



南方某镇污水管网问题高效排查与关键管段精准定位

路程^{1,2}, 赵萌¹, 刘锐^{2,✉}

1. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650000; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006

摘要 针对污水管网问题排查效率低、成本高的难题, 该研究以南方某镇作为对象, 运用多维度数据分析并结合量化计算的方法, 揭示了其集水区域存在的污染物收集不力以及外水入侵问题, 并精确定位了污水外渗的关键管段。结果表明, 该镇雨季和旱季污水排放质量浓度差异显著, 2022—2023 年全镇污水化学需氧量年均质量浓度均低于太湖流域污水厂进水平均质量浓度, 其中 8—9 月质量浓度极低。镇内 3 个主泵站 (P1~P3) 液位与降雨量正相关, 降雨量超 5.0 mm 时, 各泵站前池液位显著上升; 超 20.0 mm 时, 各泵站前池液位达到峰值, 导致污水处理厂负担加重并可能引发污水溢流。此外, P1 与 P2 间管段污水收集率严重不足, 氨氮、总氮和总磷收集率均低于 20%; P2 与 P3 间管段严重外水入侵。经针对性节点溯源监测, 成功定位污水外渗发生在 X2-2 至 X2-1 管段, 外水入侵点位在 X3-3 附近。本研究通过挖掘泵站运行数据, 实现了低成本、高效率的管网问题诊断, 为污水管网智能化、精细化管理提供了科学依据。

关键词 污水管网; 泵站; 污水收集率; 外水入侵; 智能化管理

随着我国城镇化进程的加速和人口数量的增长, 污水管网在城乡基础设施体系中的重要性愈发显著^[1]。其运行状态不仅关系到水环境的改善和居民生活质量的提升, 还深刻影响着经济社会的可持续发展。然而, 在污水管网的建设与运维中, 多种复杂因素相互交织, 导致雨污管网错接混接、老化破损、沉积淤堵以及外水流入渗入等问题频发^[2]。这些问题不仅严重阻碍了污水的有效收集与高效处理, 还极易引发污水外溢, 甚至可能导致有害物质泄露, 对生态环境和公众健康构成威胁^[3]。因此, 如何经济高效地排查出主要管网问题并精确定位其所在的空间区域, 已成为全面提升污水管网系统效能的关键^[4-5]。

当前, 污水管网排查诊断中常用的技术手段包括声纳检测、潜望镜检测 (pipe quick view inspection, QV) 以及管道闭路电视检测 (closed circuit television, CCTV) 等^[6-7]。然而, 鉴于城乡污水管网的隐蔽性和结构复杂性, 全面依赖这些技术进行排查将耗费大量人力与物力资源, 导致成本显著增加^[8]。近年来, 管网监测技术的进步有效提高了管网问题的诊断效率。徐祖信等^[9]提出了一种基于管网节点水质和水量平衡方程的雨污混接诊断方法, 该方法通过分析节点的流量及水质数据, 能够精确识别雨污管网中的混接问题区域, 为后续的管网改造和优化提供了理论依据。朱婉宁等^[10]运用短期在线监测技术, 在降雨时段实时采集管网节点的流量与水质数据, 对外水流入渗入现象进行了深入的量化分析, 揭示了其时空分布规律, 为管网设计的优化提供了强有力的技术支撑。尽管如此, 上述分析方法均主要依赖管网节点安装连续监测设备。考虑到我国污水管网系统普遍缺乏此类设备, 且大规模安装成本高昂, 不利于日常监测工作的开展, 因此, 充分利用污水泵站的日常运行信息 (如输送流量、泵前液位等), 对管网问题进行快速诊断与精确定位显得尤为重要。

基于泵站运行数据的诊断方法已展现出显著优势, 但当前研究仍主要依赖末端泵站的水质-水量平衡方程构建评估模型^[11-12], 其局限性体现在 2 个方面: 1) 分析维度通常局限于单一的水质、水量。缺乏对泵站多维运行参数 (液位动态响应、水质时间变化等) 方面的深度探索^[11]; 2) 缺乏对泵站群上下游拓扑关系空间变

收稿日期: 2025-02-06 录用日期: 2025-05-21

基金项目: 浙江省省属科研院所扶持专项; 浙江清华长三角研究院自主研发立项 (2023ZQZ005)

第一作者: 路程 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为市政工程, 614232271@qq.com

✉通信作者: 刘锐 (1973—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为水污染防治, 1393612924@qq.com

化的运行参数的空间变化分析。针对上述问题,本研究通过对泵站运行数据(水质、水量、液位)进行深入剖析,统计水质的时空变化规律,揭示不同降雨强度与泵站液位之间的关联,并整合区域内各泵站的上下游水量关系,再结合部分管段的水质水量监测数据,旨在实现对研究区域的系统性诊断。

本研究以南方某镇为例,通过收集并分析泵站的水量、水质、液位等多维度数据,结合污水收集率及外水量的量化计算,揭示了集水区域内污染物收集不力以及外水入侵等的主要问题,并锁定了污水外渗关键管段。随后,采取针对性的节点溯源监测措施,逐一排查流量及水质异常的节点,进一步缩小了潜在问题管段的范围。这一方法不仅有效降低了排查成本,还极大提升了诊断效率,为后续管网提质增效提供了参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为我国南方的一个平原河网区小镇,镇区总面积为 76.1 km²,其中水面面积占比 5.6%,河网密布。该镇地势低洼,地坪标高 2.0~3.0 m,地下水位较高,主要补给来源为河道渗透。此外,该区域属于亚热带季风湿润气候,年降雨量约 1 250 mm,降雨集中在 4—9 月,降雨量占全年总量的 70% 以上。

