

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.017

基于水质水量监测的污水管网评估诊断与定量分析

罗 坤^{1,2}, 孙凌凯^{1,2}, 马方凯^{1,2}, 吴从林^{1,2}

(1. 流域水安全保障湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为快速掌握长江中下游某城市污水系统的运行状况,对中心城区污水处理厂服务范围内8个污水分区进行管网节点的水质水量监测与分析。通过理论污水量与实际监测流量的对比,发现污水处理厂进水量为理论污水量的1.62倍,表明该污水系统存在外水入渗情况。采用化学需氧量和硬度作为水质特征指标,对8个污水分区的旱天外水入渗量进行解析,发现2#和4#污水分区的旱天外水入渗情况最严重,入渗量分别为19 115.36和12 772.25 m³/d。进一步对比各污水分区的旱、雨天流量,分析雨天外水入流情况,发现2#污水分区在17.8 mm降雨量条件下,单位面积降雨入流量达到2 933.34 m³/km²,表明2#污水分区存在严重的雨污混接问题。通过开展基于水质水量监测的污水管网评估诊断,能够实现管网问题的快速定位,确定管网精细排查与缺陷检测目标靶区,提高管网检测效能。

关键词: 污水系统; 管网排查; 水质水量监测; 入流入渗; 评估诊断; 定量分析
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0109-06

Evaluation, Diagnosis and Quantitative Analysis of Sewage Pipe Network Based on Water Quality and Quantity Monitoring

LUO Kun^{1,2}, SUN Ling-kai^{1,2}, MA Fang-kai^{1,2}, WU Cong-lin^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: To quickly assess the operational status of a municipal sewage system in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the water quality and quantity at pipe network nodes in 8 sewage zones within the service area of the central city's wastewater treatment plant (WWTP) were monitored and analyzed. By comparing the theoretical sewage flow with the actual monitoring flow, it was determined that the inflow of the WWTP was 1.62 times the theoretical sewage flow, indicating external water infiltration in the sewage system. Using chemical oxygen demand and hardness as indicators of water quality, the infiltration of external water on dry days was analyzed in 8 sewage zones. It was determined that the infiltration on dry days was most severe in sewage zones 2# and 4#, with flows reaching 19 115.36 m³/d and 12 772.25 m³/d, respectively. Through further comparison of the flows during dry and wet days in each sewage zone, as well as analysis of the inflow of external water on rainy days, it was determined that the rainfall inflow per unit area reached 2 933.34 m³/km² under a rainfall condition of 17.8 mm, indicating a

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究资助项目(2022-LHYJ-02-0302)

通信作者: 罗坤 E-mail: luokun@cjwsjy.com.cn

significant issue of rainwater and sewage mixing in sewage zone 2[#]. Through the evaluation and diagnosis of sewage networks based on water quality and quantity monitoring, rapid identification of network problems, determination of target areas for detailed investigation and defect detection, improvement in network detection efficiency can be achieved.

Key words: sewage system; pipe network inspection; water quality and quantity monitoring; inflow infiltration; evaluation and diagnosis; quantitative analysis

城市排水管网是市政设施的重要组成部分,被称为城市“地下生命线”的半边天^[1]。截至2021年,我国城市排水管道长度已达到 80.3×10^4 km,污水集中处理率达到95.78%,与欧美国家的污水处理率相近^[2]。与此同时,我国城市建成区的管网密度也从1981年的3.17 km/km²提高到11.11 km/km²,呈现逐年增加的趋势^[3-4]。然而,由于长期以来我国在城市污水管网建设和运行管理方面相对落后,管网破损、混错接、外水入渗、淤积等问题普遍存在,一方面降低了排水系统运行效能,使城市污水处理率虚高;另一方面造成污水外渗、溢流,威胁城市水生态环境安全^[2]。据统计,截至2020年底,全国地级及以上城市2 914个黑臭水体的消除比例达到98.2%,但治理后水体返黑返臭问题依然严峻^[5]。

