

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.024

基于在线水量水质监测的排水管网诊断技术研究

彭梦文¹, 龚冰², 赵飞¹, 吴从林³, 周小国¹, 贾伯阳¹,
陈文然¹, 张蕊¹, 陈彦霖¹, 沈华英¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对长江经济带某典型污水处理厂进水浓度低、污水处理效能低的问题,采用在线水量水质监测方法进行排水管网系统监测与诊断,并基于管网节点流量平衡方程、物料守恒方程精确计算各排水分区的外水入流入渗情况。基于诊断结果,优先对外水严重不平衡区域实施管网修复与改造工程。集中外水入流入渗点改造完成后,污水厂进水COD浓度提高29.63%以上,污水厂运行效能明显提升。研究表明,基于在线水量水质监测的排水管网诊断技术可助力污水处理厂提质增效。

关键词: 排水管网诊断; 入流入渗; 水量水质监测; 提质增效

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0164-05

Drainage Network Diagnosis Technology Based on On-line Monitoring of Water Quantity and Quality

PENG Meng-wen¹, GONG Bing², ZHAO Fei¹, WU Cong-lin³, ZHOU Xiao-guo¹,
JIA Bo-yang¹, CHEN Wen-ran¹, ZHANG Rui¹, CHEN Yan-lin¹, SHEN Hua-ying¹

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In response to the challenges posed by low influent concentration and reduced treatment efficiency at a typical wastewater treatment plant within the Yangtze River Economic Belt, an on-line water quantity and quality monitoring approach was implemented to assess and diagnose the performance of the drainage network system. By applying the flow balance equation and the material conservation equation at network nodes, the inflow and infiltration of external water into each drainage zone were quantitatively analyzed. Based on the diagnostic results, priority should be given to the implementation of pipe network repair and renovation projects in areas experiencing a severe imbalance in external water supply. After the renovation of the centralized external water inflow and infiltration points was completed, the influent COD concentration of the wastewater treatment plant increased by over 29.63%, indicating a significant improvement in operational efficiency. The findings demonstrate that

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3207600); 湖北省联合基金资助项目(2023AFD190); 国家自然科学基金资助项目(52200038); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBWL202300013、NBWL202103361、NBWL202103363、HB/ZB2021130)

通信作者: 沈华英 E-mail: shen_huaying@ctg.com.cn

drainage network diagnosis technology based on on-line water quantity and quality monitoring can effectively improve quality and efficiency of wastewater treatment plants.

Key words: diagnosis of drainage network; inflow and infiltration; water quantity and quality monitoring; quality and efficiency improvement

近年来,随着我国城市的快速发展,排水管网覆盖率不断提高。与此同时,污水厂处理水量也不断上升,然而,污水厂进水浓度却呈逐年降低趋势^[1]。一方面是由于我国排水管网的运营管理比较落后,排水系统受污水腐蚀、冲刷、沉积及地面荷载等影响,管道破损、混错接、淤积等问题普遍存在,导致污水渗漏或接入雨水系统,大大降低了污染负荷的收集率。另一方面,对于降雨充沛、地下水位较高的地区,地下水 and 地表水通过管道、检查井、排口等进入污水管网的现象严重,从而稀释了管网中的污水浓度,导致污水处理厂进水浓度降低^[2]。因此,准确识别排水管网问题,并高效实施对应的工程措施,提升排水系统污水收集处理效率,是污水处理提质增效的关键。

目前,排水管网问题识别最有效的方法是管道闭路电视(CCTV)检测^[3-4]。然而,该方法需要对排水管网进行封堵、降水、清淤、机器人检测,成本高、时间长,作业面要求高^[5]。对排水系统开展全面、大范围的CCTV检测,需要投入大量的人力物力。因此,若能通过管网预诊断方法,优先确定排水管网重点问题区域和管段,并量化外水入流入渗量,在此基础上针对性地开展CCTV检测,不仅能大大节省管网问题诊断的时间和成本,还能为管网修复工