在排水系统方面,该镇采用了分流制排水系统,污水管网总长达 68.4 km,其中一级管网直径 500~800 mm,二级管网直径 300~400 mm。全镇的污水转输工作由 3 座一级泵站共同承担:最北端的 P1 泵站,设计处理能力为 8 000 m³·d⁻¹,主要负责接收镇北工业园区的出水,以及镇北和镇中心区域 5 个小区内约 0.9×10⁴ 常住人口的生活污水;P2 泵站,设计处理能力为 10 000 m³·d⁻¹,主要接纳镇中部区域 2 个社区内约 2.6×10⁴ 常住人口的生活污水,并接收来自上游 P1 泵站的转运污水;P3 泵站,设计处理能力为 10 000 m³·d⁻¹,是全镇污水的总出口,负责接纳镇南部区域 2 个村约 0.8×10⁴ 常住人口的生活污水,以及来自上游 P2 泵站的转运污水,其出水被排入下游管网,最终在距离镇 15 km 外的污水处理厂进行处理。一级泵站 P1~P3 均装备了水量和液位在线监测设备,P3 泵站还增设了化学需氧量(COD)在线监测设备。所有的在线监测数据均被实时传输至水务管理平台。排水管网上并未设置其它在线监测设施。

在日常运营中,该镇 3 座泵站排放的污水质量浓度普遍较低。雨天时,污水流量显著增加,泵站污水质量浓度进一步降低。受此影响,局部管网频繁出现污水冒溢现象,未经有效处理的污水排入周边河道,造成河道水质急剧恶化,给污水处理和水环境保护工作都带来了严峻挑战。

1.2 泵站运行状态分析

泵站是污水管网系统的重要组成部分,其流量、液位和水质参数,以及上述参数对降雨事件的响应情况,是衡量污水管网系统运行状态健康状况的核心指标^[13-14]。然而,本研究在数据收集阶段面临挑战:由于泵站 P1~P3 的在线流量计长期未进行校准,导致监测数据与实际情况之间存在明显差异,因此这些泵站的历史流量数据无法作为可靠分析依据。幸运的是,泵站前池的液位以及 COD 值的实时监测数据可从当地水务管理平台上获取。其中,泵站 P1~P3 的液位数据每分钟监测一次,而泵站 P3 的 COD 值每 15 分钟监测一次,这些原始数据被整理成日均值用于后续分析。针对监测过程中出现的异常数据,采用了截断点法进行识别,并对无效数据运用均值法进行替代处理^[15]。

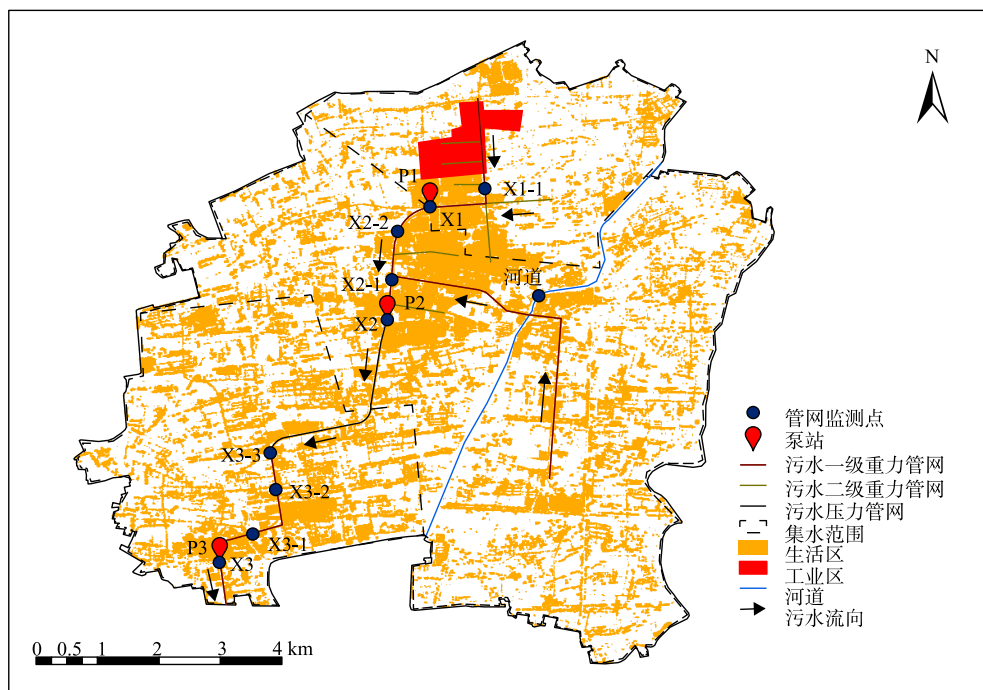
为调研该镇排水的总体水质情况,对 P3 泵站在 2022 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日 COD 值逐月变化情况进行了分析。此外,为了评估各泵站对降雨的调节能力以及潜在的污水冒溢风险,收集了 P1、P2 和 P3 泵站在 2023 年全年的前池液位数据,并深入考察了不同强度等级的降雨事件对液位的具体影响。

降雨强度等级的划分参考《降水量等级》(GB/T 28592-2012)。根据该标准,日降雨量 0.1~9.9 mm 为小雨,10.0~24.9 mm 为中雨,25.0~49.9 mm 为大雨,≥50 mm 则为暴雨。2023 年的降雨数据来源于该镇所在县市气象局的官方记录。据统计,全年小雨 73 场,中雨 24 场,大雨 2 场(4 月、6 月各 1 场),暴雨及以上强度的降雨 3 场(4 月、5 月、9 月各 1 场)。鉴于中雨和小雨的降雨频率较高,而大雨及以上强度的降雨频率相对较低,为了提高分析的准确性并减少低频大雨对统计结果的干扰,解析时将降雨事件按日降雨量进一步细分为 7 个等级:0(即晴天)、0.1~4.9、5.0~9.9、10.0~14.9、15.0~19.9、20.0~24.9 mm,以及 ≥25.0 mm(即大雨及以上强度)。

1.3 管网运行状态分析

除泵站运行状态外,管网的流量、液位、流速等参数同样是评估管网运行健康状态的关键依据^[16-17]。然

而，本研究排水管网缺乏在线监测设备，导致数据资源极为匮乏。为了弥补这一不足，2024 年 8 月 1—30 日，在主干管网布设了四个监测点位 X1-1、X1、X2 和 X3（图 1），并安装北京清环智慧水务科技有限公司生产的 TWQ 型在线流量监测设备，实时监测管网的流量、液位和流速，并以每 15 min 为间隔自动采集数据并上传至系统。利用上述数据的日均值来开展后续的分析工作。其中，监测点位 X1-1 设置在镇区北端工业园区出口的管道检查井内，用于监测工业园区内的排水流量、液位和流速；而 X1、X2、X3 则分别安装在 P1、P2、P3 泵站前的管道检查井内，用于监测泵站的流量以及管网的液位和流速。为确保数据的准确性，定期对监测仪器进行维护与校准。



