

曾祥华, 聂世勇. 基于分区分级诊断方法的上海某城镇污水厂外水入侵状况评估[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 93–100.
 ZENG X H, NIE S Y. Assessment of external water intrusion for a municipal WWTP in Shanghai based on zoning and grading diagnosis[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 93–100.

基于分区分级诊断方法的上海某城镇污水厂外水入侵状况评估

曾祥华^{1,2,*}, 聂世勇^{1,2}

(1. 上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海 201707; 2. 上海市水务局河湖生态修复工程技术研究中心, 上海 201707)

摘 要 【目的】 精准识别城镇污水管网外水入侵点位, 是制定污水厂提质增效整改方案的重要依据。与传统管网排查方法相比, 借助物联网(IOT)技术可快速锁定问题区域, 提高污水治理效能。【方法】 文章以上海某城镇污水处理厂为研究对象, 提出基于物联感知水质水量实时监测与排水分区分级诊断方法, 分析研究区域污水干管与各支管的水质变化, 判断存在外水入侵的问题区域。【结果】 2021年2月—2022年6月污水厂平均进水量为 31 082 m³/d, 最大日进水量是最小日进水量的 1.85 倍。对比区域供水量和污水量数据可知, 每月实际污水量均大于计算的理论污水量, 差值为 6 725.58~18 107.11 m³/d。污水厂进水量、水质受降雨的影响较大, 相比于非汛期旱天, 汛期雨天进水流量增加 16.25%, COD 浓度降低 14.45%, 氨氮浓度降低 40.26%, 总磷浓度降低 49.84%, 总氮浓度降低 22.56%。将研究区域划分为 18 个排水分区, 并在污水干管和主要支管安装水质在线监测设备, 在 3 路污水干管中, 大部分监测时段北片区域干管污水 COD 质量浓度处于 100 mg/L 以下, 外水入侵现象明显, 其范围内的老镇区和湖区排水分区因污水管网破损导致外水混入污水管网, 是造成下游污水厂进水 BOD₅ 质量浓度低于 100 mg/L 的主要原因之一。【结论】 通过分区分级诊断方法, 提高了污水管网外水入侵排查效率, 降低管网问题溯源成本, 助力污水厂提质增效。

关键词 污水处理厂 污水管网 外水入侵 提质增效 排水分区 分区诊断

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0093-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.011

Assessment of External Water Intrusion for a Municipal WWTP in Shanghai Based on Zoning and Grading Diagnosis

ZENG Xianghua^{1,2,*}, NIE Shiyong^{1,2}

(1. Shanghai Hongbo Engineering Consulting Management Co., Ltd., Shanghai 201707, China;

2. River and Lake Water Ecological Restoration Engineering Technology Research Center of Shanghai Water Affairs Bureau, Shanghai 201707, China)

Abstract [Objective] Accurately identifying water intrusion points outside the municipal wastewater network is an important basis for the development of quality and efficiency improvement of wastewater treatment plants (WWTPs). Compared with traditional pipe network investigation method, the internet of things(IOT) technology can quickly lock problem areas and improve wastewater treatment efficiency. [Methods] Taking a municipal WWTP in Shanghai as the research object, this paper proposed a real-time monitoring of water quality and quantity based on IOT sensing and a classification diagnosis method for drainage zones, analyzed the water quality changes of main wastewater pipes and branch pipes in the study area, and identified the problem areas with external water intrusion. [Results] The average influent volume of the WWTPs from February 2021 to June 2022 was 31 082 m³/d, and the maximum daily inflow volume was 1.85 times that of the minimum daily influent volume. By comparing the data of regional water supply and wastewater volume, it can be seen that the actual monthly wastewater volume was always greater than the calculated theoretical

[收稿日期] 2024-04-30

[基金项目] 长三角数字干线青浦区科技发展基金软科学研究项目(R2022-01)

