

在线监测在污水管网混接溯源中的应用分析

——以江西某县中心城区为例

宫志杰

上海威派格智慧水务股份有限公司, 上海

收稿日期: 2025年6月6日; 录用日期: 2025年7月8日; 发布日期: 2025年7月22日

摘要

为实现对市政污水管网精细化体检省时省力的目的, 采用在线监测技术, 对管网关键节点进行水位、流量、化学需氧量(COD)监测, 通过数据分析, 了解管网入流入渗状况, 为管网混接溯源提供依据。分析结果显示: 水位、流量、COD均能表征管网入流入渗状况; 水位监测在项目实际应用中效果更佳。

关键词

污水管网, 在线监测, 流量检测仪, 水位计, COD检测仪

Application Analysis of Online Monitoring in Tracing Illegal Connections in Sewage Pipe Networks

—Taking the Central Urban Area of a Certain County in Jiangxi Province as an Example

Zhijie Gong

Shanghai Weipaige Smart Water Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 6th, 2025; accepted: Jul. 8th, 2025; published: Jul. 22nd, 2025

Abstract

To achieve efficient and labor-saving refined inspection of municipal sewage pipe networks, online monitoring technology was employed to measure key parameters (water level, flow rate, and chemical

oxygen demand (COD)) at critical pipeline nodes. Data analysis was conducted to assess inflow and infiltration (I/I) conditions, providing a basis for tracing cross-connections in the network. The results demonstrated that water level, flow rate, and COD can all characterize I/I conditions, with water level monitoring proving more effective in practical applications.

Keywords

Sewage Pipe Network, Online Monitoring, Flow Meter, Water Level Gauge, COD Analyzer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,为补齐城镇污水管网短板,加强管网建设全过程质量管控,国家先后颁布了《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》《城镇排水与污水处理条例》《污水排入城镇下水道水质标准》以及《城镇污水排入排水管网许可管理办法》等相关条例。2022年6月江西省为响应国家政策要求,住建厅、生态环境厅和发展改革委联合发布《江西省城镇生活污水处理提质增效攻坚行动方案(2022~2025年)》。行动方案重点任务之一是加快推进管网问题排查整治,对市政污水管网开展精细化体检,找出管网内部结构性缺陷和功能性缺陷,科学实施污水管网低浓度、低效能的问题诊断,强化重大问题区段和病害点位的系统识别,精准排查污水收集管网清水入渗入流,明确入渗入流类型、水量、水质特征、潜在影响及治理或清退途径。

市面上管网体检常用的方式之一为管道CCTV检测,是采用先进的CCTV管道内窥电视检测系统,在管道内自动爬行,对管道内的锈层、结垢腐蚀、穿孔、裂纹等状况进行探测和摄像,同时记录管道内的状况,从而将地下隐蔽管线变为在电脑上可见的内部录像,方便管理部门根据管道状况做出最合理的管道处理方案,依据检测技术规程再进行评估,为制定修复方案提供重要依据。但是CCTV检测存在一定的局限性,如检测成本高;检测周期长;对检测环境要求高,检测前需要排干管道内的污水;管道内径不小于200mm等,所以在实际管网精细化体检中,难以大规模应用。需要与其他溯源手段配合,在有限资金的情况下,发挥最大的功效。

针对城市市政排水管网溯源的技术方法已经有较多的研究报道,常见的溯源技术包括物理排查法、特征因子法及水纹识别法等[1]。其中物理排查法是指通过对排放口、市政排水管线及小区排水管等进行摸排,实现排放口溯源的方法。采用该方法溯源时,通常首先需要入河排污口进行监测,确定重点区域后,再采用管网普查技术进行针对性监测。特征因子法通过采用不同市政污水来源的特征因子,结合流量图法或化学质量平衡法定性、定量判定各污染物的来源及污水组成比例,以此来确定管网的非法连接等问题[2]。水纹识别法是指借助水样的三维荧光光谱与水样有机成分一一对应原理,进行追踪溯源。