注：X1、X2、X3代表泵前监测点，X1-1、X2-1、X2-2、X3-1、X3-2、X3-3代表管网监测点。

图 1 研究区域及监测点布置

Fig. 1 Study area and monitoring points configuration

通过考察各泵站在旱天（日降雨量为 0）和雨天的日均转输流量变化，并结合上下游泵站转输流量的关系分析，可初步识别各泵站服务区域的污水收集情况和外水入侵情况。此外，在 P2 泵站区域的泵房顶楼，还安装了由北京清环智慧水务科技有限公司生产的 TWR 型翻斗式雨量计，该设备同样以 15 min 为频率连续传输降雨量数据，实现了降雨事件与流量变化的动态匹配。实验期间，共记录了 5 场降雨事件，日降雨量为 4.8~38.8 mm。

在上述 4 个管网监测点，于 8 月 5 日、12 日、19 日和 26 日分别采集了瞬时水样，并对这些水样进行 COD、氨氮、总氮（TN）和总磷（TP）4 项水质指标的检测与分析。同时，从研究区域的主要河道以及排水户的化粪池出口采集了水样，同样进行了上述四项水质指标的检测，旨在了解研究区域内河道水与生活污水的水质状况。在进行量化分析时，采用了四次采样监测结果的算术平均值来代表各监测点的水质质量浓度。样品采集、保存和测试按照《水和废水监测分析方法（第四版，增补版）》进行。

研究发现，泵站 P1~P2 间的管网存在污水外溢问题，泵站 P2~P3 的管网则存在外水入侵现象。为对上述问题管段进行溯源分析，在泵站 P1~P2 的主干管段增设了 2 个流量监测点位（X2-1、X2-2），在 2024 年 9 月 1—7 日实时监测了流量、流速和液位数据，捕捉流量异常突变；同时，在泵站 P2~P3 的主干管段增设了 3 个水质监测点位（X3-1、X3-2、X3-3），于 9 月 2 日和 5 日进行瞬时采样，分析了 COD 值及氨氮、TN 和 TP 质量浓度，以捕捉可能的水质异常突变。监测期间无降雨。

1.4 污水收集率计算

污水收集率作为一项关键指标,对于评估特定区域内污水收集系统的运行效能与实际成效具有重要意义^[18-19]。本研究选取 P1、P2、P3 泵站服务区域作为基本核算单元,利用式 (1) 计算各污染物的实际收集量与理论产生量,从而得出了污水收集率。

$$R = \frac{Q_a \times C_a}{Q_l \times C_l} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为污水收集率,%; Q_a 为实际污水收集量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_a 为实际污染物质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_l 为理论污水量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_l 为产污源头污染物质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Q_a 与 C_a 的计算数据来源于 1.3 节所述的管网监测点 X1、X2 和 X3 在 2024 年 8 月所记录的日均污水处理量及平均水质监测结果。 Q_l 的计算依据人口普查资料中各泵站服务区域各村镇的常住人口^[20] (P_1 、 P_2 、 P_3 泵站分别为 0.9 、 3.5 、 4.3×10^4 人) 以及当地水资源公报中公布的人均综合生活用水量 ($230 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$), 并采用了 0.8 作为折污系数^[21]。 C_l 的确定综合参考文献^[22-23], 并结合研究区域内多个排水户的化粪池出水的实际测量结果, 最终选取 COD 为 $260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、氨氮为 $48.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN 为 $58.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP 为 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为量化计算值。

1.5 入流入渗定量解析

外来水入流入渗会挤占污水管网的有效容量,进而降低污水输送效率并稀释管网中的污水质量浓度,在高负荷情况下,可能导致局部区域发生污染溢流^[24-25]。通过定量计算入流入渗量,可以有效定位问题区域,制定针对性的管网优化方案^[26]。然而,该区域在降雨期间经常出现停泵憋水现象,降雨入流入渗的定量评估较为困难^[27],因此,本研究仅依据旱天的水质水量数据来评估旱天的入流入渗问题。为了消除降雨对水量传输的影响,排除了每次降雨事件当天及随后 48 h 内的监测水量数据,仅将这些时段之外的数据视为旱天有效数据^[28]。以 1.3 节所述的管网监测点 X1-1、X1、X2 和 X3 为节点,采用 COD、氨氮、TN 和 TP 这四个关键污染指标来进行物料衡算,根据式 (2) 和式 (3) 测算 Q_w 和 Q_u 值。

$$\text{水质平衡方程: } Q_{m+1}C_{m+1} = Q_wC_w + Q_uC_u + \Sigma Q_mC_m \quad (2)$$

$$\text{水量平衡方程: } Q_{m+1} = Q_w + Q_u + \Sigma Q_m \quad (3)$$

式中: Q_m 和 Q_{m+1} 分别为节点 m 及其下游节点 $m+1$ 的旱天时流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_m 和 C_{m+1} 分别为节点 m 及其下游节点 $m+1$ 的旱天时水质指标质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_w 为旱天时节点 m 与 $m+1$ 之间服务区域的污水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_w 为典型生活污水的水质指标质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_u 为旱天时进入节点 m 与 $m+1$ 之间服务区域的外来水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_u 为外来水的水质指标质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Q_{m+1} 和 Q_m 采用 2024 年 8 月份在线监测系统记录的旱天时段日均污水量数据; C_{m+1} 和 C_m 采用 2024 年 8 月份平均人工采测水质数据。 C_u 采用 2024 年 8 月份对研究区域河道采测的平均水质数据。 C_w 取值同 1.4 节, COD、氨氮、TN 和 TP 分别为 260 、 48.0 、 58.0 和 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 全镇污水整体质量浓度分析

