantity and quality was carried out for 7 drainage network renovation scenarios. The results showed that the BOD₅ concentration of the critical node will increase from 63.57 mg/L to the target value of over 100 mg/L under the renovation scenarios of key pipe network defects and outlet reconstruction in the region in the near future.

Key words: municipal wastewater treatment; quality and efficiency improvement; drainage system model; drainage network regulation; pipe network defect; drainage outlet reconstruction

2019年4月,住房和城乡建设部、生态环境部和发展改革委印发《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》,提出以生活污水收集处理设施空白区的基本消除和集中收集效能的显著提高为重点手段,来推进黑臭水体基本消除目标的实现,同时提出城市污水处理厂进水 $BOD_5 \geq 100 \text{ mg/L}$ 等具体分项目标。

构建了以本底调查为基础,以现状重点问题为导向,以排水系统模型构建为支撑的城镇污水处理提质增效“十步法”研究总体框架,并以某试点城市为案例开展了实证应用探索。

1 研究方法

构建了城镇污水处理提质增效“十步法”研究总体框架。

第一步,基础资料收集。收集研究区包括社会经济、土地利用、地形地貌、水文气象、污水系统等在内的基础资料,重点分析污水处理厂服务范围、处理规模、进出水浓度、各类污染排放源空间分布、污水输送系统空间分布情况。

第二步,水质本底调查。基于地表水系、污水输送系统分布现状,结合已有管网节点、地表水体的水量水质监测和雨污混接调查结果,以及污水系统运行问题,确定污水系统水质本底调查的监测点位分布、监测指标及监测频率。

第三步,已有管道检测数据梳理。收集并梳理污水管道现有 CCTV、超声等手段的检测数据,系统识别区域管道的结构和功能性缺陷情况,并初步判断提质增效关键问题。

第四步,试点区域确定。在综合考虑污水管网拓扑关系、土地利用类型、基础支撑数据、排水系统近期工程计划的基础上,结合已有的水质本底调查和管道检测成果,确定排水管网整治试点区域。具体遵循6个原则:①基础资料详实可靠;②面积大小适宜;③管网建设较成熟,相对位于污水片区上游,但管径不可过小;④管网拓扑关系具有一定独立性,与其他区域水量水质交互的管网节点较少;⑤管道破损和外水入侵问题突出,提质增效需求迫切;⑥具备管网修复工程实施的便利条件。

第五步,水量水质补充监测。针对试点区的本底加密调查及后续污水排水系统模型构建需求,确定污水管网补充监测点位,开展液位、流量、水质指标监测。

第六步,管道缺陷补充检测。主要基于试点区管网的拓扑关系,结合雨污混接调查、管网水量水质监测等结果,识别可能存在问题的管段,针对其中检测未覆盖或未达检测标准的部分开展管道缺陷的补充检测。

第七步,提质增效重点问题识别。汇总试点区污水系统运行的主要问题,结合管网水量水质监测、管道缺陷检测成果,识别试点区域提质增效的关键影响因子。

第八步,污水排水系统模型构建。针对试点区构建污水排水系统模型,定量分析污水系统管道高水位运行、进水水量来源不明及水质浓度偏低等关键节点运行问题的成因,确定已识别关键影响因子的优先顺序。

第九步,排水管网整治方案。提出污水排水管网整治备选方案,以污水排水系统模型情景模拟分析为主要手段,定量评估以目标管网节点污染物浓度为代表的提质增效目标实现情况,结合成本效益分析最终确定包括管网修复、混接改造、排河口改造等在内的整治工程方案。

第十步,提质增效效果显性化。针对目标管网节点开展新一轮水质监测,对比分析提质增效关键指标完成情况并对效果加以展示。

2 试点城市污水提质增效研究

2.1 基础资料收集梳理

长江中下游某试点城市地跨长江两岸,自然水系发达,面积约 $1\,300 \text{ km}^2$,总人口近 300 万人。该城市某污水处理厂服务范围约为 120 km^2 ,片区为雨污分流制排水系统,污水管网系统大部分已建成,有 5 座污水泵站,存在污水管道常年高水位运行、污水厂进水浓度偏低等典型问题。

收集了区域内污水系统的现状及规划空间分布、污水处理厂、泵站、管网等系统要素运维情况,以及关键节点的流量、液位、COD、氨氮等水质水量指标监测数据,辅以社会经济、土地利用、地形地貌、水文气象等资料。