赵东泉、黄林等通过在线监测方式,对污水厂纳污范围内的污水管网排水监测数据进行分析,定量识别由于降雨引起的污水管网入流入渗问题,为管网修复改造决策提供数据依据[3][4]。本文通过对江西省某县城区管网关键节点水位、流量、COD监测,结合降雨数据进行分析,确定污水管网混接严重区域,为后续管网改造提供数据支撑。并且通过相关性分析,确定最优监测指标,减少管网在线监测设备费用投入。

2. 研究区域概况

基于现状污水系统,中心城区分为三大污水排水分区:城北片区-新区污水处理厂、城中片区-生

活污水处理厂及城南片区 - 工业园污水处理厂，见图 1。

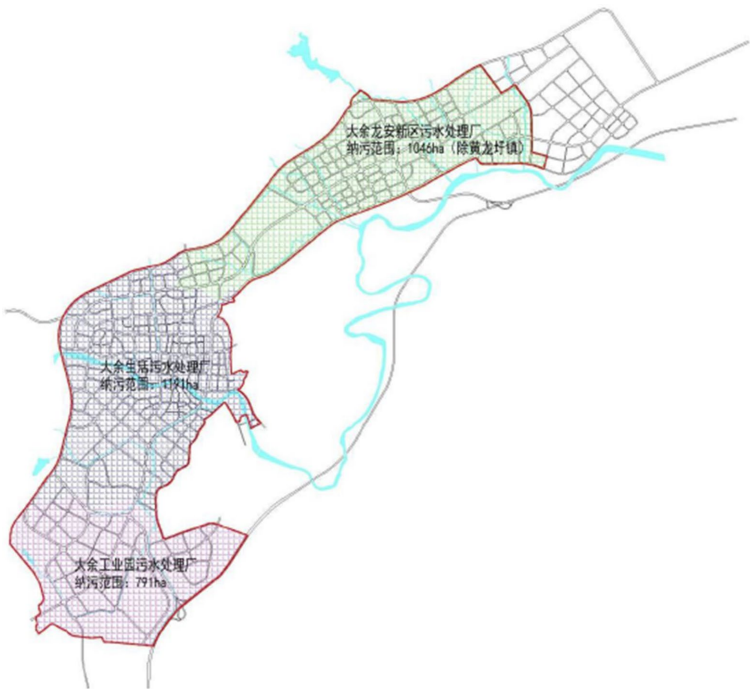


Figure 1. Sewage system zoning diagram
图 1. 污水分区图

本次项目范围主要聚焦在城中片区，基于现状管网普查、调研及相关施工竣工图资料，梳理出城中片区主要道路市政管网建设情况汇总表如下表 1：

Table 1. Summary of municipal sewer networks in major roads of central urban district
表 1. 城中片区主要道路市政管网汇总表

序号	道路名称	污水管	
		管径(mm)	长度(m)
1	伯坚大道	DN300~DN1000	15,717
2	北门河路	DN300~DN600	3869
3	金莲山大道	DN400	2036
4	中山路	DN300~DN800	3422
5	南安大道	DN400~DN600	672

3. 整体方案设计

为达到管网混接溯源的目的，在充分调研现状管网的条件下，对管网混接区域进行预判，并参照《城镇排水管网在线监测技术规程》(T/CECS 869-2021)及《城镇排水系统厂、站、网一体化运行监测与智能化管理技术规程》(T/ACEF 030-2022)进行监测指标的选择和监测点位的确认。通过数据分析，评估监测区域内管网混接情况，为后续管网普查提供依据。具体方案设计路径如下图 2 所示：