程提供重要指导。

笔者基于长江经济带某典型污水处理厂进水浓度偏低(COD<80 mg/L)的问题,采用水量水质在线监测方法,对污水厂服务范围内的排水管网进行系统监测诊断,确定管网流量严重不平衡区域,并通过二次排查法准确定位排水管网问题管段,确定集中外水点位置。同时,基于水质监测结果,采用物料守恒和流量平衡模型,得到各排水单元的外水入流入渗量。

1 工程概况

长江经济带某污水处理厂服务面积约为30 km²,市政污水管长度合计127.50 km,污水管材质以HDPE、UPVC和钢筋混凝土为主,管径在DN300~1 200之间;该污水厂服务人口约30万人,处理规模为5×10⁴ m³/d,进水以生活污水为主,其中生活污水和工业废水占比分别为80%和20%。根据该污水处理厂实际运行数据,2018年、2019年和2020年平均处理水量分别为14 675、21 041、36 467 m³/d,进水量呈逐年上升趋势,远高于服务范围内产生的污水量。与此同时,污水厂进水水质浓度却呈现逐年下降趋势,如表1所示。为迅速有效地提高该污水处理厂进水水质浓度,采用在线水量水质监测方法对排水管网主要问题进行快速诊断。

表1 某污水处理厂进水水质

Tab.1 Influent quality of a wastewater treatment plant

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	pH
2018年	12.60~1 202.50 (154.46)	2.62~59.70 (23.78)	9.31~93.47 (33.48)	0.22~25.55 (2.15)	17.00~462.00 (121.47)	6.56~8.49 (7.53)
2019年	3.00~541.85 (113.55)	0.09~178.11 (16.97)	5.49~190.82 (24.96)	0.11~24.15 (1.20)	39.00~345.00 (97.98)	6.62~8.17 (7.40)
2020年	16.39~170.40 (61.35)	3.33~224.00 (10.64)	5.25~312.00 (14.13)	0.16~2.44 (0.73)	11.00~194.00 (67.67)	6.39~8.22 (7.62)

注: 括号内的数据为平均值。

2 水量监测

2.1 监测方案

根据工程范围的现状排水管网分布情况和拓扑结构,将研究范围划分为4个一级排水分区和19

个二级排水分区,具体如图1所示。每个二级排水分区视为一个独立排水单元,每个排水单元流量汇入前后分别设置在线水量监测点,共布置27个固定在线水量监测设备。此外,对污水泵站前池、调蓄

设施、穿河管段、满水管段、主要溢流排口、明显流量不平衡区域等加密布设临测点。

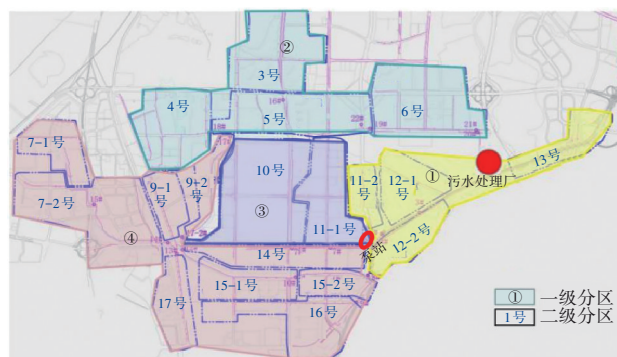


图1 排水管网及一、二级排水分区划分

Fig.1 Drainage network and division of primary and secondary drainage zones

在图1中,①号排水片区为污水厂厂前收水区,共设置3个在线水量监测点;②号排水片区为城北服务区,共设置8个在线水量监测点;③号排水片区为泵站服务区,共设置7个在线水量监测点;④号排水片区为城南服务区,共设置9个在线水量监测点。一级排水分区27个监测点的拓扑关系如图2所示。