P3 泵站作为全镇污水的汇总排放枢纽,其水量及水质特征能够全面反映全镇污水收集系统的整体运行状况。图 2 展示了 2022—2023 年 P3 泵站 COD 值的逐月变化情况。2022 年, P3 泵站的 COD 年平均值仅为 $158 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这一数值明显偏低。特别是在 4 月至 9 月的雨季期间, COD 值与旱季 (10 月至次年 3 月) 的平均值相比,下降了 29.3%。其中, 8 月和 9 月的质量浓度最低,这两个月的平均质量浓度仅为 $(86 \pm 41) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相比之下, 2023 年的 COD 值年平均值上升至 $195 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但雨季质量浓度仍较旱季低 20.1%,且 8 月和 9 月的质量浓度依然显著偏低 $(154 \pm 56) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, KARPf 等^[29] 与 SHELTON 等^[30] 的研究明确指出,雨季 COD 值呈现降低态势,这一现象极有可能是由于雨季集中降雨以及河道汛期水位抬升,致使大量外水侵入污水管网所致。尽管 2023 年整体质量浓度提升,但季节性波动模式仍延续,且雨季最低值同比提升了 79.1% (从 $86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $154 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),反映出管网渗漏或雨水稀释效应有所缓解。

根据邹吕熙等^[31]对太湖流域 204 座污水厂的调研结果,该区域内污水厂进水的 COD 平均值为

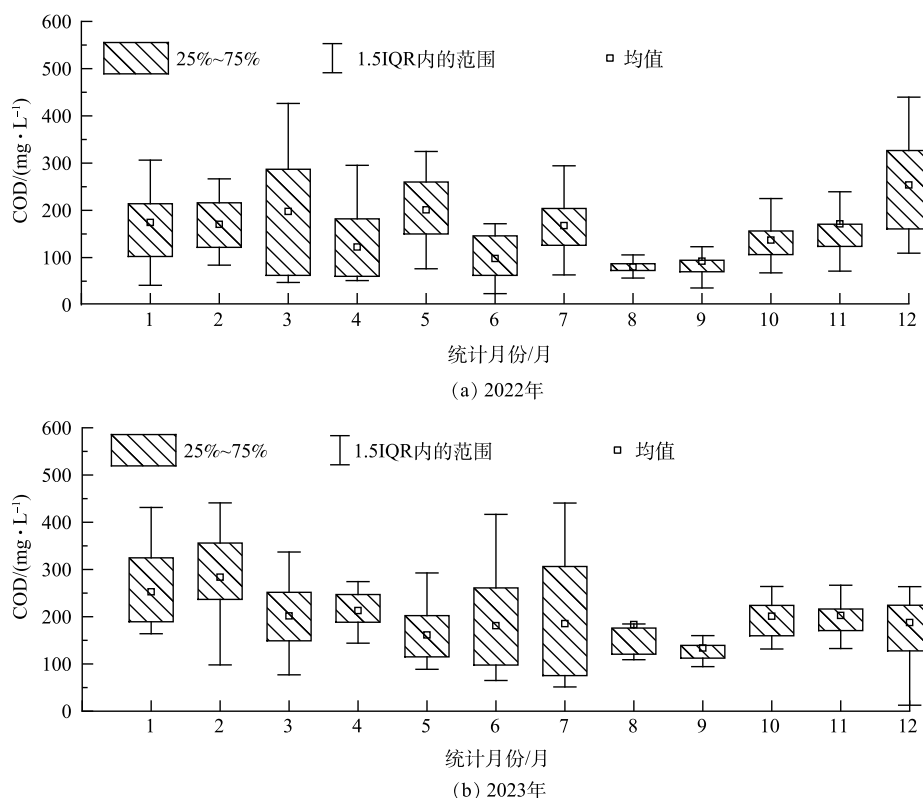


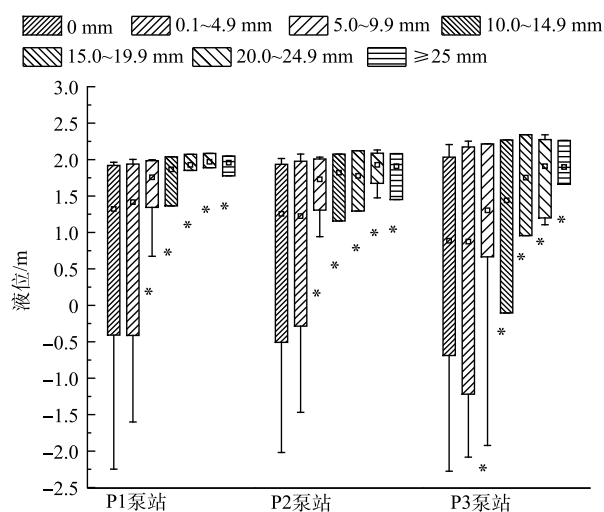
图2 P3 泵站 COD 值的逐月变化

Fig. 2 Monthly variation of COD at pumping station P3

$260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。曹业始等^[32]指出,污水厂进水 COD 值偏低的主要原因是管网中存在雨水、地下水等外水的流入入渗。参照《浙江省城镇污水处理提质增效 3 a 行动方案(2019—2021)》的要求,污水厂进水的 BOD_5 质量浓度需达到或超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 按此推算, COD 的目标值应不低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (基于 BOD_5/COD 比值为 0.5^[33] 的假设)。通过对比可以发现,该镇的排水 COD 年平均值在太湖流域的污水厂中处于较低水平,特别是在 8 月和 9 月,排水 COD 值极低,表明该镇的污水管网可能在外水入侵问题。这种特征在太湖流域以及广州等其他南方地区同样普遍存在^[34]。

2.2 主要泵站液位的晴雨天变化

P1、P2、P3 泵站在 2023 年不同降雨事件下的泵站前池液位变化情况如图 3 所示。在旱天条件下, P1、P2 和 P3 泵站的液位分别维持在 1.32、1.26 和 0.88 m, 其中 P1 和 P2 泵站的液位明显高于 P3 泵站。通过配对 t 检验对不同降雨强度下液位与旱天液位进行了显著性分析发现:当降雨量处于 0.1~4.9 mm 时, P1、P2、P3 泵站 P 值分别为 0.262、0.490、0.621, 表明其液位与旱天液位不存在显著性差异;而当降雨量超过 5.0 mm, 各泵站 P 值均小于 0.001, 液位与旱天液位均呈现出显著性差异, 且各泵站前池液位呈显著上升趋势。尤其是在降雨量超过 20.0 mm 后, P1、P2 和 P3 泵站的前池液位分别较旱天液位上升了 0.65、0.67 和 1.03 m, 达到了最高值, 分别为 1.97、1.93 和 1.91 m。此后, 液位趋于平稳, 不再随降雨量的增加而持续攀升。