[通信作者] 曾祥华(1976—), 男, 高级工程师, 主要从事水利及水环境治理等工作, E-mail: zengxh76@163.com。

wastewater volume, with a difference ranging from 6 725.58 m³/d to 18 107.11 m³/d. The influent volume and water quality of the WWTPs were greatly affected by rainfall. The influent and quality of WWTPs were greatly affected by rainfall. Compared with dry days in non-flood season, the influent rate in rainy season increased by 16.25%, the COD concentration decreased by 14.45%, the ammonia nitrogen concentration decreased by 40.26%, the total phosphorus concentration decreased by 49.84%, and the total nitrogen concentration decreased by 22.56%. The study area was divided into 18 sub-regions of drainage, and water quality online monitoring equipment was installed on the main wastewater trunk pipes and main branch pipes. Among the three main wastewater pipes, during most monitoring periods, the COD quality concentration of the north area trunk pipe was below 100 mg/L, and the phenomenon of external water intrusion was obvious, and the Laozhen District and the Lake District drainage area within the scope of the wastewater pipe network damage led to the mixing of external water into the wastewater pipe network, which was one of the main reasons for the influent BOD₅ concentration of the downstream WWTP to be lower than 100 mg/L. [Conclusion] Through the classification method, the detection efficiency of external water intrusion in wastewater network can be improved, the cost of problem tracing in pipe network can be reduced, and the quality and efficiency of WWTP can be improved.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) wastewater pipelines network external water intrusion quality and efficiency improvement drainage zoning zoning diagnosis

据 2022 年《中国城市建设统计年鉴》显示, 全国城市排水管道长度已达 91.35 万 km, 污水厂数量为 2 894 座, 污水处理能力为 21 606 万 m³/d, 污水处理率为 98.11%, 处理能力及处理率均在稳步上升^[1]。然而, 部分地区污水管网建设年代久远, 局部管段出现结构性破损或混接、错接, 导致外水入侵, 进而影响污水厂进水可生化性的现象普遍存在。根据调查推算, 我国南方地区污水管道中地下水的比例可高达 28%~40%, 管道地下水入渗量可达 3 800~6 300 m³/(km²·d)^[2]。罗坤等^[3]通过对长江中下游某城市污水系统进行持续监测, 发现污水处理厂服务范围内实测平均污水量为 49 426 m³/d, 为理论平均污水量 30 538 m³/d 的 162%, 存在着严重的外水入侵情况。污水管网外水入侵也是世界性问题, Bentes 等^[4]在葡萄牙维拉雷亚尔的 Folhadela 污水处理厂开展的进厂水量来源分析的研究中发现, 只有 15% 是生活污水, 其余 85% 是入侵水量。其中, 47% 是地下水入侵, 38% 是混入的雨水。

2019 年 4 月, 《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》发布, 要求对于进水五日生化需氧量(BOD₅)质量浓度低于 100 mg/L 的污水厂服务片区制定“一厂一策”系统化整治方案, 明确目标与措施。上海市地处长江入海口及太湖流域下游, 濒江临海, 地势低平, 极易受到台风、暴雨、高潮位及流域洪水的综合影响, 加之地下水位高, 对污水管网的运行影响大, 经常性的外水入侵, 也会造成污水厂的进水水质浓度普遍偏低。尤其是一些郊区污水处理厂, 管网老化或遭到施工破坏, 导致地下水入

渗甚至河水倒灌。

找到污水管网外水入侵点, 是污水处理提质增效改造工作的关键措施之一。目前, 污水管网外水入侵的诊断与判别方法主要分两类: 一类是应用检测设备, 如管道闭路电视(CCTV)和潜望镜检测(QV)等, 通过实时影像反映管道内部结构, 直接确定管道破损位置^[5]; 另一类是建立于水质水量监测数据的数值模型反演分析的方法, 如徐祖信等^[5]等提出的基于地下水入渗反演解析的污水管网破损数值化定位方法, 黄晓敏等^[6]提出的基于分区水质监测的污水管网收集效能评估方法等。相比较而言, 第一类方法需要断流工作, 成本高、工作量大, 第二类方法成本相对较低, 但数值模型较为繁杂。近年来, 随着物联网技术在各大领域中的广泛应用, 在线监测技术在排水系统运行管理工作有所尝试, 借助在线监测设备搭建污水管网监测网络, 实时收集管网关键点水质水量数据, 大大提高了污水水质监测效率。与传统大面积污水管网排查工作相比, 在线监测技术可动态反映污水变化情况, 有效解决复杂、多源排放的污水管网系统排查工作, 提高外水入侵的诊断率。

文章在上海某城镇污水处理厂提质增效方案研究中, 采用基于物联感知水质水量实时监测与排水分区分级诊断锁定外水入侵点的方法, 从主管到各级支管分层次评估判别, 大大降低了外水入侵点判别的时间周期与资金成本, 取得了较好的经济与环境效益, 可为类似污水处理厂制定提质增效方案提供参考。

1 研究区域概况

本研究所选定的城镇污水处理厂位于上海市西部,服务面积为 38.2 km^2 ,现状处理规模为 $6 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,服务范围由南片、北片和东片 3 部分组成,服务人口为 20 万人,污水管道总长度约为 128.51 km ,管径为 $\text{DN}100 \sim \text{DN}1400$,污水提升泵站 9 座。其中,北片区域(建设时间为 10 年以上)收集旧镇区生活污水,东片区域(建设时间为 10 年以内)收集新镇区生活污水,南片区域收集工业园区污水及纳入市政管网的农村生活污水。服务范围具体如图 1 所示。