排水管网排查与诊断是实施排水管道修复和改造的前提和关键^[3]。目前,常用的管网排查与诊断方法包括传统检测技术、潜望镜检测技术、声呐检测技术以及管道闭路电视(CCTV)检测技术,不仅检测条件苛刻,需降水排空、清淤疏通等前期准备工作,而且检测成本高、效率低,难以检测混接和错接问题^[6]。因此,面对庞大复杂的城市排水管网,在开展全面检测之前,通过梳理现状管网资料、分析污水处理厂站及管网节点的水质水量、结合现场踏勘等方法对可能存在的问题进行预判,确定管网精细排查与缺陷检测目标靶区,对节约检测成本、实现管网问题的快速定位具有重要意义。现阶段已有研究提出了基于管网节点水质调查确定管道病因的观点,并建立了基于化学质量平衡方程、水质特征因子和蒙特卡洛理论的雨污混接诊断的源解析方法^[7-8],但是如何细化这一技术,实现排水管网问题的快速定位与定量评估,还有待进一步研究。此外,基于水质水量监测的污水管网快速诊断与定量分析技术在降雨充沛、强降雨频现、地下水位高的长江中下游平原地区的实际应用也鲜有研究

报道。

笔者以湖北省A市城区污水管网系统为例,开展基于管网节点水质水量监测的污水系统预诊断技术与工程实践,为进一步的数据监测和管网检测提供目标靶区,也可为国内平原水网区域污水管网的系统排查和评估提供借鉴。

1 研究方法

1.1 排水系统概况

研究区域为湖北省A市中心城区污水处理厂服务范围,面积为74.6 km²,设计规模为 5×10^4 m³/d,排水体制以分流制为主,局部老城区为合流制,共8个污水分区,如图1所示。

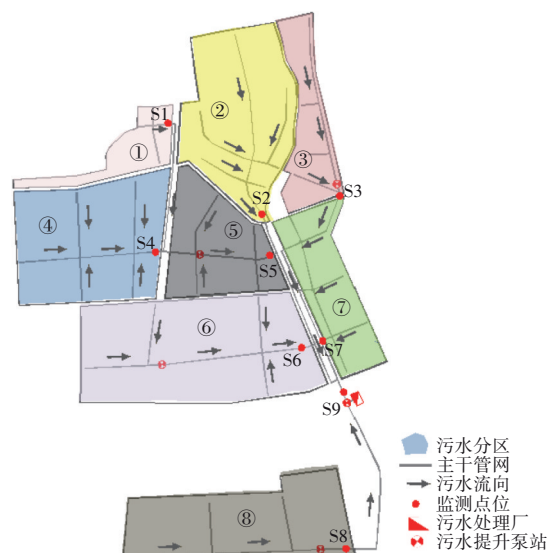


图1 污水分区及监测节点分布

Fig.1 Distribution of sewage zones and monitoring nodes

污水处理厂与城区工业污水处理厂的污水收集系统并未连通,服务范围内以居住小区为主,已建成排水管网长度约250 km,基本覆盖城区市政道路,污水管道管径以DN500~800为主,局部道路主干管为DN1 000~1 200,管道建设年限基本已超过10年,部分老城区管道甚至超过20年。区域多年平

均降水量为 1 124.6 mm,地下水位普遍较高,其中孔隙潜水水位埋深仅为 1.00~1.30 m。

1.2 水质水量监测

为全面分析研究范围内污水管网入流入渗情况,在污水管网源头、过程、末端关键节点布置监测点位,具体布点原则包括:①在各污水分区选择典型分流制小区污水总排放口监测原生污水水质;②各污水分区末端污水主干管网监测水质、流量;③污水处理厂厂前检查井监测水质、流量;④监测污水管网外来水源水质,包括地下水和河水倒灌。共设置 9 个监测节点,其中 S1~S8 为 8 个污水分区末端检查井, S9 为污水厂厂前检查井。