注: *表示 $P < 0.05$, 表明与旱天液位存在显著性差异。

图3 不同降雨事件下的泵站液位变化

Fig. 3 Pump station liquid level variations under different rainfall events

这些数据表明,各泵站的前池液位与降雨量呈显著正相关关系,直接反映了该镇污水管网在雨季所面临的外水入侵问题。外水入侵不仅稀释了污水中的有机物,导致 COD 值降低,还极大地加重了污水处理厂的运行负担。值得关注的是,在降雨期间,当泵站日均液位接近 1.9 m 的阈值时,液位不再随降雨量的增长而继续上升,趋于稳定。这一现象表明,一旦泵站液位达到这一临界水平,超出其处理能力的污水可能会通过溢流途径进入环境水体,从而进一步加剧污染风险。

与 P1 和 P2 泵站相比,尽管 P3 泵站在降雨期间的液位也维持在较高水平,但其液位变化表现出了一定的自我调节能力,这意味着 P3 泵站面临冒溢的风险相对较低。这一发现表明,在中小雨等常规降雨事件下,泵站能够有效应对额外水流压力。然而,在遭遇大雨或暴雨等极端天气时,泵站液位可能会逼近甚至达到处理能力的极限,届时泵站将面临满负荷运行或溢流的风险,这对污水处理厂的运行效率构成严峻挑战,同时也可能对周边水体构成潜在污染威胁。

2.3 主要泵站转输流量的晴雨天变化

2024 年 8 月,泵站 P1、P2、P3 的日转输流量和区域日降雨量变化如图 4 所示。在泵站水量监测期间,共有 5 d 观测到了降雨。P1、P2、P3 泵站的日均转输水量分别为 2 232、1 383 和 4 206 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。若排除降雨当天及其后 48 h 的数据,则 3 个泵站在旱天的平均水量分别为 2 567、1 886 和 4 261 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,与整个月的平均水量相比,分别上升了 12%、36% 和 1%。剔除降雨数据后旱天的平均水量上升,主要是在 16 日和 28 日降雨期间,P1 和 P2 泵站出现了停泵导致的憋水情况,从而使得降雨时的流量反而比平常时候有所减少。通过对 P1、P2 和 P3 泵站实际运行日均水量与设计规模可知,3 个泵站的实际运行水量分别仅为设计规模的 27.9%、13.8% 和 42.1%,均处于低负荷运行状态。

观察泵站上下游的转输水量差异,发现 P2 泵站的转输水量显著低于其上游的 P1 泵站,表明 P1 与 P2 泵站之间的管网存在严重的污水外溢现象。另一方面,P3 泵站的最高日转输水量几乎达到了 10 000 m^3 ,而 P2 泵站的最高日转输水量仅为 3 500 m^3 。从 P2 泵站流向 P3 泵站的过程中,管网水量增加近 6 500 m^3 ,这一增量远超 P3 泵站服务区域的理论污水量(1 500 m^3)。上述现象进一步显示 P2 泵站与 P3 泵站之间的管段遭受了严重的外水入侵。

从液位来看,监测期间该区域内的污水管网运行液位普遍高于管顶标高,长期处于高水位运行状态,冒溢风险极高。同时,当泵站开泵时,主干管的流速普遍位于 0.1~0.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,远低于不淤流速,长期低流速运行会加剧管网淤积。这种长期的高水位、低流速运行状态对污水系统的健康运行构成了严峻挑战。

2.4 污水收集率分析

2024 年 8 月的水质分析结果表明,P1 泵站污水 COD 值、氨氮、TN 和 TP 质量浓度分别为 (120 ± 24) 、 (30.5 ± 3) 、 (35.5 ± 15) 和 (3.5 ± 0.3) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;P2 泵站分别为 (232 ± 68) 、 (48.8 ± 23) 、 (53.0 ± 13) 和 (4.4 ± 0.2) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;P3 泵站分别为 (208 ± 40) 、 (42.5 ± 19) 、 (45.8 ± 11) 和 (3.8 ± 0.2) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。P2 和 P3 泵站的污水 COD 值与我国南方地区污水厂进水值相近^[35],而 P1 泵站的 COD 值则显著偏低。造成这一差异的原因在于,P1 泵站除收集生活污水外,还接纳了经预处理的工业园区废水,该工业园区排水的 COD 值较低,仅为 (63 ± 43) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为了更深入地了解研究区域内的污染物收集效率,基于常住人口和当地人均用水量统计数据,估算了各泵站