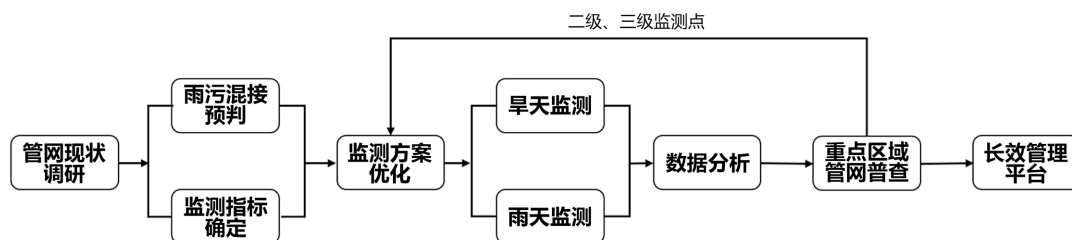


Figure 2. Technical workflow of the proposed monitoring scheme

图 2. 方案设计路径

根据管网拓扑关系，将城中片区划分为 9 个片区，如图 3 所示。在每个片区管网末端关键节点安装在线监测设备，监测指标选择水位、流量、COD。为保证监测数据的时效性，COD 采用紫外光谱法进行快速监测。具体分区和检测点位如下图所示：

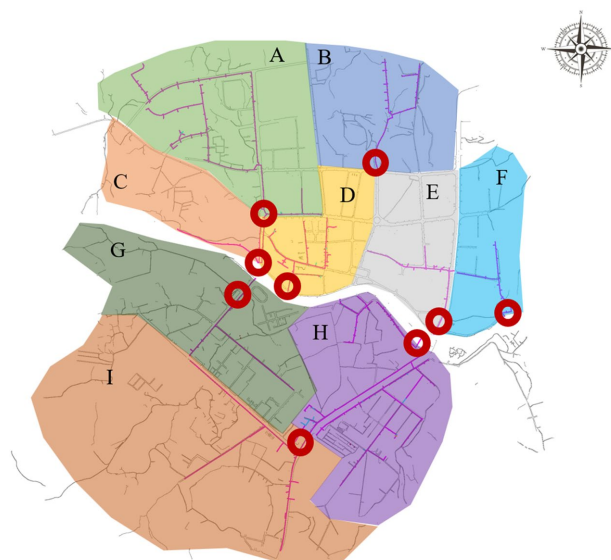


Figure 3. Zoned layout map

图 3. 分区布点图

4. 监测数据分析

4.1. 分区雨水入流入渗分析

根据朱婉宁、李萌、杨婷婷等[5]的研究结果表明，污水管网入流入渗与流量数据具有较大的相关性。取各片区流量数据结合降雨数据进行深入分析，分析过程中，要求雨量数据有明显的变化。通过连续三个月监测，在 2024 年 11 月 15 日出现了小雨、中雨、大雨天气，本次拟选择 11 月 15 日一天的监测数据进行分析。各监测点位流量随降雨量的变化曲线如下图所示：

由图 4 可知，片区 E 监测点位流量变化幅度最大，在 9:00 流量达到峰值，为 $0.353 \text{ m}^3/\text{s}$ ；片区 G 监测点位流量变化幅度次之，在 9:00 流量达到峰值，为 $0.280 \text{ m}^3/\text{s}$ ；片区 B 监测点位流量变化幅度最小，在 11:00 流量达到峰值，为 $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ 。对各点位流量与降雨量进行相关性分析，片区 A、C、E、G 监测点位流量数值随降雨量显著变化，片区 B、D、I 监测点位流量数值与降雨量数据相关性较低。对各点位流量与降雨量进行相关性分析，结果如下表 2 所示：