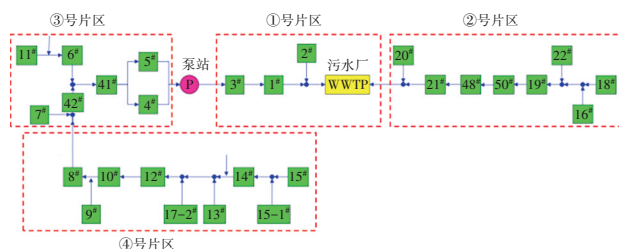


图2 在线水量监测点拓扑关系示意

Fig.2 Schematic of topological relationship of on-line water quantity monitoring points

2.2 监测结果与分析

设备运行稳定后,持续监测15 d,根据各监测点15 d实测流量平均值,计算排水分区污水量;此外,监测过程中发现泵站附近外水入流入渗严重,对泵站周围进行了加密监测,结果见表2。①、④号片区整体基本维持进出水流量平衡,②、③号片区存在较大的水量差异,污水厂服务范围的总收水量为1#、2#、20#、21#监测点流量之和,总计31 300 m³/d,与污水厂流量计自测流量(30 300 m³/d)基本吻合。根据服务范围内供水量数据,污水处理厂服务范围内的理论产污量为20 640 m³/d,实测产污量比理论值高10 660 m³/d,表明排水系统存在大量的外水入流入渗。污水厂入流入渗量占其实测水量的34%,远高于

于设计允许的入渗量(10%~15%)。这可能是由于排水管网存在混错接和破损,使得大量地表水和地下水等进入排水管网。建议对流量不平衡的②和③号片区进行排水管网混错接排查和管网缺陷检测工作,并根据排查检测结果实施针对性的管网混错接改造和缺陷修复工作。

表2 各排水分区的监测流量

Tab.2 Monitoring flow of each drainage zone

分区编号	面积/km ²	污水量/(m ³ ·d ⁻¹)	分区编号	面积/km ²	污水量/(m ³ ·d ⁻¹)
3	2.88	8 300	11-2	0.37	1 940
4	1.25	150	12-1	2.88	900
5	1.41	-350	12-2	0.61	0
6	1.68	-4 020	13	0.66	1 880
7-1	0.66	730	14	0.83	620
7-2	2.14	2 270	15-1	0.75	2 800
9-1	0.42	100	15-2	0.44	800
9-2	0.60	100	16	1.21	800
10	2.02	210	17	0.66	180
11-1	1.11	1 890	泵站附近	0.23	10 500

注: 负值表示管网中存在反向流。

3 水质监测

3.1 监测方案

水质检测的目的主要是从水质指标变化方面对污水管网进行排查,本次排查选择COD、氨氮、硬度等作为检测指标,可大致表征污水、雨水、河水、地下水等不同水样的污染物特征。污水管道出现破损,河水、地下水渗入,雨污错接、混接时,节点井中的水质指标会出现较大变化,通过对节点井水质的检测筛选,可对河水倒灌、地下水入渗、雨污混接等问题片区进行初步判断筛选,为重点问题排查指明方向。

3.2 监测结果与分析

本次对包括泵站前池、污水处理厂在内的32个水质监测点进行定期取样分析,COD和氨氮浓度的监测结果如图3所示。由图3(a)可知,②号和④号片区的源头COD浓度均较低,这是导致污水厂进水浓度较低的主要原因;大量监测点的COD浓度在50 mg/L以下,部分点位的COD在20 mg/L左右,导致污水厂进水的总体COD浓度较低。

由图3(b)可知,④号片区的氨氮浓度总体较低,其中源头7号分区的15#和32#监测点氨氮浓度

极低,建议后期对该片区内的管线展开排查。此外,结合各监测点的 COD 及氨氮浓度对比分析可知,15[#]、17[#]、22[#]、32[#]监测点的 COD 及氨氮浓度均较低,其中 22[#]监测点为上游施工地渠水混入,后续应采取封堵,15[#]、32[#]监测点均位于河道附近,存在河水入渗的可能。