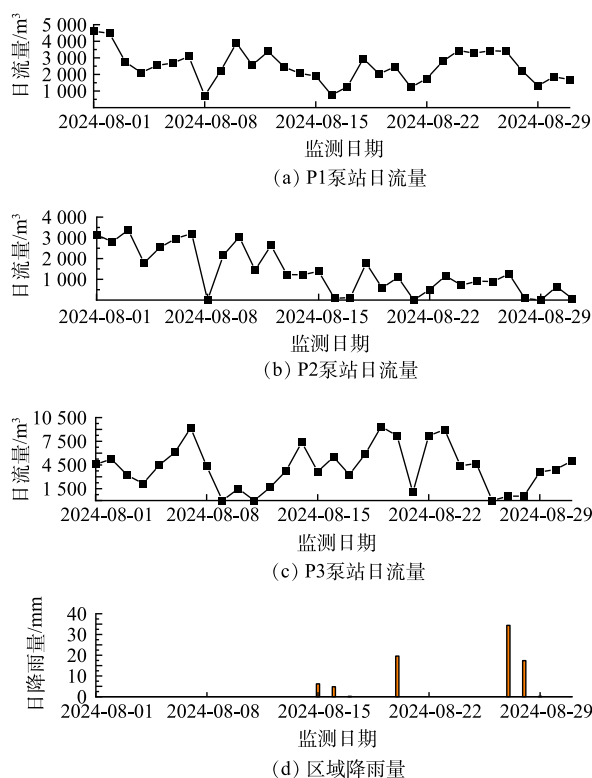


图 4 各泵站的日转输流量和区域日降雨量

Fig. 4 Daily pumping capacity and areal rainfall at monitoring stations

服务区域内的生活污水理论产生量；同时结合上述 3 个泵站的在线监测流量数据与人工采测水质数据，计算了各泵站生活污水的实际收集量。通过对比沿途各泵站的生活污水中各类污染物实际收集量与理论产生量，核算出了各泵站的污水收集率，结果如图 5 所示。尽管不同水质因子的计算结果存在一定的差异，但它们在空间分布上的趋势大体一致。具体而言，P1 泵站对 COD、氨氮、TN 和 TP 的收集率分别为 62.2%、85.5%、79.2% 和 81.3%，显示出较好的污水收集效果^[36]。而 P2 泵站的情况较为严峻，对氨氮的收集率仅为 21.8%，对 COD、TN 和 TP 的污水收集率甚至低于 20%。P3 泵站作为全镇污水的汇总排放枢纽，其 COD、氨氮、TN 和 TP 的收集率分别为 42.5%、47.1%、41.8% 和 35%，这意味着研究区域内可能有高达 60% 的污染物未能被有效收集，且主要问题区域为 P2 泵站服务区域。P2 泵站服务区域内的污染物收集量偏低，这一现象是外水入侵、泵站调度及地理位置等多重因素综合作用的结果。首先，在 P3 泵站服务区域内，大量外来水通过各种途径进入管网系统，严重挤占了原本预留用于污水排放的管道容量。不仅削弱了 P3 泵站的污水转输效能，也对 P2 泵站的正常排水作业产生了不利影响。其次，P2 泵站采用压力流出工作模式，导致其排水时 P3 泵站服务区域内重力管网压力显著上升，当压力累积至临界值时，易引发管网内污水冒溢现象。为了减少冒溢，当地运维部门采取了减少 P2 泵站开启时长的措施。这一做法也使得 P2 泵站下游的压力管段长期处于低压运行状态，进而加剧了地下水的入渗问题。另外，该镇位于污水处理厂收集管网区域的末端位置。在遭遇较大降雨事件时，管网内的水量会迅速增加，镇区泵站需暂停运行以保障下游泵站的排水能力不受影响。这直接导致了镇区内的污水无法被及时有效地收集和处理。综上所述，上述多重因素共同作用，显著影响了该区域内污染物的收集率。

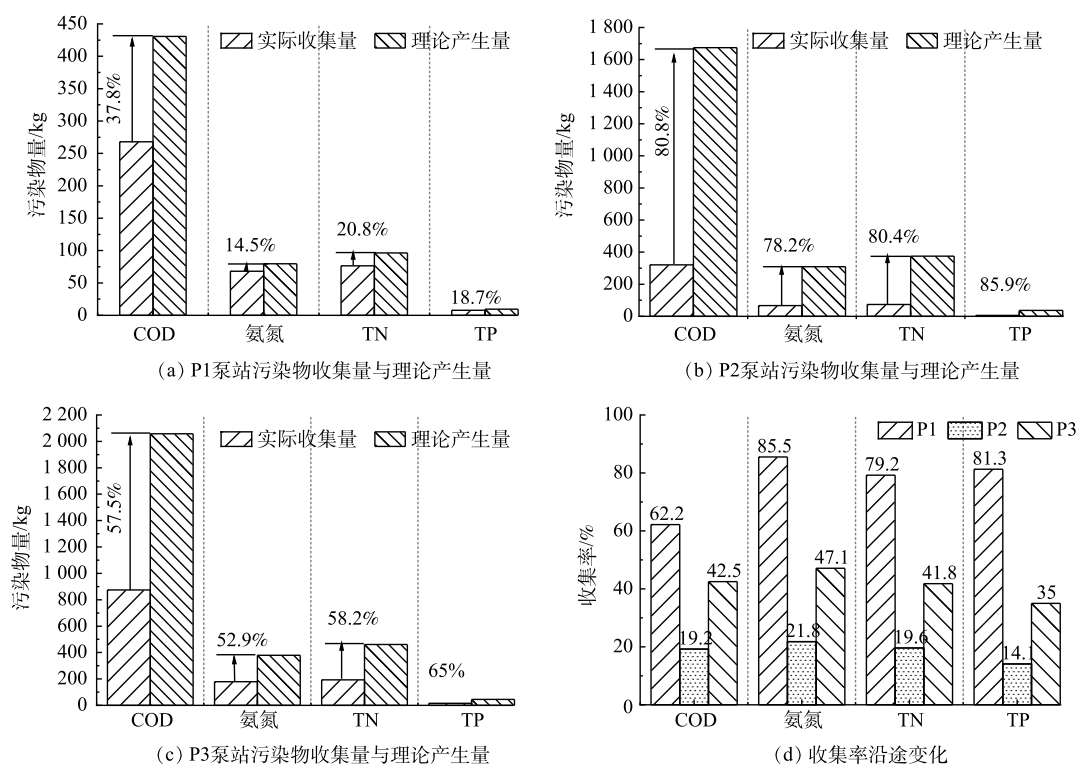


图 5 各泵站污染物收集量与理论产生量

Fig. 5 Pollutant collection vs. theoretical generation at pumping stations

2.5 旱天外水入侵分析

2024 年 8 月的水量实测数据显示，在旱天条件下，监测点位 X1-1、X1、X2 和 X3 的平均水量分别为 1 184、2 567、1 886 和 4 261 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。结合同期收集的水质监测数据，得出污水收集系统在旱天条件下的外来水量如表 1 所示。表 1 中，P1 与 P2 泵站的部分收集水量和外来水量数据出现了不合理的负值情况。P2 泵站的收集水量和外来水量数据全部呈现为负值，这一异常现象主要是由于其转输水量显著低于其上游