2.2 水质本底调查

该污水片区共布设 28 个水质调查点开展 COD 和氨氮的监测,点位分布及监测结果分别如图 1 和图 2 所示。监测结果表明,除点位 2、7 和 28 外,其余点位 COD 均低于 300 mg/L ,甚至有 7 个点位低于 100 mg/L ,可见该片区管网提质增效需求迫切。

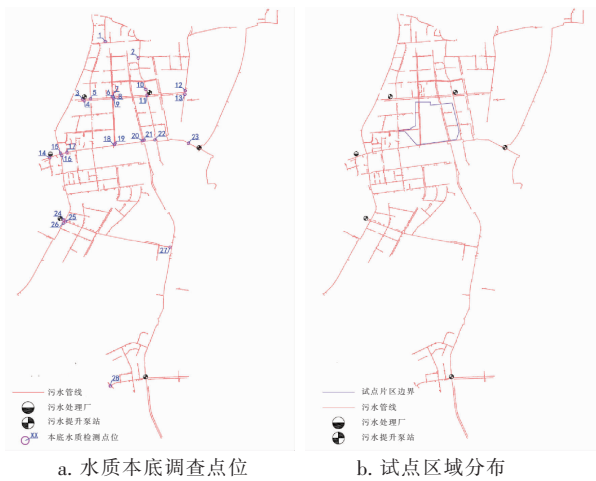


图1 污水片区水质本底调查点位及试点区域分布

Fig.1 Distribution of water quality investigation points and the pilot area in the sewage catchment

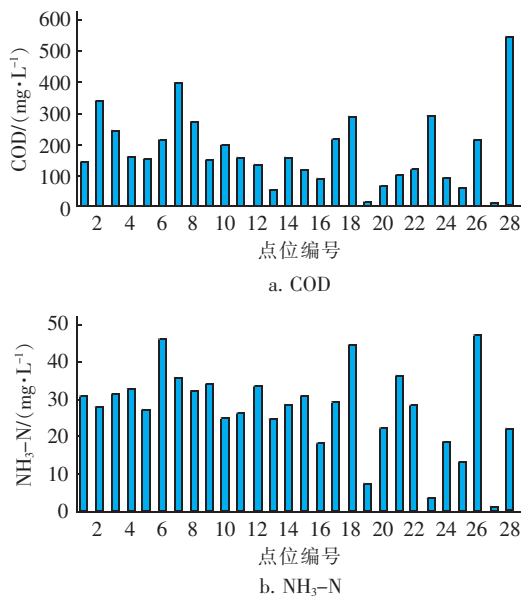


图2 污水片区水质监测结果

Fig.2 Water quality monitoring results in the sewage catchment

2.3 已有管道检测数据梳理

该片区已开展总长为 82.1 km 的污水管道 CCTV 检测,约占片区污水管道总长度的 71%。发现缺陷点 6 340 个,其中结构性缺陷和功能性缺陷分别有 5 389 和 951 个。两类缺陷中达到 4 级(重大)标准和 3 级(严重)标准的缺陷点分别有 485 和 535 个,分别占总缺陷数量的 7.64% 和 8.44%。

2.4 试点区域确定

选取该污水厂服务片区内 2.6 km² 的区域为试

点区,所在位置如图 1(b)所示。试点区内污水管道及用地类型空间分布如图 3 所示,以图 3 中所示最下游出口节点作为提质增效成效检验的目标节点。

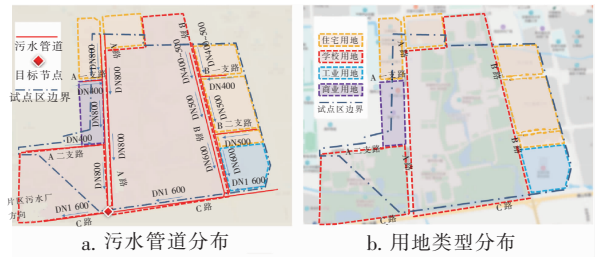


图3 试点区域污水管道及用地类型空间分布

Fig.3 Spatial distribution of sewage pipes and land use types in the pilot area

2.5 水量水质补充监测

为了满足污水排水系统模型构建的需求以及进一步识别试点区域内排水管网整治的重点问题管段,在模型构建范围选择了 9 个点位开展流量监测,同时在试点区内选择了 14 个点位开展 COD 和氨氮浓度监测(见图 4)。