污水处理厂分三期建设,一期与二期采用卡鲁塞尔厌氧-缺氧-好氧(AAO)氧化沟工艺,处理规模为 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$;三期采用改良 Bardenpho 生化处理+混凝沉淀+转盘滤池工艺,处理规模为 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

2 污水处理厂水量水质及存在问题分析

2.1 污水厂进水量变化情况

选取 2021 年 2 月—2022 年 6 月日进水量情况进行统计,具体如图 2 所示。

该时间段污水厂平均进水量为 $31\,082 \text{ m}^3/\text{d}$,最大进水量为 $37\,049 \text{ m}^3/\text{d}$,最小进水量为 $20\,044 \text{ m}^3/\text{d}$,最大进水量是最小进水量的 1.85 倍。

2.2 污水厂进水量与降雨量对照情况

选取 2021 年 2 月—2022 年 6 月污水厂日进水量与降雨量对比,具体如图 3 所示。

由图 3 可知,日进水量随降雨量的增加而上升。在当日降雨量较大时,当日污水厂进水量高于

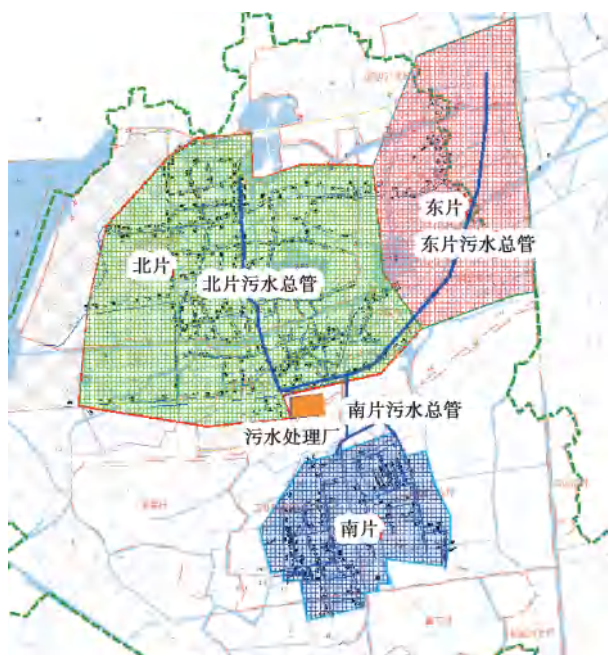


图 1 污水处理厂服务范围

Fig. 1 Service Area of the WWTW

月平均进水量,如 2021 年 7 月 25 日、2021 年 7 月 27 日降雨量分别为 103.26 、 80.8 mm ,对应进水量分别为 $34\,363$ 、 $35\,681 \text{ m}^3/\text{d}$,分别比当月平均进水量($32\,703.42 \text{ m}^3/\text{d}$)高 5.07% 和 9.10% ,比当月旱季平均进水量($31\,497.3 \text{ m}^3/\text{d}$)高 9.10% 和 13.28% 。对比上述污水厂平均进水量为 $31\,082 \text{ m}^3/\text{d}$,可估算出不同天气条件下,该区域污水管网中外水入侵比例为 $5\% \sim 16\%$ 。