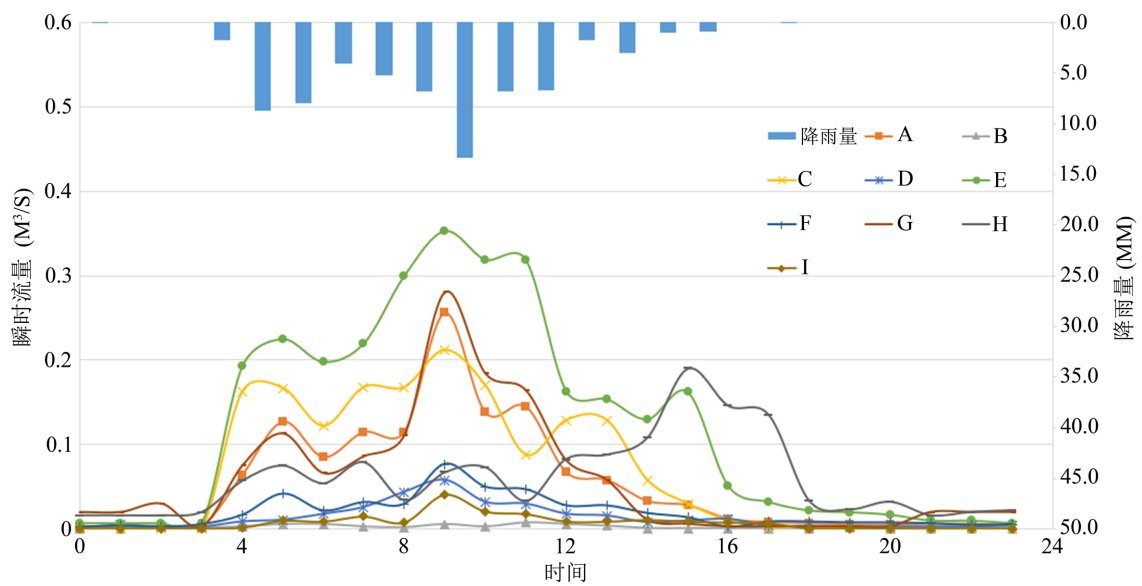


Figure 4. Flow rate curves at each monitoring point
图 4. 各点位流量曲线

Table 2. Correlation analysis between flow rates and rainfall at monitoring points
表 2. 各监测点位流量与降雨量相关分析表

点位	与降雨量的相关系数(r)	相关性
A	0.85	高相关性
B	0.15	低相关性
C	0.82	高相关性
D	0.25	低相关性
E	0.88	高相关性
F	0.65	中相关性
G	0.79	高相关性
H	0.55	中相关性
I	0.4	低相关性

分区 A、C、E、G 监测点位的流量数据与降雨量具有较高的相关性，说明片区污水管网混接严重。片区 B、D、I 监测点位的流量数据与降雨量相关性较低，说明管网混接问题较少，无明显的雨水入侵、入流入渗问题。

4.2. 管道 CCTV 检测验证

对全区主干管网进行 CCTV 检测，结果如表 3 所示，城区管网由于建设年限久远，均存在管网缺陷，其中分区 A、C、E、G 单位管长缺陷数量 45 处以上，问题严重；分区 B、D 单位管长缺陷数量 10 处以下，缺陷问题较轻。

经过与分区入流入渗分析结果对比，CCTV 检测管网缺陷程度与各区域雨水入流入渗分析结果高度吻合，分区监测点位的流量数据能够较好的表征分区入流入渗的程度。

Table 3. CCTV inspection results by subcatchment
表 3. 分区 CCTV 监测结果统计表

分区	检测管网长度(KM)	缺陷数量(处)	单位管长缺陷数量(处/KM)
A	4.16	236	57
B	1.64	2	1
C	1.06	51	48
D	1.62	7	4
E	1.23	73	59
F	9.10	328	36
G	1.50	77	51
H	4.12	99	24
I	2.11	27	13

4.3. 其他监测指标分析

项目实际应用过程中发现，污水管网流量检测仪价格较高，安装难度大，对安装条件要求苛刻，且后期运维工作量大，难以大规模应用。基于流量检测仪的各种限制，在同一点位配套安装雷达水位计、COD 检测仪，探究其他监测指标对入流入渗分析的可替代性。

由分区入流入渗分析结果可知，分区 E 监测点位的流量数据与降雨量数据相关性较高，本次分析以分区 E 监测点位的数据为主。

1) 水位数据分析

分区 E 监测点位的水位数据随时间的变化规律如下图 5 所示，随降雨量增加，管网内水位逐渐升高，在 9 点达到最高点。通过相关性分析，水位与降雨量的相关系数 R^2 为 0.855，两者存在高度线性关系，将两者进行线性拟合，得到拟合曲线公式为 $y = 0.0282x + 0.1516$ ，即每增加 1 mm 降雨，管网内水位升高 0.1798 m，拟合曲线如下图 6 所示。