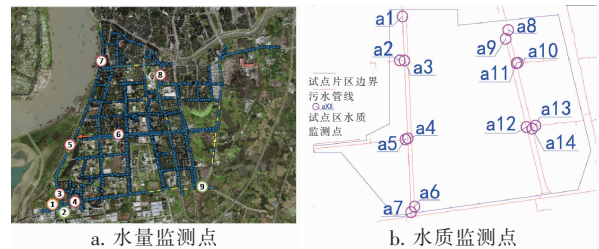


图4 补充监测点位分布

Fig.4 Distribution of supplementary monitoring points

监测结果(见图 5)表明,以 COD 指标为例,除点位 a3 和 a5 以外,其余点位的 COD 监测浓度均低于 300 mg/L,而点位 a4、a8、a10 和 a13 的浓度则小于 100 mg/L。对照管道检测数据发现,点位 a3 至 a4 之间管段存在破裂、脱节、腐蚀、错口、起伏、接口材料脱落等共计 44 处缺陷。结合上游点位监测浓度,管道缺陷导致的外水入侵可能是点位 a4 浓度偏低的原因。a8 点位于 B 路东侧管道起始位置,主要接入小区污水,初步判断小区雨污混接是浓度偏低的主要原因。点位 a10 及点位 a13 所在支路污水管道已有 CCTV 检测结果并未显示问题,但查阅原始检测资料后发现,现有检测结果是在管道内降水未达检测标准下获得,检测结果可靠性较差。因此,试点区域小区雨污混接深入调查、排水管网缺陷补充检测应是下一步工作重点。

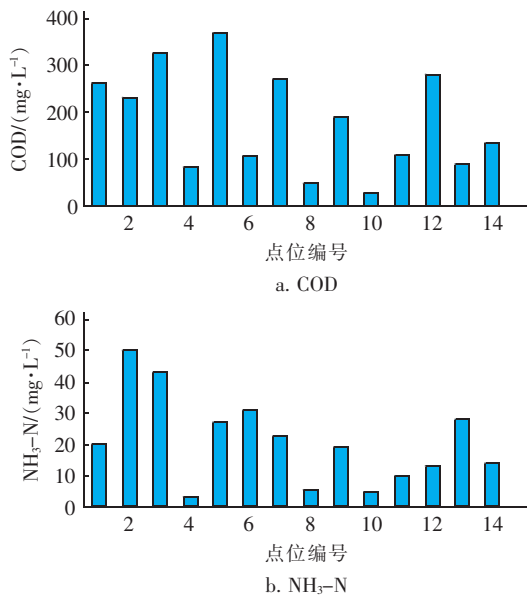


图5 试点区域水质补充监测结果

Fig. 5 Water quality supplementary monitoring results in the pilot area

2.6 管道缺陷补充检测

结合上述水质水量补充监测结果,需进一步对试点区域内的部分管道开展缺陷补充检测。第一类是因砖封、难降水、污染物淤积严重等情况难以开展CCTV检测的管道,下一步需采取去除砖封、清淤等手段以顺利推进检测工作。第二类是对现有资料的梳理过程中发现的检测未达标管道,需重新制定检测计划并加强检测数据的质量校验。

2.7 提质增效重点问题识别

试点区内某路段管网缺陷调查结果见图6,管道内有破损缺陷230余处,多为一、二级缺陷。

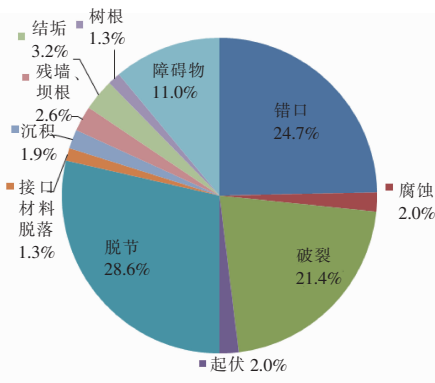


图6 试点区域内某重要路段污水管道缺陷统计

Fig. 6 Statistical chart of defects of sewage pipes in a key road in the pilot area