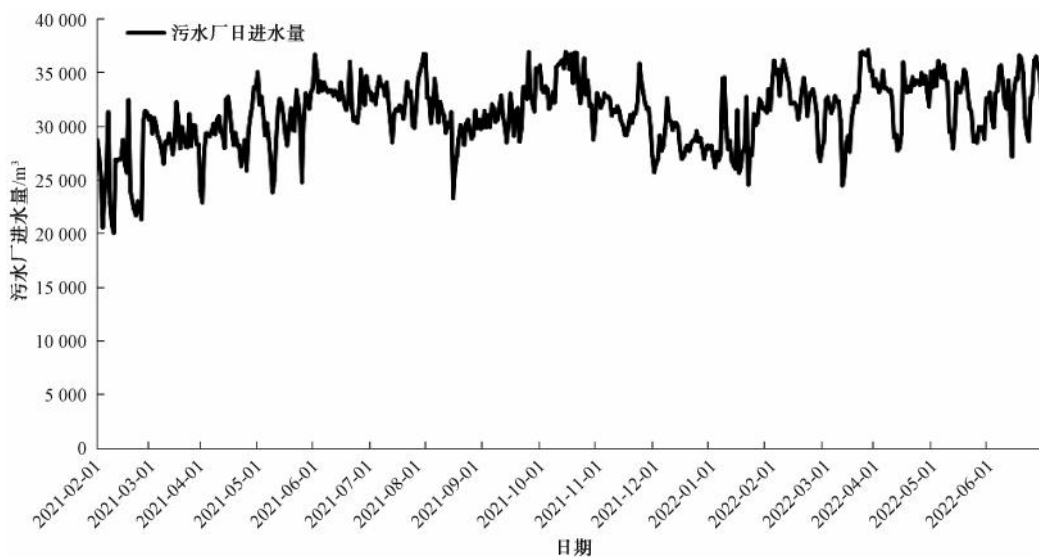


图 2 污水厂日进水变化情况

Fig. 2 Changes in the Daily Influent of WWTW

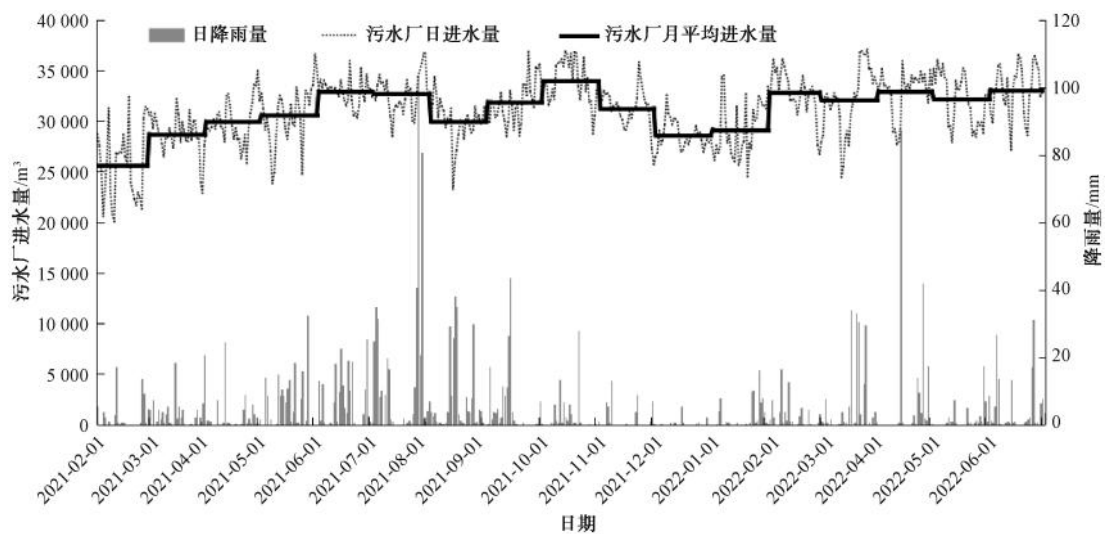


图3 污水厂日进水量与降雨量变化情况

Fig. 3 Changes of Daily Influent and Rainfall in WWTPs

2.3 污水厂进水量与供水量对照情况

以污水厂服务范围 2021 年 2 月—2022 年 3 月供水量及污水量数据为研究对象,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)和《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017),供水量产销差按照 0.8 考虑,污水排放系数以城镇区域为 0.9、工业为 0.75、农村为 0.8 考虑,计算理论用水量与理论原生污水量。区域现状工业用水量占比为 5.1%,城镇用水量占比为 91.5%,农村用水量占比为 3.4%。计算结果如表 1 所示。

表1 供水量及污水量(单位: m^3/d)Tab. 1 Volume of Water Supply and Wastewater Discharge (Unit: m^3/d)

月份	实际 供水量	理论 供水量	理论 污水量	实际 污水量
2021 年 2 月	29 462.32	23 569.86	18 875.92	25 601.50
2021 年 3 月	29 666.68	23 733.34	19 006.85	28 688.10
2021 年 4 月	30 143.93	24 115.15	19 312.62	29 937.60
2021 年 5 月	30 738.55	24 590.84	19 693.57	30 589.06
2021 年 6 月	31 955.07	25 564.05	20 472.97	32 874.33
2021 年 7 月	34 787.97	27 830.37	22 287.96	32 703.42
2021 年 8 月	34 388.26	27 510.61	22 031.87	29 950.97
2021 年 9 月	25 071.07	20 056.85	16 062.53	31 872.60
2021 年 10 月	31 173.71	24 938.97	19 972.37	33 931.42
2021 年 11 月	29 910.07	23 928.05	19 162.78	31 235.23
2021 年 12 月	29 856.87	23 885.50	19 128.70	28 600.65
2022 年 1 月	27 843.42	22 274.74	17 838.72	29 161.32
2022 年 2 月	27 251.54	21 801.23	17 459.51	32 807.96
2022 年 3 月	21 847.58	17 478.06	13 997.31	32 104.42