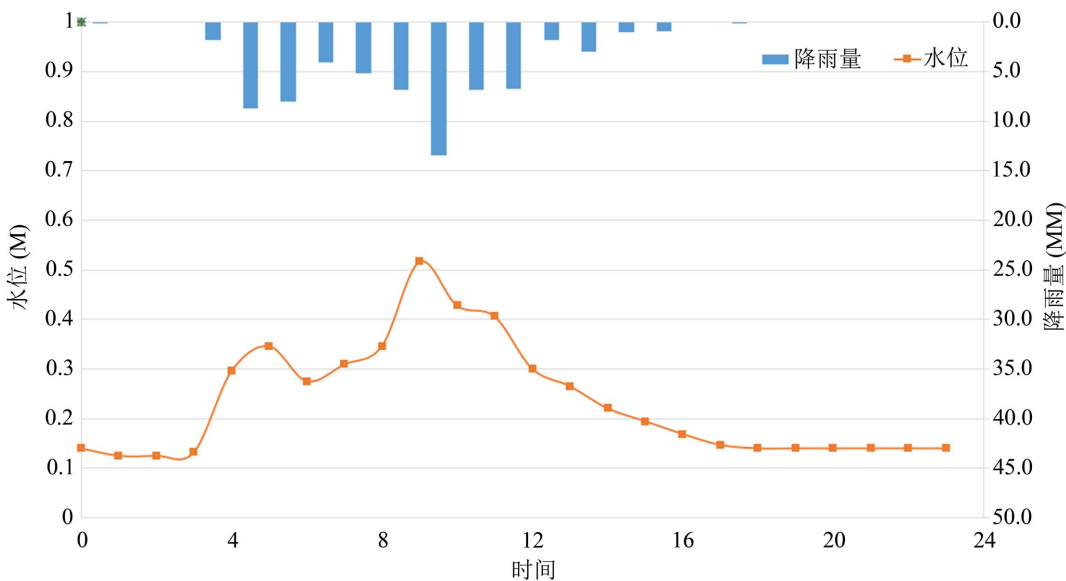


Figure 5. Sewer water level fluctuations at monitoring point E
图 5. 分区 E 监测点位管网水位变化曲线

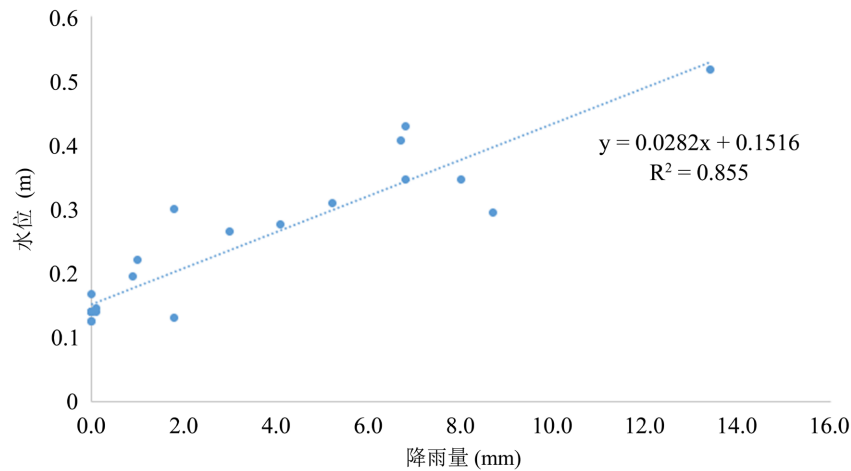


Figure 6. Fitting curve between rainfall and sewer water level at monitoring point E
图 6. 分区 E 监测点位降雨量与管网水位拟合曲线