流量监测采用 THWater 在线监测设备,通过传感器、主机与中继器,实现数据的连续监测和实时在线传输,采集监测点位的液位、流速、流量、电导率等,监测时长为 15 d。生活污水水质监测采用人工采样方式,于 2021 年 6 月分别在旱天和雨天各进行了 1 次采样。其中,2021 年 6 月 15 日进行旱天采样,采样时段为 06:00—23:00,每 2 h 采样 1 次,采样前 7 d 无降雨;2021 年 6 月 27 日进行雨天采样,采样时段为上午 10:00 至次日上午 10:00,每 2 h 采样 1 次,期间总降雨量为 17.8 mm,降雨主要集中在 11:00—15:00。通过在该研究区域内钻探一口地下水水质监测井进行地下水采样,采样点位于监测井水位以下 30 cm 处,采样日期为 2021 年 6 月 15 日—22 日,共 7 次。因防汛需要,在旱天监测期间,当地政府提前降低中心城区河道水位,未出现河水倒灌情况,因此本次未监测河水水质。水质监测指标为化学需氧量(COD)和硬度,以其作为表征生活污水和地下水的水质特征因子^[6,8-9]。

1.3 入流入渗分析

1.3.1 理论污水量计算方法

通过对研究范围内各污水分区理论污水量与实际监测流量进行对比,能够初步判断各污水分区是否存在外水入流入渗。其中,理论污水量的计算如下式所示:

$$Q_t = \sum_{i=1}^n (Q_i \times R_i) \quad (1)$$

式中: Q_t 为各污水分区范围内各排水户的累积理论污水量, m^3/d ; Q_i 为第 i 个排水户的用水量, m^3/d ; R_i 为第 i 个排水户的污水排放系数,其中居住小区及商业、办公等公共建筑的污水排放系数可取

0.85~0.95,企业根据实际情况取污水排放系数,可获取污水排放量数据的直接按污水排放量计算。

本研究通过收集 A 市城区 2021 年公共建筑和小区的年用水量,以及污水管网上下游关系,计算各污水分区末端监测点位的理论污水量。

1.3.2 旱季外水入渗分析

以采样前连续 7 d 无降雨日的在线流量监测数据作为有效数据,识别旱天流量变化规律。在掌握区域总体外来水来源后,结合排水系统水质特征因子化学质量和水量平衡关系,利用物料守恒法计算各污水分区旱天管网外来水入渗率 $R_{\text{旱天}}$ ^[10],如下式所示:

$$Q_d \times C_d = Q_t \times C_t + Q_w \times C_w \quad (2)$$

$$Q_d = Q_t + Q_w \quad (3)$$

$$R_{\text{旱天}} = \frac{Q_w}{Q_d} \quad (4)$$

式中: Q_d 为各污水分区末端旱季监测流量, m^3/d ; Q_t 为各污水分区实际收集的理论污水量, m^3/d ; Q_w 为外水入渗流量, m^3/d ; C_d 为各污水分区末端旱季水质浓度, mg/L ; C_t 为原生污水水质浓度, mg/L ; C_w 为各污水分区外水水质浓度, mg/L 。

1.3.3 雨季外水入流分析

降雨和流量数据是分析污水管网系统入流入渗量的基础^[11]。在旱季流量稳定的条件下,雨水入流量主要根据关键断面的流量监测结果,通过同时段旱、雨天流量数据的对比,得到降雨期间 R 时刻导致的入流量(RDII)和整场降雨入流总量 RDII_{Tot} ,进而诊断各个子汇水区域内雨水入网问题,其计算如下式所示:

$$\text{RDII} = Q_{\text{RWF}} - Q_{\text{DWF}} \quad (5)$$

$$\text{RDII}_{\text{Tot}} = 60t \sum_{k=1}^k \text{RDII} \quad (6)$$

式中: Q_{RWF} 为降雨期间监测到的污水流量, m^3/s ; Q_{DWF} 为已识别的旱天污水流量, m^3/s ; t 为流量在线监测数据收集的时间间隔, min 。

2 结果与分析

2.1 理论污水量对比分析

根据各污水分区用水量和综合生活污水排放系数计算得到理论污水量,并通过与各污水分区末端实际监测水量的比较,对排水系统进行诊断分析。当排水系数取 0.9 时, A 市城区 2021 年各污水

分区理论污水量与实际监测水量的关系如表 1 和图 2 所示。

表 1 各污水分区监测点的理论污水量和实际监测水量
Tab.1 Theoretical sewage discharge and monitoring flow of each sewage zone $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