试点区雨污混接调查(见图7)发现,共有2个

雨水接入污水以及15个污水接入雨水的混接点。识别出的重点问题将作为污水排水系统模型构建的重要输入,同时是排水管网整治方案的重要内容。

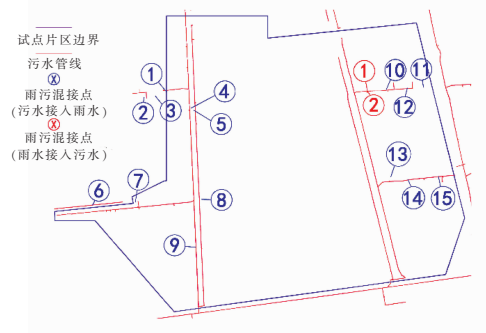


图7 试点区域雨污混接点分布

Fig. 7 Distribution of mixed connection points of rainwater and sewage pipes in the pilot area

2.8 污水排水系统模型构建

2.8.1 模型构建范围及流程

基于污水管网拓扑关系,以该污水处理厂进厂主干管以北区域作为模型构建范围(见图8),总面积24.92 km²。

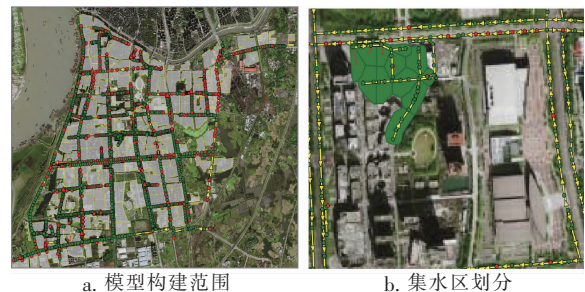


图8 模型构建范围及其内部集水区划分

Fig. 8 Boundary of model construction and the division of sub-catchments

美国环保署开发的EPA-SWMM模型已广泛应用于雨污水系统的现状排水能力评估、规划设计及运行调度方案支撑^[1-4],故选择其用于污水排水系统模型的构建。模型构建分为基础数据整理和模型构建两部分,其中基础数据整理中多采用基于空间数据分析的方法进行基础数据的分析与提取,并对排水系统进行拓扑修正等。

2.8.2 模型概化

① 集水区划分

研究区域集水区的合理划分是排水系统模型模拟可靠性的重要保障。集水区划分最理想的目标是其划分结果符合实际降雨过程中地表径流的产汇流

过程或实际污水排放过程中管网水动力状况,集水区与雨水井或污水井的关联关系能正确表示雨水井或污水井的真实收集范围。

考虑到模型构建范围内存在雨污混接管道,分为污水集水区和雨水集水区。污水集水区主要依据排水户类型进行划分,利用现有的污水管网数据、现状用地类型及地形数据分析各污水入户管的收水范围,依收水范围进行污水集水区的划分。雨水集水区的划分需先确认雨污混接点位,再利用现有的污水管网数据、道路走向及地形等数据分析各混接点位的雨水汇流范围,最后依据分析结果划分雨水集水区。模型构建范围内分别划分了313个污水集水区和95个雨水集水区(见图8)。

② 污水量概化与分配

基于获取的人口及住宅用地分布、人均用水量初步计算生活污水产生量,而学校、工业和商业等其余用地的产生量则依据土地利用类型空间分布和单位面积污水量定额计算。经过区域污水系统设计污水量、实际供水量分布等数据校核后的污水量分布概化结果如图9所示。

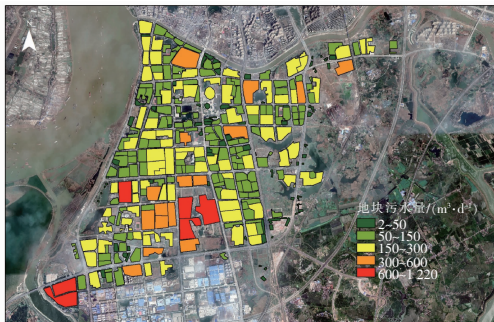


图9 模型构建范围内污水量分布

Fig. 9 Distribution of sewage discharge within the boundary of model construction

③ 混接雨水量计算

经初步分析,模型模拟范围内共有93处市政雨污混接点。混接情况分为两种:第一种是雨水算子接入污水管网系统,这种情况在雨水混入量的估算上要进一步推估该雨水算子的汇水范围,依据汇水范围内道路、绿地、屋面等下垫面类型的面积确定不透水率,进一步模拟该范围内产汇流情形;第二种情况是雨污水管网错接,对污水管道错接进入雨水管道的情况,此次限于研究目标而不考虑,而对雨水管网错接接入污水系统的情形,则要同第一种情况,需