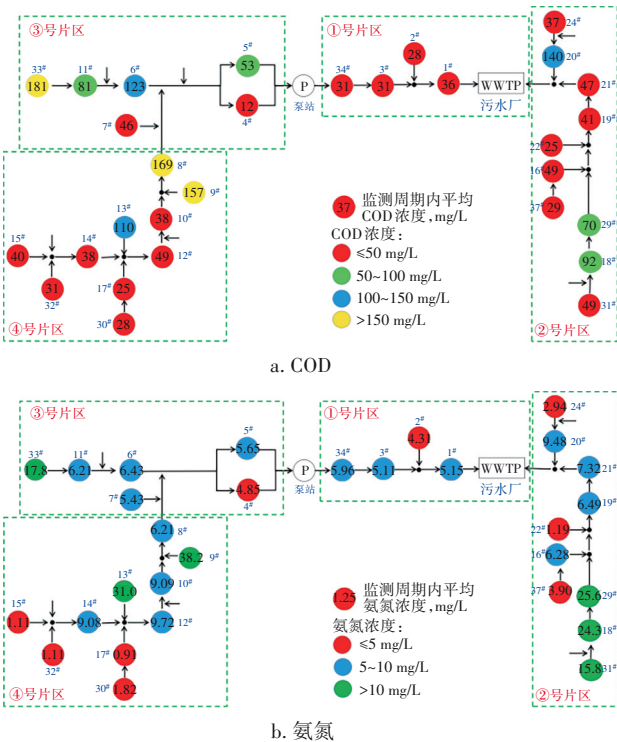


图3 监测点的COD和氨氮浓度拓扑关系

Fig.3 Topological relationship of COD and ammonia nitrogen concentrations at monitoring points

4 管网问题诊断

4.1 旱天入流入渗

采用夜间最小流量法及物料守恒法对水量、水质监测结果联合分析,得到工程范围内各片区旱季入渗量及入渗比例,结果见表3。工程范围内入流入渗较为严重的区域主要集中在泵站进水口、3号分区、5号分区、7-2号分区、11-1号分区和11-2号分区。工程范围内各地块旱天入流入渗总量约为25 415 m³/d,其中,泵站进水口及其附近的11-1号和11-2号分区存在集中的外水入流入渗,仅泵站进水口处的入流入渗量就高达10 500 m³/d,占入流入渗总量的41.3%,这是由于泵站区域存在暗管及雨水管道混接情况。其次是3号分区,旱天外水入流入渗量达到5 800 m³/d,主要是池塘内雨水混接入污

水管所致。此外,入渗量较高的区域还集中在5号、7-2号分区。5号分区入渗量由箱涵施工区内积水汇入管网所致。7-2号分区内存在较多截污干管沿河敷设,部分管道横穿河道,现场临测发现穿河后管道流量骤增,推测穿河管道可能存在破损情况,导致河湖水入渗。后续建议对上述入流入渗集中区域展开精细化勘察并辅助CCTV检测,找出问题管段并进行修复与改造。

表3 各排水分区旱季入渗比例

Tab.3 Dry season infiltration proportion of each drainage zone

分区编号	产污量/ (m ³ ·d ⁻¹)	旱天基本入渗量/ (m ³ ·d ⁻¹)	外来水比例/%
3	8 300	5 800	69.88
4	150	15	10.00
5	2 370	1 677	70.76
6	1 080	86	7.96
7-1	730	652	89.32
7-2	2 270	1 495	65.86
9-1	100	153	153.00
9-2	100	229	229.00
10	210	21	10.00
11-1	1 890	1 260	66.67
11-2	1 940	906	46.70
12-1	900	760	84.44
12-2	40	4	10.00
13	1 880	623	33.14
14	620	62	10.00
15-1	2 800	600	21.43
15-2	800	161	20.13
16	800	373	46.63
17	180	38	21.11
泵站附近	0	10 500	