项 目	日用水量	上游分区日用水量	理论污水量	实际监测水量	备注
1 [#]	1 939.54	—	1 745.58	1 408	—
2 [#]	7 520.62	—	6 768.56	28 731	—
3 [#]	4 539.85	—	4 085.87	2 413	—
4 [#]	3 569.73	—	3 212.75	15 416	—
5 [#]	7 610.14	5 509.26	11 807.46	19 878	1 [#] 、4 [#] 汇入
6 [#]	3 027.13	—	2 724.40	2 418	—
7 [#]	3 472.72	4 539.85	7 211.32	8 493	3 [#] 汇入
8 [#]	2 252.14	—	2 026.93	1 111	—
污水处理厂	33 931.87	—	30 538.68	49 426	—

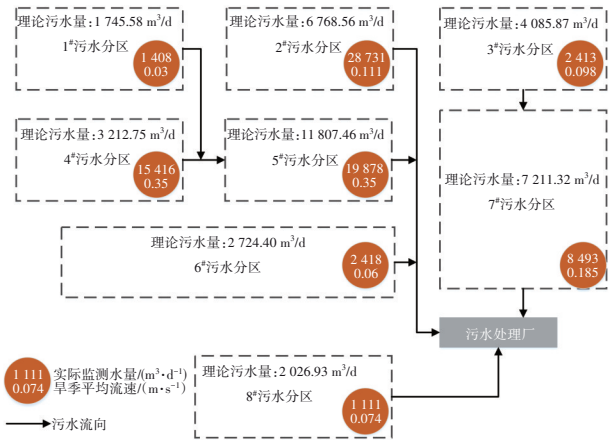


图 2 各污水分区理论污水量与拓扑关系
Fig.2 Theoretical sewage discharge and topological relationship of each sewage zone

由图 2 可知,该污水处理厂服务范围内理论污水量约为 30 538 m^3/d ,实测污水量为 49 426 m^3/d ,为理论污水量的 1.62 倍,表明该污水处理厂服务范围内存在外水入渗情况。进一步对各污水分区内理论污水量与实测污水量进行分析,2[#]、4[#]污水分区实际监测流量值超过理论流量 2 倍以上,表明这两个污水分区外水入渗情况严重。其中,2[#]污水分区污水主管下穿 A 市南门湖公园,湖水与地下水入渗可能是外水的主要来源,后期需对湖底污水干管进行重点排查;4[#]污水分区内分布大量断头的沟渠,河水可能通过破损管道渗入污水系统,建议对沟渠沿线污水管道进行重点排查;另一方面,1[#]、3[#]、6[#]和 8[#]污

水分区的实际监测流量值均小于理论污水流量,表明污水分区内大量污水并未纳管进入污水处理厂,需要进行重点排查,进一步完善分区内污水收集系统。

2.2 旱季外水入渗分析

由研究区域内生活污水、地下水的水质浓度监测结果可知,各污水分区生活污水 COD 变化较大,最大值为 335 mg/L ,最小值为 108 mg/L ,均值为 247 mg/L ;硬度变化范围为 134~198 mg/L ,均值为 158 mg/L 。地下水 COD 浓度较低,最大值为 7.2 mg/L ,最小值为 5.4 mg/L ,均值为 6 mg/L ;硬度变化范围为 355~421 mg/L ,均值为 372 mg/L 。

以生活污水和地下水 COD、硬度均值计算,各污水分区污水管网系统中地下水入渗量和入渗率见表 2。2[#]和 4[#]污水分区旱季外水入渗情况最严重,入渗量分别为 19 115.36 和 12 772.25 m^3/d ,应尽快开展管道检测与修复。1[#]、3[#]、6[#]、8[#]污水分区监测流量小于理论污水量,但监测点 COD 浓度均较低,一方面存在部分临河小区生活污水直排入河或混接入雨水管道的情况,导致大量污水并未进入污水收集系统,另一方面外水入渗进一步降低管道内污水浓度。

表 2 各污水分区旱天外水入渗率
Tab.2 Infiltration rate of external water in dry days of each sewage zone

项 目	监测点流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	上游分区 汇入流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	监测点水质均 值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		入渗量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	入渗 率/%
			COD	硬度		
1 [#]	1 408	—	63.33	224	438.97	31.18
2 [#]	28 731	—	76.67	300	19 115.36	66.53
3 [#]	2 413	—	124.67	266	1 224.86	50.76
4 [#]	15 416	—	47.33	335	12 772.25	82.85
5 [#]	19 878	16 824	52.00	318	2 285.60	74.84
6 [#]	2 418	—	108.00	275	1 328.93	54.96
7 [#]	8 493	2 413	61.67	305	4 190.94	68.90
8 [#]	1 111	—	76.67	313	806.74	72.61
污水处 理厂	49 426	—	63.60	320	37 613.65	76.10