考虑该管网节点的雨水汇入。采用模型构建范围内2019年12月28日—29日实测的降雨量数据作为模型模拟的输入条件(每个降雨时段间隔5 min),如图10所示。

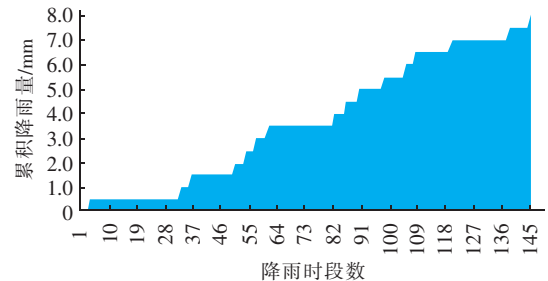


图10 2019年12月28日—29日降雨量分布

Fig. 10 Distribution of precipitation from Dec. 28 to 29 in 2019

2.8.3 模型边界条件设定

污水排水系统模型的边界条件为模拟范围外有外水汇入的点位,这些点位应给定流量、水位等相关数值输入。边界条件点位如图4(a)中的点位2和点位9所示,外部边界主要是主管上的污水泵站,根据各泵站的水量确定模型的边界条件。依据实测资料,将各泵站的水量时间序列输入模型中,作为边界水量进行模型的演算。

2.8.4 模型率定

基于参数灵敏度分析结果,对较高灵敏度的模型参数进行率定,以提高模型模拟结果的可靠性。采用人工与启发式演算相结合的方法进行模型参数的自动率定,点位3的水量模拟与监测结果比对显示(见图11),大致符合率定要求。

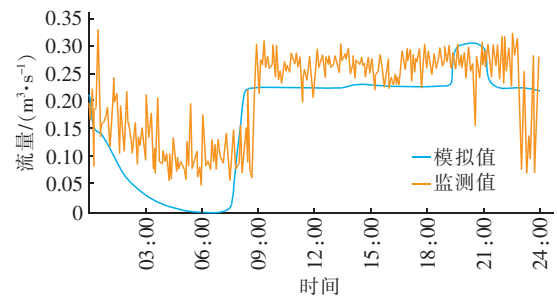


图11 点位3流量模拟结果与监测数据比对

Fig. 11 Comparison between simulation results and monitoring data of flow at point 3

2.9 排水管网整治方案

对试点区的精细化模拟表明,B路西侧及其支路等关键区域问题较大,基于问题导向和目标导向

原则,以污水排水系统模型为手段,结合近期实施计划,提出了 7 种排水管网整治备选方案。需要说明的是,区域内 C 路(污水处理厂主干管)已经纳入整个污水厂服务片区整治方案。

表 1 试点区不同排水管网整治方案下目标节点水量、水质模拟结果

Tab. 1 Simulation results of the target node under different drainage network renovation schemes in the pilot area

现状/方案情景	排水管网整治方案	平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	COD 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
	现状	28 259.61	211.89	63.57
方案 1	A 路西侧及其支路管网缺陷全部修复、排口全部改造	27 215.37	285.69	85.71
方案 2	A 路东侧管网缺陷全部修复、排口全部改造	27 275.73	285.08	85.52
方案 3	B 路西侧管网缺陷全部修复、排口全部改造	23 653.33	327.59	98.28
方案 4	B 路东侧及其支路管网缺陷全部修复、排口全部改造	23 920.76	311.41	93.42
方案 5	A 路及其所有支路管网缺陷全部修复、排口全部改造	26 229.76	295.90	88.77
方案 6	B 路及其所有支路管网缺陷全部修复、排口全部改造	22 697.33	341.09	102.33
方案 7	A 路、B 路及其所有支路管网缺陷全部修复、排口全部改造	20 442.24	371.20	111.36

模拟结果显示,若采用方案 6 或方案 7,试点区域的关键节点将达到 $\text{BOD}_5 \geq 100 \text{ mg/L}$ 的目标。方案 7 情景下的目标节点流量与 COD 模拟结果如图 12 所示。