4.2 降雨导致的入流入渗(RDII)

结合监测点旱天入流入渗情况,对各点位在监测期内2场降雨的RDII总量以及入流入渗率进行汇总统计,结果如表4所示。工程范围内雨季的RDII总量约为16 085.70 m³/d,其中5号、6号、7-1号、7-2号、11-1号分区降雨导致的入流入渗量及比例较高。通过调查发现,RDII量较高的区域,雨污混错接的情况较为严重,推测雨天污水管网的入流入渗主要是由排水管网混错接所致。对工程范围内的部分排水管网混错接点进行改造后,雨天污水处理厂进水流量大幅下降,排水管网诊断结果对管

网改造有较强的指导意义。

表4 各排水分区降雨导致的入流入渗情况
Tab.4 Infiltration caused by rainfall in each
drainage zone

分区编号	RDII量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	旱天日均污水 量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	入流入渗 率/%
3	1 252.82	8 295.00	15.10
4	36.37	153.00	23.77
5	2 098.90	1 993.43	105.29
6	1 565.00	1 080.00	144.91
7-1	1 426.29	727.00	196.19
7-2	1 773.07	2 270.00	78.11
9-1	612.00	381.50	160.42
10	158.00	210.00	75.24
11-1	1 899.24	2 739.50	69.33
11-2	195.00	1 940.00	10.05
12-1	209.40	887.90	23.58
12-2	4.00	40.00	10.00
13	1 053.56	1 875.05	56.19
15-1	724.96	2 800.00	25.89
15-2	1 260.42	800.00	157.55
16	1 201.52	800.20	150.15
17	615.15	284.60	216.15
总计	16 085.70	27 277.18	59.04

基于以上旱天入流入渗和RDII结果,结合现场作业面施工条件,优先对外水入流入渗较为集中的泵站进水口及其附近的11-1号和11-2号分区开展管网修复工作,同时对混错接较为严重的3号、5号和6号分区进行管网改造。以上工作完成后,污水处理厂进水COD浓度从80 mg/L以下升至103.7 mg/L,提高了29.63%以上。工程改造结果表明,基于在线水量水质监测的排水管网诊断方法对排水系统提质增效具有较好的工程指导效果。

5 结论

针对长江经济带某典型污水处理厂进水浓度低、污水处理负荷高的问题,采用在线水量水质监测方法进行排水管网系统监测与诊断,结果表明,研究区域的外水入流入渗情况较严重,旱天入流入渗总量为25 415 m^3/d ,雨季RDII量为16 085.70 m^3/d 。基于诊断结果对外水入流入渗严重的区域优先实施管网改造,改造完成后,污水处理厂进水COD浓度从80 mg/L以下提高至103.7 mg/L,工程效果较为明显。因此,基于在线水量水质监测的排水管网系

统诊断技术,为工期紧张或经费有限、无法开展全域管网检测与修复的项目提供了一种高效低成本的管网问题快速排查方法。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 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.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, 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): 593-599 (in Chinese).
- [3] LI B, YU W, XIE Y E, 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, 134: 105022.
- [4] WANG Y J, LI P P, LI J F, et al. The monitoring approaches and non-destructive testing technologies for sewer pipelines [J]. Water Science and Technology, 2022, 85(10): 3107-3121.
- [5] 王庆,刘黎慧,陈仁婧,等. 城市排水管网外水入流点溯源方法研究[J]. 给水排水, 2025, 51(3): 104-110.
WANG Qing, LIU Lihui, CHEN Renjing, et al. Research on source identification method for extraneous water inflow in urban drainage networks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(3): 104-110 (in Chinese).

作者简介:彭梦文(1991-),女,湖北孝感人,博士,高级工程师,主要从事长江大保护、水环境治理工作。

E-mail: peng_mengwen@ctg.com.cn

收稿日期: 2025-04-06

修回日期: 2025-04-20

(编辑:刘贵春)