由图 4 可知,区域内供水量呈下降趋势,而污水量呈上升趋势,每月实际污水量均大于理论污水量,差值为 $6\,725.58 \sim 18\,107.11 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

为验证实际污水量数据的可靠性,计算 2021 年 2 月—2022 年 3 月污水量日变化系数。经计算,该时间段的污水量日变化系数为 1.24,小于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中规定的理论日变化系数为 1.70,表明该区域内污水量在正常范围。然而,2022 年 2 月、2022 年 3 月时间段内,实际供水量远小于实际污水量。推测其原因可能是,服务范围内北片区域部分管段邻近城市河道,阶段性城市基础设施建设对污水管网造成的破坏引发河水倒灌,造成实际污水量增加。

2.4 污水厂进水量与水质对照情况

根据上海市气象特征,年内可分为汛期和非汛期 2 个阶段,在所研究的时段内,选取 2021 年 6 月 1 日—9 月 30 日为汛期,选取 2021 年 10 月 1 日—2022 年 1 月 30 日作为非汛期数据,统计结果如表 2 所示。

相对于非汛期污水处理厂进水量,汛期进水量增加了 3.62%,且进水水质 COD 降低了 8.69%,氨氮降低了 28.15%,总磷降低了 34.33%,总氮降低了 21.90%。

由于非汛期数据中包含降雨日的平均值,为进一步分析旱天与雨天的污水处理厂运行数据的差异,选取 2021 年 10 月—2022 年 1 月连续 7 d 未降

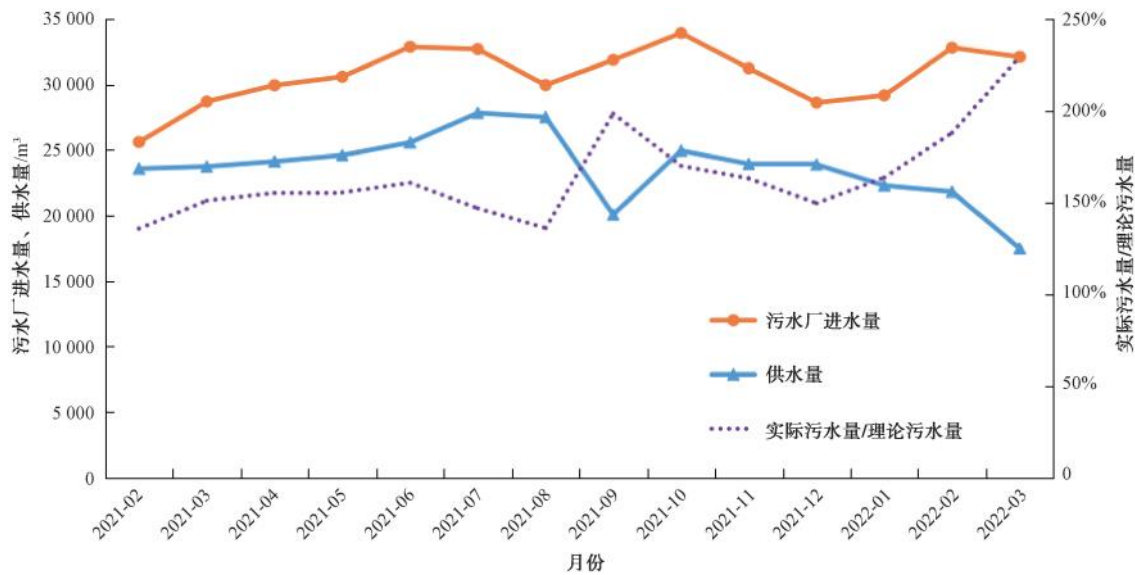


图 4 月平均供水量与污水厂进水量对照

Fig. 4 Comparison of Average Monthly Water Supply and Influent Capacity of the WWTP

表 2 污水处理厂汛期与非汛期运行数据对比
Tab. 2 Comparison of the Operation Data of WWTPs in Flood Season and Non-Flood Season

项目	汛期	非汛期
	2021 年 6 月 1 日—9 月 30 日	2021 年 10 月 1 日—2022 年 1 月 31 日
进水量平均值/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	31 841.75	30 728.07
COD 平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	150.56	164.89
氨氮平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	14.32	19.93
总磷平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.94	3.00
总氮平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	17.65	22.60