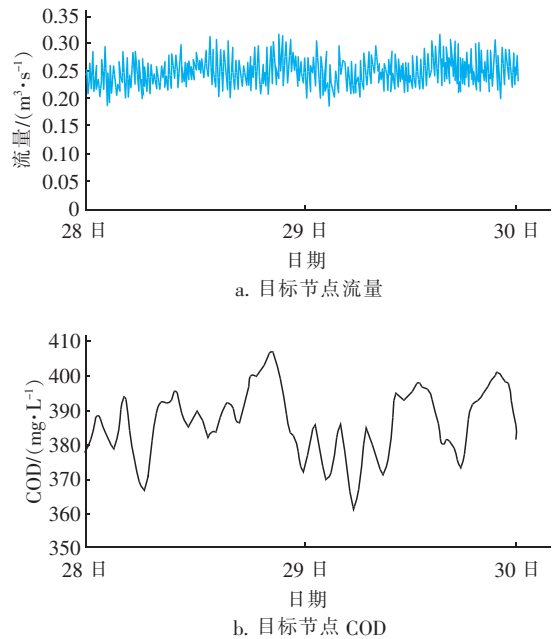


图 12 方案 7 情景下目标节点流量及 COD 模拟结果
Fig. 12 Simulation results of flow and COD concentration at the target node in scenario 7

2.10 提质增效效果显性化

试点区 7 种排水管网整治方案下的目标节点水量水质模拟结果如表 1 所示,其中 BOD_5 浓度基于表征 B/C 值折算,B/C 值取 0.3。

结果表明在 B/C 的假设前提下, BOD_5 平均浓度能达到 111.36 mg/L 。考虑到近期实施的可行性以及成本效益,建议近期先实施方案 3,若不达标,再实施方案 6。

3 结论

构建了以污水排水系统模型为支撑,以水量水质监测和管道检测为主要辅助手段的城镇污水处理提质增效“十步法”研究框架。以某试点城市为案例研究,基于试点城市的水质本底调查和管道检测数据,结合管网拓扑关系、土地利用类型、数据基础和近期工程计划,确定了 2.6 km^2 的排水管网整治试点区域,并选择该试点区域最下游的管网出口节点作为提质增效成效的目标节点。

基于建立的污水排水系统模型,开展了试点区域 7 个排水管网整治方案情景的水量水质模拟分析。结果表明,通过对区域内关键管网缺陷和排口修复改造(而非全部管网整治),关键节点 BOD_5 浓度从现状 63.57 mg/L 近期可提升到大于 100 mg/L 的目标值。

需要说明的是,未针对 BOD_5 开展较为详细的监测和模拟,选取的 B/C 为 0.3 偏保守,实际实施的效果可能更好、见效更快。目前该项目正按照本研究方案快速实施,下一步将结合实施情况开展

BOD₅ 的补充监测并进行回顾性评估,以使得本方法的适用性更强。

致谢:感谢长江生态环保集团有限公司及其安徽区域总部等在数据收集和现场调研方面提供的帮助,感谢东阳、孙云鹏、魏绪刚、陈建、王卫刚等在数据处理等方面提供的支持。

参考文献:

- [1] 何佳,张英,徐晓梅,等. 基于 SWMM 的滇池环湖截污干渠系统运行效能分析[J]. 环境工程,2017,35(5): 25-29,86.
He Jia, Zhang Ying, Xu Xiaomei, *et al.* Analysis of the operation efficiency of interception trunk of Dianchi Lake based on SWMM[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5): 25-29, 86 (in Chinese).
- [2] 王蓉,秦华鹏,赵智杰. 基于 SWMM 模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2015,51(1):141-150.
Wang Rong, Qin Huapeng, Zhao Zhijie. Control studies of peak flow and non-point source pollution for urbanized area based on SWMM[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(1): 141-150 (in Chinese).
- [3] 孙志康,李翠梅,程桂,等. 基于 SWMM 的 LID 组合措施水文水质模拟效果研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(12):109-114.
Sun Zhikang, Li Cuimei, Cheng Gui, *et al.* Research on the effect of LID combined measures on hydrology and

water quality simulation based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12): 109-114 (in Chinese).

- [4] 马箐,沙晓军,徐向阳,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学,2015,33(9):53-57.
Ma Qing, Sha Xiaojun, Xu Xiangyang, *et al.* Control effect simulation of low impact development on non-point source pollution load in urban residential area based on SWMM model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 53-57 (in Chinese).



作者简介:吕永鹏(1982-),男,四川南充人,博士,高级工程师,研究院院长,上海市优秀技术带头人,主要从事流域治理与海绵城市相关研究与规划设计工作。

E-mail: yongpenglv@foxmail.com

收稿日期:2020-03-31

节约用水利在当代,造福人类功盖千秋