的 P1 泵站。这一结果表明, P1 与 P2 泵站之间的管段可能存在严重的污水外溢问题。而 P1 泵站基于 COD 计算得出的外来水量同样为负值, 可能是该泵站所在区域有高质量浓度污水混入所致。剔除这些异常值后, 对基于 4 个污染指标所得的物料衡算结果进行平均处理, 结果显示该镇的污水泵站 P1 和 P3 的外水量分别约为 299 m^3 和 838 m^3 , 分别占其日均转输水量的 11.7% 和 19.7%。其中, P3 泵站的外来水比例明显高于我国生活污水外来水入渗的正常范围 (10%~15%)^[9], 表明 P3 泵站服务区域内存在显著的外来水入侵问题。

2.6 问题管段的监测溯源

2024 年 9 月 1—7 日, 对泵站 P1 与 P2 之间的主干管进行流量监测分析, 发现监测点 X1、X2-2、X2-1、X2 日均流量分别为 $2\,252$ 、 $2\,395$ 、 $1\,127$ 和 $1\,358 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。从 X2-2 流向 X2-1 过程中, 流量急剧减少了 53%, 显示出 X2-2 至 X2-1 之间的管段很可能存在污水外泄问题。由此, 将原本长达 2.5 km 的主干管泄漏排查范围缩小到了关键的 1 km 管段内, 使后续的外渗检测工作量降低了 60%。

同期, 对泵站 P2 和 P3 之间的主干管道进行了水质监测分析, 发现监测点 X3-3 的水质相较于其他监测点明显偏低, COD 值、氨氮、TN 和 TP 质量浓度分别为 28、12.3、12.8 和 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这些数值仅为上游 X2 监测点质量浓度的 11%~36% (图 6)。这一结果表明, X3-3 监测点附近可能是外来水入侵的重点区域。值得注意的是, X3-3 监测点位于 P2 泵站下游的压力主干管与重力主干管的衔接处, 是首个检查井。由于压力管道内的水压较大, 导致 P2 至 P3 泵站之间的重力管集水区域容易发生污水冒溢现象。为了减少冒溢, 当地运维部门采取了减少 P2 泵站开启时长的措施。这一做法也使得 P2 泵站下游的压力管段长期处于低压运行状态, 进而加剧了地下水的入渗问题。基于对外来水入侵管段的溯源结果, 建议优先对 P2 泵站至 X3-3 节点的压力管段进行检测与修复。这一策略能够将主干管网排查范围从初始规划的 6.2 km 缩减至 3.3 km, 降幅高达 46.8%。

3 结论

1) 通过系统收集并分析泵站的水量、水质、液位等多维度数据, 对泵站运行状态进行分析, 确定了该镇污水排放质量浓度在雨季和旱季存在明显的差异, 各泵站前池液位随着降雨量的增加而显著上升, 泵站上下游转输水量存在明显异常, 确定该区域存在明显的降雨入流入渗、污水外溢、旱天外水入侵等问题。高效地诊断出集水区域存在的主要问题。

2) 通过对污水收集率及旱天外水量的定量计算表明, P1 与 P2 泵站之间管段的污水收集率严重不足, 对氨氮、TN 和 TP 的收集率极低 (<20%)。同时, P2 与 P3 泵站之间外来水高达 19.7%, 不仅增加了管网负荷, 还影响了上游泵站的正常排水功能。成功确定了泵站区间主要问题。

3) 通过实施针对性的节点溯源监测策略, 进一步缩小了潜在问题管段的范围。在泵站 P1~P2 的主干管之间, 主要外泄区域位于 X2-2 至 X2-1 管段之间。在泵站 P2~P3 间的主干管上, X3-3 点位附近可能是外水

表 1 旱天条件下各泵站服务区域的收集水量和外来水量计算结果

Table 1 Dry weather flow analysis: collected volume and extraneous flow in pump station service areas

水质 计算因子	P1 泵站		P2 泵站		P3 泵站	
	收集 水量/ m^3	外来 水量/ m^3	收集 水量/ m^3	外来 水量/ m^3	收集 水量/ m^3	外来 水量/ m^3
COD	888	495	-102	-1 279	2 336	739
氨氮	1 500	-117	-405	-976	2 556	519
TN	1 281	102	-441	-940	2 233	842
TP	1 434	-51	-606	-775	1 825	1 250

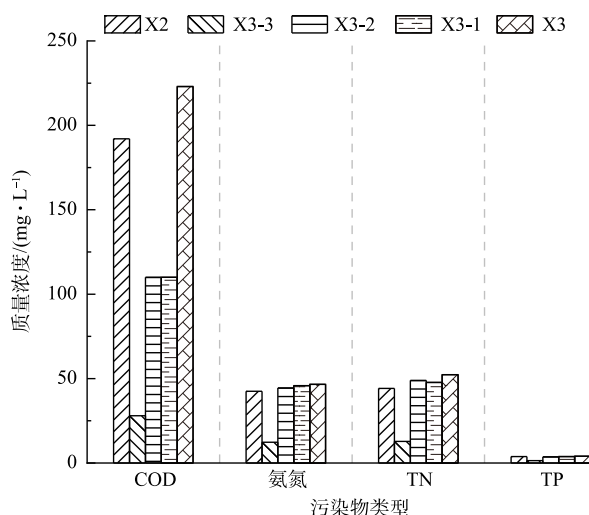


图 6 泵站 P2 至 P3 之间的管网水质变化

Fig. 6 Water quality variation along pipeline between pumping stations P2 and P3

入侵的重要通道。将主干管排查长度降低了近 50%。精确定位了主要问题管段，显著提高管网排查效率。为该镇污水收集与处理效能的优化提供了明确的指导方向，对于促进该地区水环境质量的全面提升具有深远的意义。