雨之后的进水量和水质作为旱天数据,同时将 2021 年 6 月—2021 年 9 月连续 7 d 降雨的进水量和数值作为汛期数据,结果如表 3 所示。

表 3 污水处理厂汛期典型降雨与非汛期连续旱天运行数据对比
Tab. 3 Comparison of Typical Rainfall in Flood Season and Continuous Dry Days in Dry Season of WWTP

项目	汛期 雨天	非汛期 旱天
进水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	33 196.15	28 555.21
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	131.150	153.301
氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	14.50	24.27
总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.61	3.21
总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	18.40	23.76

污水处理厂汛期雨天进水流量比非汛期旱天进水量增加了 16.25%,COD 浓度降低 14.45%,氨氮浓

度降低 40.26%,总磷浓度降低 49.84%,总氮浓度降低 22.56%,表明该区域排水系统雨天条件外水入渗量较大,对污水处理厂进水质影响较为显著。

3 研究技术路线与方法

3.1 研究技术路线

基于物联感知水质水量实时监测与排水分区分级诊断锁定外水入侵点的方法,首先根据污水厂服务范围内的管线分布特征划分排水分区,以直接入厂的主干管道为骨架,以各级支管为监测网络,以在线水质水量监测设备辅以物联数据传输为评估数据来源,按照由主管向支管层层锁定的方法,最终确定外侵水的主要渗入管段,并辅以 CCTV 等物理检测方法确定点位并提出相应的解决方案(图 5)。

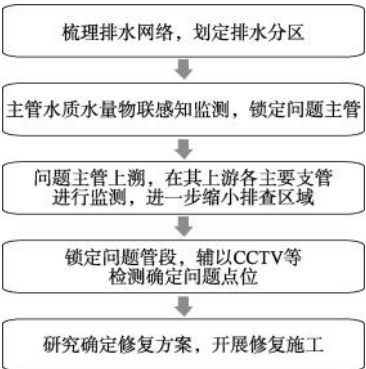


图 5 研究技术路线

Fig. 5 Technology Road Map for Research

3.2 研究方法

管网节点水质监测是诊断污水管网外水入侵潜

在替代手段,与现场安装管道流量计相比,同步的在线水质检测成本更低、操作方式更简便。针对外水入侵的监测方法,一般根据外水混入后对管网水质的特征因子指标的影响程度进行判别,如 Kracht 等^[7]采用稳定同位素法判定外水入侵比例,徐祖信等^[8]以硬度和总氮作为特征因子指标来分析外水入侵情况,程小文等^[9]认为,由于污水管网的外水来源是否为地下水,在管网排查之前是不清楚的,推荐以表征生活污水的水质特征因子作为评价指标,如 COD、氨氮。

研究^[10]表明,地下水、河水、初期雨水中 COD 浓度较低,且以 COD 作为水质特征因子评估外水入侵的准确率与氨氮相差不大,外水入侵诊断准确率达 55%~65%。一般情况下,城镇污水中 COD 与 BOD₅ 之间呈正相关,将 COD 作为特征因子进行在线监测,间接能反映污水管网中 BOD₅ 浓度变化,可较为直观地评估污水系统是否存在外水入侵。本研究选定的城镇污水处理厂以处理生活污水为主,仅不足 10%来自南片工业园区内的生产污水,与程小文等^[9]研究的情况较为类似,因此,本次在线监测设备可选取 COD 作为特征因子。

4 研究过程

4.1 划定排水分区及布设水质在线监测设备

根据研究污水厂服务区域管网分布特征,将研究区域划分为 18 个排水分区,同时在 3 路总管及主要支管位置布设 10 台套在线 COD 监测设备,其中 3 台位于主管,其余 7 台位于支管,如图 6 所示。



图 6 排水分区及 COD 监测设备布置

Fig. 6 Layout of Drainage Zoning and COD Monitoring Equipment

4.2 监测点位 COD 变化过程及变化趋势

4.2.1 一级(干管)监测点位分析

在南片区域、东片区域、北片区域三路一级(干管)安装水质监测仪器,监测位置编号为点位 1、点位 2、点位 3,监测时间段为 2022 年 1 月—2022 年 3 月。由图 7 可知,点位 1 污水 COD 质量浓度为 129.5~734.4 mg/L,均值为 356.5 mg/L;点位 2 污水 COD 质量浓度为 45.3~579.5 mg/L,均值为 326.1 mg/L;点位 3 污水 COD 质量浓度为 32.8~204.7 mg/L,均值为 91.5 mg/L。降雨量对污水 COD 浓度影响:雨天时点位 1 的污水 COD 浓度呈下降趋势,点位 2、点位 3 污水 COD 浓度变化无明显规律,但大部分监测时间段内点位 3 污水 COD 质量浓度为 100 mg/L