该污水处理厂旱季日均进厂流量约为 49 426 m^3/d ,进水 COD 均值为 63.60 mg/L ,根据物料守恒法计算得出该污水处理厂进水中外水入渗量为 37 613.65 m^3/d ,实际污水收集处理量仅为 11 813.23 m^3/d ,外水入渗量占旱天日均流量的

76.10%。根据2.1节中理论流量计算结果,该污水处理厂理论污水量为 $30\,538.68\text{ m}^3/\text{d}$,计算得到该污水处理厂收集率仅为38.68%,与湖北省《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》提出的“截至2021年,城市生活污水集中收集率力争达到70%”的目标要求相去甚远,亟需开展服务范围内排水管网整治工作。

2.3 雨季外水入流分析

通过对旱天流量持续15 d的监测,识别典型旱天流量的变化规律,在此基础上,结合2021年6月27日降雨期间的流量监测数据,得到各污水分区RDII曲线,如图3所示。

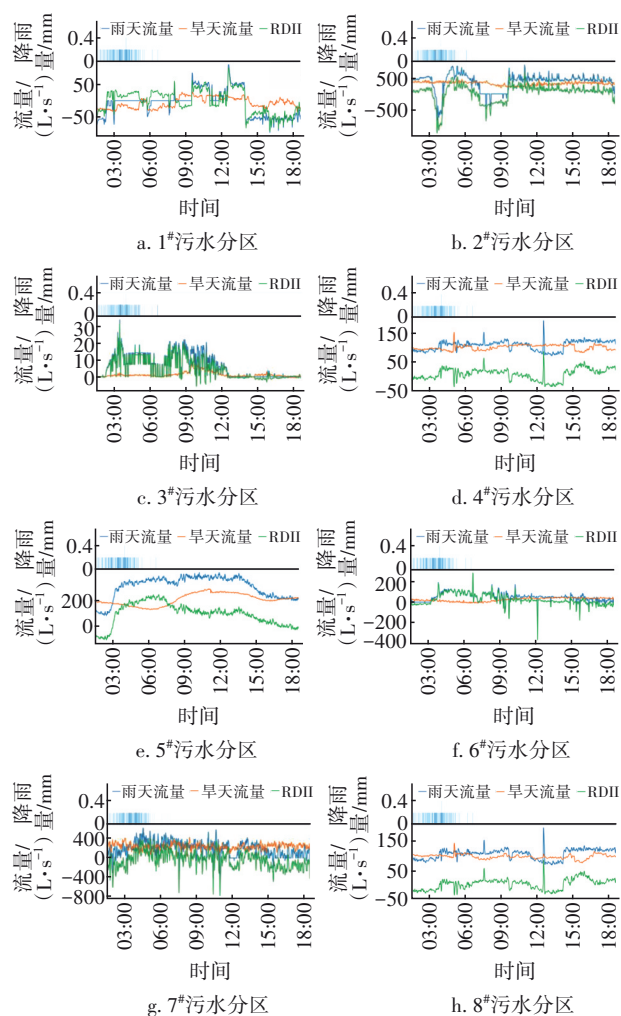


图3 各污水分区降雨RDII曲线

Fig.3 RDII curves of each sewage zone

各污水分区17.8 mm降雨期间的RDII值见表3。可知,2#污水分区降雨入流现象最严重,在17.8 mm降雨量条件下,单位面积降雨入流量达到 $2\,933.34\text{ m}^3/\text{km}^2$,表明2#污水分区内存在严重的雨

污混接问题,降雨期间存在大量雨水进入污水管网的情况。同时,1#、4#、5#、7#污水分区单位面积降雨入流量较大,也存在较严重的雨污混接问题,应重点开展管网混错接调查。