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.
- [2] PERRY W B, AHMADIAN R, MUNDAY M, et al. Addressing the challenges of combined sewer overflows[J]. Environmental Pollution, 2024, 343: 123225.
- [3] 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, 55(3): 1-5+77.
- [4] 李永新, 王威, 何妹, 等. 基于连续监测的城市内河返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2257-2263.
- [5] HUANG D, LIU X, JIANG S, et al. Current state and future perspectives of sewer networks in urban China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12(3): 2.
- [6] LI B, YU W, XIE Y P, et al. Trenchless rehabilitation of sewage pipelines from the perspective of the whole technology chain: A state-of-the-art review[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 431: 105022.
- [7] WANG Y, LI P, LI J. The monitoring approaches and non-destructive testing technologies for sewer pipelines[J]. Water science and technology : A journal of the International Association on Water Pollution Research, 2022, 85(10): 3107-3121.
- [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.
- [9] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2016, 44(4): 593-599.
- [10] 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入渗分析[J]. 给水排水, 2021, 57(7): 117-122.
- [11] TAN, ZHOU, ZHANG, et al. Assessment and pathway determination for rainfall-derived inflow and infiltration in sanitary systems: a case study[J]. Urban Water Journal, 2019, 16(7/8): 600-607.
- [12] WEYAND M. Monitoring runoff conditions in a combined sewer system: Experience and results of ten years' application[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(1): 257-264.
- [13] 闫明, 王红武, 刘志刚, 等. 城镇排水系统运行效能评价指标体系的构建与研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3124-3136.
- [14] 徐荣, 邓雅静, 李一平, 等. 秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52(1): 11-20.
- [15] 黄二辉, 潘德炉, 李淑蓉, 等. 水下剖面光谱原始数据异常值的判断方法[J]. 海洋学研究, 2006, 24(1): 91-96.
- [16] 陈建, 韩松磊, 李萌. 基于在线监测数据的排水管道运行规律识别[J]. 给水排水, 2024, 50(5): 128-134.
- [17] 成浩科, 张亚洁, 张浩, 等. 基于排水管网在线液位监测的管网运行状态诊断[J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 107-113.
- [18] 曹业始, 丁永伟, KROISS H, 等. 城市污水污染物排放量和污水集中收集率的计算[J]. 环境工程学报, 2025, 19(2): 259-268.
- [19] 梁雨雯, 厉智成, 郭迎新, 等. 基于居民生活污水污染物测定的城市污水收集效能评价方法研究[J]. 给水排水, 2023, 59(8): 31-36.
- [20] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查年鉴 2020 上[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [21] 生态环境部第二次全国污染源普查工作办公室编. 第二次全国污染源普查产排污系数手册 生活源[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- [22] 曹蕾, 蒋永伟, 王心培, 等. 关于城市生活污水集中收集率核算方法的研究[J]. 给水排水, 2024, 60(3): 46-52.
- [23] 黄志伟, 温婧, 崔飞剑, 等. 基于水量水质的污水收集处理系统效能分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 49-57.
- [24] LIN R, ZHENG F, SAVIC D, et al. Improving the effectiveness of multiobjective optimization design of urban drainage systems[J]. Water Resources Research, 2020, 56(7): 1-19.
- [25] PANGLE L A, DIEM J E, MILLIGAN R, et al. Contextualizing inflow and infiltration within the streamflow regime of urban watersheds[J]. Water Resources Research, 2022, 58(1): 1-19.
- [26] 郭效琛, 李萌, 杜鹏飞, 等. 降雨入流入入渗定量评价方法及指标的对比[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11): 133-138.
- [27] 刘东东, 林永钢, 余铭铨, 等. 高液位污水系统入流入入渗评估方法与诊断研究[J]. 给水排水, 2023, 59(9): 130-136.
- [28] 杨婷婷, 李志一, 朱婉宁, 等. 基于在线监测的污水管道旱天入流入入渗分析[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 132-138.
- [29] KARPF C, KREBS P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach[J]. Water Research, 2011, 45(10): 3129-3136.
- [30] SHELTON J M, KIM L, FANG J, et al. Assessing the severity of rainfall-derived infiltration and inflow and sewer deterioration based on the flux stability of sewage markers[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(20): 8683.
- [31] 邹吕照, 李怀波, 郑凯凯, 等. 太湖流域城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2019, 55(7): 39-45.
- [32] 曹业始, KROISS H, VAN LOOSDRECHT M, 等. 进一步改善城市网-厂-水体污水系统升级改造和运行效率的四点看法[J]. 给水排水, 2024, 60(4): 137-144.
- [33] 胡腾宇, 陈海涛, 丁睿, 等. 基于污水主干管水质沿程时空变化的外来水入流入入渗分析[J]. 给水排水, 2023, 59(12): 112-117.
- [34] 朱世泰, 申丽芬, 王广华. 广州市中心城区污水处理厂进水水质分布规律研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(19): 49-53.
- [35] 张卓群, 杨希, 李烨, 等. 重庆城市住宅小区化粪池进出水水质监测与分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 82-89.
- [36] 李勋, 孙永利, 张维, 等. 高质量发展背景下黄河流域主要城市供排水特征及问题解析[J]. 给水排水, 2024, 60(6): 1-7.

(责任编辑: 曲娜)

Precision diagnosis and critical segment identification in sewer networks: A case study of southern chinese town

LU Cheng^{1,2}, ZHAO Meng¹, LIU Rui^{2,*}

1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China; 2. Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University of Zhejiang, Jiaxing 314006, China

*Corresponding author, E-mail: 1393612924@qq.com

Abstract To address the challenges of low efficiency and high costs in sewer network problem identification, this study focused on a town in southern China. Utilizing multidimensional data analysis and quantitative calculations, we identified inadequate pollutant collection and extraneous water infiltration in its catchment areas, while precisely locating critical sewer exfiltration segments. The findings revealed significant differences in wastewater pollutant concentrations between wet and dry seasons. From 2022 to 2023, the town's annual average COD concentration remained below the influent average of Taihu Basin wastewater treatment plants, with particularly low concentrations observed during August-September. Water levels at three main pumping stations (P1-P3) showed positive correlation with rainfall: levels rose significantly during precipitation exceeding 5.0 mm and peaked during rainfall over 20.0 mm, increasing treatment plant loads and risking sewer overflows. The pipeline between P1 and P2 exhibited severe collection deficiencies (<20% for $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP), while the P2-P3 segment suffered substantial infiltration. Through targeted nodal tracing, we pinpointed exfiltration at pipeline X2-2→X2-1 and infiltration near X3-3. By analyzing pump station operational data, this study achieved cost-effective, efficient network diagnostics, providing scientific support for intelligent, precision management of sewer systems.

Keywords sewer network; pumping station; sewage collection efficiency; extraneous water infiltration; smart management