图 7 主管监测点水体 COD 浓度随降雨量变化情况

Fig. 7 Variation of COD Concentration in Water Bodies at the Main Monitoring Points with Rainfall

以下。

结合干管不同来水分析,点位 1 的干路主管收集的是工业园区污水及纳入市政管网的农村生活污水。当降雨量较大时,农村生活污水管道易混入雨水,一定程度上会降低干路主管中污水浓度,从而造成点位 1 污水 COD 浓度降低,但对总体水质影响不大。点位 2 的干路主管收集新镇区生活污水,该片区的污水管网建设时间短,管网系统较为完善,基本无外水入侵现象。点位 3 的干路总管收集旧镇区生活污水,该区域管道年久失修,可能存在破损情况,导致污水管道外水入侵,对总体水质影响最大。综合,选取北片区域(点位 3)作为下一步外水入侵问题排查范围。

4.2.2 支管监测点位分析

在北片区域选取合适支管管段安装水质监测仪器,水质监测点位编号分别为点位 4、点位 5、点位 6、点位 7、点位 8、点位 9、点位 10,监测时间段为 2022 年 7 月—2022 年 10 月。各个点位污水 COD 浓度如表 4 所示。

表 4 二级(支管)污水 COD 浓度(单位:mg/L)

Tab. 4 COD Concentration in Secondary (Branch Pipe) Wastewater (Unit: mg/L)

监测点	均值	最大值	最小值
点位 4	137.0	255.9	43.0
点位 5	197.1	318.2	50.9
点位 6	141.4	293.7	19.0
点位 7	60.2	155.1	22.9
点位 8	222.4	383.9	41.7
点位 9	169.4	389.4	34.1
点位 10	149.7	346.9	53.5

由表 4 可知,二级(支管)监测时间段内的污水平均 COD 浓度从大到小依次为点位 8>点位 5>点位 9>点位 10>点位 6>点位 4>点位 7。由图 8(a)可知,点位 5、点位 6 受降雨量影响较小;雨天时,点位 4、点位 7 支管中污水 COD 浓度降低,且点位 7 的污水 COD 大部分监测时间段处于 50 mg/L。由图 8(b)可知,点位 8、点位 9、点位 10 支管中污水 COD 浓度受降雨影响较小。综上,点位 4(排水分区 10,老镇