表3 各污水分区17.8 mm降雨期间RDII_{Tot}值

Tab.3 RDII_{Tot} values of each sewage zone during

17.8 mm rainfall

项 目	汇水面积/ km ²	RDII _{Tot} /m ³	单位面积RDII/(m ³ · km ⁻²)
1#	1.84	860.76	467.80
2#	2.63	7 714.69	2 933.34
3#	7.77	274.68	35.35
4#	1.86	774.92	416.62
5#	11.35	6 380.27	562.14
6#	13.89	1 969.36	141.78
7#	7.17	3 022.95	421.61
8#	8.94	309.16	34.58

3 结论

针对长江中下游平原地区某市中心城区污水系统入流渗入问题,开展了基于管网节点水质水量监测的预诊断分析。通过计算各污水分区的理论污水量,并与相应污水分区末端实际监测水量比较,初步判断了各污水分区是否存在外水入渗或污水外渗。采用COD和硬度作为水质特征指标,对各污水分区旱季地下水入渗量进行了解析,进一步明确了外水入渗严重的区域。通过对各污水分区旱、雨天流量进行对比分析,计算单位面积RDII值,进一步聚焦管网混错接严重区域,为下一步指导管网检测提供了依据。

参考文献:

- [1] 王金丽,孙永利,郑兴灿,等. 城市绿色排水系统内涵与规划评价技术研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 16-23.
WANG Jinli, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, et al. Study on the connotation and planning evaluation technology of urban green drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16): 16-23 (in Chinese).
- [2] 徐祖信,徐晋,金伟,等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. 给水排水, 2019, 45(3): 1-5, 77.
XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, et al. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering,

- 2019, 45(3): 1-5, 77 (in Chinese).
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴—2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook-2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).
- [4] 邓玉莲. 城市排水管网状态和运行效能评估方法的研究与应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- DENG Yulian. Research and Application of Evaluation Method for State and Operation Efficiency of Urban Drainage Network [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021 (in Chinese).
- [5] 李永新, 王威, 何妹, 等. 基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2257-2263.
- LI Yongxin, WANG Wei, HE Mei, *et al.* Mechanism of urban black odorous water based on continuous monitoring: a case study of the Erkeng Stream in Nanning [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2257-2263 (in Chinese).
- [6] 刘战广, 谭学军, 陈嫣, 等. 基于水量分析和节点监测的城镇污水管网评估诊断[J]. 中国给水排水, 2021, 37(17): 32-37.
- LIU Zhanguang, TAN Xuejun, CHEN Yan, *et al.* Evaluation and diagnosis of urban sewage pipe network based on water flow analysis and node monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(17): 32-37 (in Chinese).
- [7] 刘战广, 谭学军, 陈嫣. 基于水量平衡分析的城镇污水管网定性诊断研究[J]. 给水排水, 2020, 46(9): 113-118.
- LIU Zhanguang, TAN Xuejun, CHEN Yan. Qualitative diagnosis of urban sewage network based on water balance analysis [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9): 113-118 (in Chinese).
- [8] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙. 基于水质特征因子和 Monte Carlo 理论的雨水管网混接诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1715-1721.
- XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based maker species approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1715-1721 (in Chinese).
- [9] 徐祖信, 王诗婧, 尹海龙, 等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 384-390.
- XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 384-390 (in Chinese).
- [10] 冯杭华, 陈海涛, 施翔, 等. 外来水量诊断法在污水管网预诊断中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 62-69.
- FENG Hanghua, CHEN Haitao, SHI Xiang, *et al.* Application of extraneous water quantity diagnosis method in pre-diagnosis of sewer network system [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 62-69 (in Chinese).
- [11] 朱婉宁, 李萌, 张旭东, 等. 基于短期在线监测的污水管网降雨入流入渗分析[J]. 给水排水, 2021, 47(7): 117-122.
- ZHU Wanning, LI Meng, ZHANG Xudong, *et al.* RDII analysis of sewer system based on short-term online monitoring [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(7): 117-122 (in Chinese).

作者简介: 罗坤(1990-), 男, 湖北天门人, 博士, 高级工程师, 主要从事污水处理提质增效与流域水环境治理与保护工作。

E-mail: luokun@cjwsjy.com.cn

收稿日期: 2022-12-13

修回日期: 2023-03-02

(编辑: 沈靖怡)