2) COD 数据分析

分区 E 监测点位 COD 浓度值随降雨量变化的曲线如下图 7 所示。COD 浓度随降雨量的增加逐渐降低，在 6:00 降到最低 17.3 mg/L，降雨中后期 COD 一直处于较低水平，雨后逐渐恢复降雨之前的水平。经过分析，降雨过程中，雨水流入污水管网，稀释管网中的污水，造成 COD 逐渐降低，并在降雨中后期保持在较低水平；降雨后，污水管网中的雨水逐渐减少，造成污水浓度逐渐升高，COD 缓慢升高。这与苏伟健在城镇污水 COD 浓度及其在排水管网中变化规律研究中的结论一致[6]。

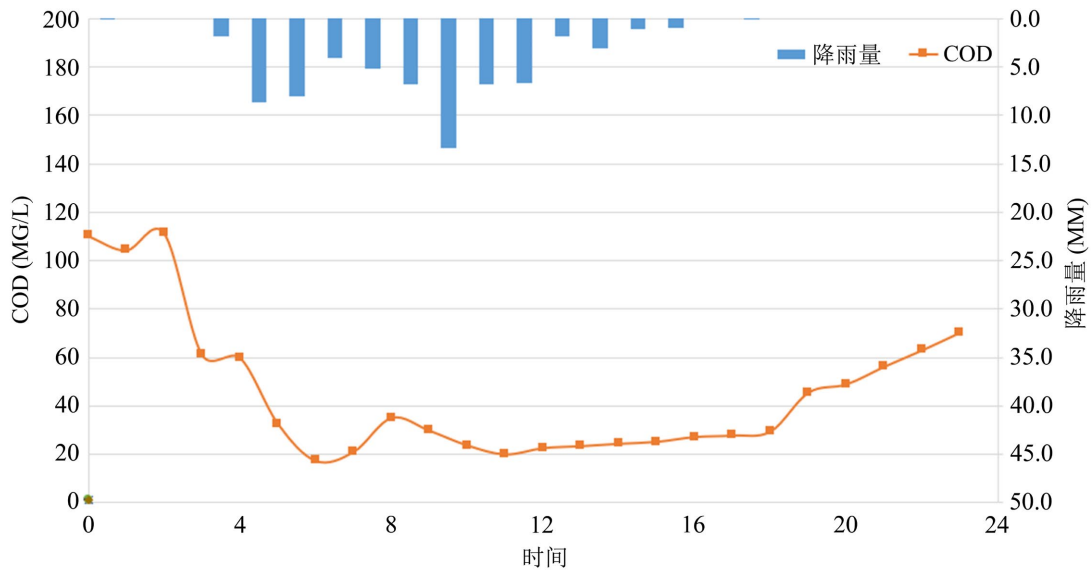


Figure 7. COD variation in sewer system at monitoring point E
图 7. 分区 E 监测点位管网 COD 变化曲线

综上，降雨期间，污水管网内的流量、水位、COD 监测指标与降雨量存在一定的相关性，考虑到设备成本、安装便捷程度、监测数据的稳定性以及后期运维的便利性等，选择水位表征污水管网的入流入渗程度，从而实现管网溯源，实用性强，性价比高。

4.4. 管网入流入渗机理分析

1) 基于流量、水位的流体力学分析

结合 Darcy-Weisbach 方程和曼宁公式, 建立管网入流入渗的理论模型:

$$\text{流量 } Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

式中:

Q 为流量(m^3/s)

n 为管道粗糙系数(混凝土管取 0.013~0.015)

A 为过水断面面积(m^2)

R 为水力半径(m)

S 为水力坡度

当雨季污水管网发生入流入渗时, 导致过水断面 A 增大, 对应管网流量 Q 异常增加, 与图 4 管网流量随降雨量增加而增加相吻合。

2) 基于 COD 的污染物稀释模型

结合污水管网入流入渗现状, 采用瞬时完全混合模型:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt} + \left(\frac{q_r \cdot C_r}{Q + q_r} \right) \cdot (1 - e^{-kt})$$