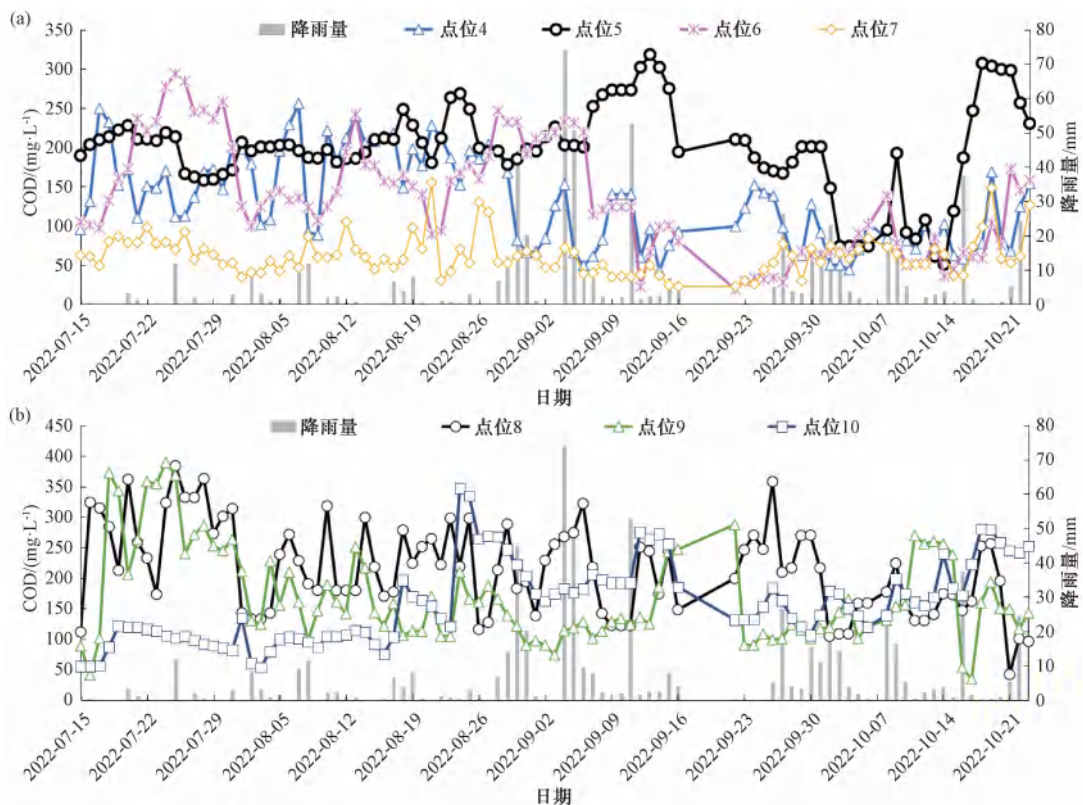


图 8 北片区域二级(支管)监测点水质 COD 浓度随降雨量变化

Fig. 8 Variation of COD Concentration in Water Quality at Secondary (Branch) Monitoring Points in the Northern Region with Rainfall

区)、点位 7(排水分区 9,湖区)受降雨影响较大,污水支管中可能存在较为严重的外水入侵。

5 结论

有效阻止外水入侵是污水厂提质增效的关键。本文基于系统分析的角度,采取分区分级诊断及溯源的方法,从干管到支管,通过连续时段的污水 COD 浓度监测及其与降雨量的对比关系,最终锁定主要涵盖老镇区的排水分区 10,以及主要涵盖湖区的排水分区 9 存在明显的外水入侵现象,对所研究污水厂提质增效方案的制定具有明确的指导意义。同时,与传统大面积开展管线调查的方法相比,节约了时间与经费,研究成果与方法可为类似污水处理厂制定提质增效方案提供参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022 年中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook in 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [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, 55(3): 1-5, 77.
XU Z X, XU J, JIN W, et al. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(3): 1-5, 77.
- [3] 罗坤, 孙凌凯, 马方凯, 等. 基于水质水量监测的污水管网评估诊断与定量分析[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 109-114.
LUO K, SUN L K, MA F K, et al. Evaluation, diagnosis and quantitative analysis of sewage pipe network based on water quality and quantity monitoring[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(13): 109-114.
- [4] BENTES I, SILVA D, VIEIRA C, et al. Inflow quantification in urban sewer networks[J]. Hydrology, 2022, 9(4): 52-52.
- [5] 徐祖信, 王思玉, 刘淑雅, 等. 基于地下水入渗反演解析的污水管网破损数值化定位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1331-1338.
XU Z X, WANG S Y, LIU S Y, et al. Numerical analysis and location of sewer network damage based on groundwater infiltration inversion[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(9): 1331-1338.
- [6] 黄晓敏, 傅肖尉, 赵志超, 等. 基于分区水质监测的污水管网收集效能评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 152-159.
HUANG X M, FU X W, ZHAO Z C, et al. Evaluation of collection efficiency of sewer network based on water quality zoning monitoring[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 152-159.
- [7] KRACHT O, GRESCH M, GUJER W. A stable isotope approach for the quantification of sewer infiltration[J]. Environmental Science Technology, 2007, 41(16): 5839-5845.
- [8] 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): 593-598.
XU Z X, WANG L L, YIN H L, et al. Quantification of groundwater infiltration into urban drainage networks based on marker species approach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4): 593-598.
- [9] 程小文, 周飞祥, 孙广东, 等. 面向提质增效的污水管网外水快捷排查方法研究[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 489-493.
CHENG X W, ZHOU F X, SUN G D, et al. Research on quick inspection method of external water in sewage pipe network for improving quality and efficiency[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 489-493.
- [10] 刘希希, 崔诺, 胡馨月, 等. 特征因子法提高污水管道地下水入渗检测效率的研究[J]. 给水排水, 2022, 58(2): 122-127.
LIU X X, CUI N, HU X Y, et al. Research on water quality factor method to improve the sufficiency of groundwater infiltration detection in sewage pipes[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(2): 122-127.

(上接第 12 页)

- [71] PHAM T, LEE B. Cu doped TiO₂/GF for photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* in bioaerosols under visible light irradiation: Application and mechanism[J]. Applied Surface Science, 2014, 296: 15-23. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.01.006.
- [72] XIAO X, MA X L, HAN X, et al. TiO₂ photoexcitation promoted horizontal transfer of resistance genes mediated by phage transduction[J]. Science of the Total Environment, 2021, 760: 144040. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.144040.
- [73] HAN X, LV P, WANG L, et al. Impact of nano-TiO₂ on horizontal transfer of resistance genes mediated by filamentous phage transduction[J]. Environmental Science Nano, 2020(4): 1214-1224. DOI: 10.1039/C9EN01279F.
- [74] AUERBACH E A, SEYFRIED E E, MCMAHON K D. Tetracycline resistance genes in activated sludge wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2007, 41(5): 1143-1151.