式中:

$C(t)$ 为 t 时刻 COD 浓度(mg/L)

C_0 为初始 COD 浓度(mg/L)

k 为 COD 降解速率常数(h^{-1})

q_r 为雨水入流流量(m^3/s)

C_r 为雨水 COD 背景值(mg/L)

Q 为污水原流量(m^3/s)

由模型公式可知, 在管网污水量一定的情况下, 管网雨水入流入渗量越大, $C(t)$ 值越小, 与图 7 管网 COD 值随降雨量的增加而降低相符。

5. 讨论

朱婉宁、黄林等基于在线监测技术对管网入流入渗分析过程中, 主要依托于流量数据, 但是在实际应用过程中, 污水管网流量检测仪存在较多缺陷。

- 1) 受监测条件影响, 监测数据准确度低, 可参考性差;
- 2) 设备价格高, 在 20,000 元以上(包含探头、电池、数据传输模块等);
- 3) 安装困难, 需要深入管网内部;
- 4) 运维成本高, 污水管网内垃圾较多, 需要 2~3 周清理一次;

基于多年的工程经验, 流量在线监测的基础上, 配套水位、COD 监测指标, 探究在管网入流入渗分析过程中的可替代性。通过上述分析, 水位在线监测数据能够替代流量数据, 较好的表征管网入流入渗程度。管网在线监测中水位计有如下优势。

- 1) 能够适应污水管网中复杂环境, 监测数据准确度高;
- 2) 设备价格低, 单套价格 3000 元以下(包含探头、电池、数据传输模块等);

- 3) 安装简单, 不需要下井作业;
- 4) 运维成本低, 运维方式简单, 运维周期为 1 个月;

在本研究中, 提出了污水管网内单位水位与降雨量的关系, 即每增加 1 mm 降雨, 管网内水位升高 0.1798 m, 比单纯流量变化更具普适性。在现实生活中, 监管部门更加担心由于降雨导致污水冒溢的情况发生, 一旦发生污水管网冒溢, 将对周边居民生活造成极大的不便。

但是, 本次研究也存在部分不足, 如未考虑管径对监测参数的影响; 监测时间分辨率局限。在后续研究过程中, 逐步探讨建立不同管径的修正系数库; 减少监测时间间隔, 由原来的 1 h 缩减到 15 min, 进一步探究监测指标与降雨量的关系。

6. 结论

城区污水管网复杂且庞大, 通过全面的 CCTV 监测, 不仅费用投入巨大而且费时费力。通过在划分的 9 个片区关键节点安装在线监测设备, 对监测数据进行分析, 得出如下结论:

1) 通过对 9 个片区监测点位的流量数据分析, 片区 A、C、E、G 流量数值随降雨量显著变化, 片区污水管网入流严重, 与 CCTV 检测结果相符。

2) 水位与降雨量的相关系数 R^2 为 0.855, 两者存在高度线性关系。通过管网水位状况可表征片区管网入流状况。

3) COD 与降雨量存在一定的相关性, 浓度随降雨量的增加逐渐降低, 在 6:00 降到最低 17.3 mg/L, 降雨中后期 COD 一直处于较低水平, 雨后逐渐恢复降雨之前的水平。

4) 污水管网内的流量、水位、COD 指标皆可表征管网入流状况, 考虑到设备成本、安装便捷程度、监测数据的稳定性以及后期运维的便利性等, 项目实际应用过程中推荐监测管网内水位状况。

参考文献

- [1] 季晓楠. 城市市政排水管网污染物溯源技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1153-1161.
- [2] 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, 1727.
- [3] 黄林, 胡茂峰, 吴志炎, 等. 基于水量水质监测进行分区分析的城市排水管网入流问题[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 108-114.
- [4] 赵东泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8): 11-14.
- [5] 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分析[J]. 给水排水, 2021, 47(7): 117-122.
- [6] 苏伟健. 城镇污水 COD 浓度及其在排水管网中变化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2010: 37-38.