

白加敏,王经波,李长芳,等.基于水量和水质监测的污水处理厂外水入侵分析[J].净水技术,2025,44(1):114-119.

BAI J M, WANG J B, LI C F, et al. Analysis of external water intrusion of WWTP based on wastewater quantity and quality monitoring [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 114-119.

基于水量和水质监测的污水处理厂外水入侵分析

白加敏¹,王经波¹,李长芳^{1,*},王庆娇¹,王强²

(1.深圳环境水务集团有限公司,广东深圳 518000;2.上海铂尔怡环境技术股份有限公司,上海 201203)

摘要 【目的】为分析南方某污水处理厂雨天进厂水量上升和进厂污染物浓度下降的现象,并溯源其外水入侵原因,为其他地区污水处理厂优化调度提供指导实践。【方法】分别对该厂东西两侧进厂主干管进行水量和水质监测分析,其中,为提高测量精度以及适应管网不同运行状况,采用德国 NIVUS 集团的互相关流量计做实时流量分析并采集不同降雨条件及不同时段水样作水质监测。【结果】结果表明,雨天东侧进厂箱涵水量较晴天增长 56.0%,而西侧进厂主管雨天水量反而比晴天降低 19.1%,降雨时因东侧进厂箱涵瞬时流量和流速的增长,在汇集井处对西侧进厂主管来水造成了顶托作用。水量和水质监测结果显示,降雨期间东侧进厂箱涵水量的增加是污水厂进厂水量增加的直接原因。东西两侧进厂主管日流量在晴天占污水处理厂进厂水量的比例为 7:2,而在降雨期间该比例上升为 8:1,两侧进厂主管在降雨期间均存在污染物量损失,东侧进厂箱涵雨天大幅增长的水量得以处理,而西侧进厂主管则因顶托作用,污水无法收集进厂导致进厂污染物量大幅减少。【结论】因此,从整体污染减排的角度,降雨期间应优先保障西侧污水进厂,同时优化降雨期间污水厂进厂调度规则,在保证西侧进厂主管污水全量收集进厂的前提下,合理调度东侧箱涵来水泵站。

关键词 水量和水质监测 外水入侵 顶托作用 合理调度 污染减排

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)01-0114-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.01.014

Analysis of External Water Intrusion of WWTP Based on Wastewater Quantity and Quality Monitoring

BAI Jiamin¹, WANG Jingbo¹, LI Changfang^{1,*}, WANG Qingjiao¹, WANG Qiang²

(1. Shenzhen Water and Environment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. Shanghai BIOENV Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract [Objective] In order to analyze the phenomenon of the increase of influent and the decrease of influent pollutant concentration in a wastewater treatment plant (WWTP) in southern China, and to trace the causes of external water invasion, so as to provide guidance and practice for optimizing the scheduling of WWTPs in other regions. [Methods] The water quantity and quality of the main influent pipes from the east and west sides of the WWTP were monitored and analyzed respectively. To improve measurement accuracy and adapt to different operating conditions of the pipeline network, a cross-correlation flowmeter from the German NIVUS group was used for real-time flow analysis, and water samples were collected for water quality monitoring under different rainfall conditions and different time periods. [Results] The results showed that the water volume of the box culvert entering the WWTP on the east side increased by 56.0% compared to sunny days, while the water volume of the main pipe entering the plant on the west side decreased by 19.1% compared to sunny days. The increase of instantaneous flow rate and velocity of the east inlet box culvert during rainfall caused a jacking effect on the incoming water from the main pipe on the west side at the gathering well. The water quantity and quality monitoring results showed that the increase in water inflow into the east side box culvert during rainfall was the direct reason for the increase capacity of the WWTP. The daily flow rate of the main pipes entering the WWTP on both sides of the east and west sides is 7:2 on sunny days, while during rainy days, this ratio increases to 8:1. During the rainfall, there was pollutant loss in the main pipes entering the WWTP

[收稿日期] 2023-11-14

[作者简介] 白加敏(1993—),女,硕士,研究方向为水污染治理与污水处理厂技术改革,E-mail:2412594689@qq.com。

[通信作者] 李长芳(1986—),女,硕士,研究方向为供排水管网运维管理及系统优化,E-mail:619617488@qq.com。

on both sides. The influent of the box culvert on the east side which increased significantly on rainy days was treated, while the influent entering the west side was unable to be collected into the WWTP due to the jacking effect, resulting in a significant reduction in the amount of incoming pollutants. [Conclusion] Therefore, from the perspective of overall pollution reduction, priority should be given to ensuring that the wastewater on the west side enters the WWTP during the rainfall period. At the same time, the scheduling rules for the wastewater entering WWTP during the rainfall period should be optimized, and the water pump station for the inlet box culvert on the east side should be reasonably scheduled to ensure the full collection of wastewater from the main pipeline on the west side.

Keywords monitoring of water quality and quantity external water intrusion jacking effect reasonable controlling pollution reduction

“十四五”以来,我国排水系统建设已日臻完善,水环境质量明显好转,污水收集处理工作取得显著进步^[1]。但排水管网不完善、雨污分流不彻底、雨天大量雨水入侵污水系统、污水厂进厂污染物浓度偏低等问题仍然存在,由此导致的雨天污水溢流成为制约河流水质提升的关键因素^[2]。虽然,针对污水处理系统的问题诊断及提质增效研究已有进展^[3-4],但更精细化的流域及管网分区有待进一步识别管理。

1 研究背景

文章以南方某污水处理厂为研究背景,通过分析该厂外水问题为后续提质增效工作的目标制定和工作成效提供依据。研究区域位于中国南方某沿海城市,某污水处理厂设计总规模为 26 万 m³/d,总占地面积为 12.33 hm²(1 hm² = 10 000 m²),服务面积为 21.5 km²,服务人口约 130 万,出厂水质执行《城镇水质净化厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,污水处理采用传统厌氧/缺氧/好氧(AAO)处理工艺,深度处理采用微絮凝过滤,污水经处理合格后排放。该污水处理厂收集范围包含东西两侧区域,其中东侧收集范围内污水经两泵站提升后由尺寸为 1.5 m×1.9 m 的箱涵进厂,西侧由 d1500 主管重力流进厂,两侧进厂主干管在厂前汇集后进入厂内泵站。今年以来,该厂降雨期间的厂前溢流及雨天外水问题多次被外部单位通报,进厂氨氮浓度和收集量迅速下降。为系统地定量分析该厂雨天外水来源,指导下一步工作,对进厂主干管水量和水质开展了监测分析工作。

2 研究方法

2.1 监测方法

本次研究主要以分析污水处理厂进水与主干管的关系为主要目的,结合主干管的收集区域独立性,根据地理信息系统(GIS)分析和现场踏勘确定

布点监测方案。选取该污水处理厂进厂东西两侧污水主干管进行分析,两者拓扑关系如图 1 所示,分别为 ①西侧进厂主管,管径为 1.5 m;②东侧进厂箱涵,尺寸为 1.5 m×1.9 m,2 路污水最后汇入污水处理厂进水泵坑。

目前排水重力流系统流量监测主要采用超声波连续多普勒流量计、超声波脉冲多普勒流量计和超声波互相关流量计,几种流量计的准确性区别在于局部流速的监测精度以及局部速度和断面平均速度的关联性。结合本次监测对精度要求及现场实际情况,采用德国 NIVUS 集团的互相关流量计做流量分析,测量精度在±1%,流量计传感器用涨圈安装于管壁来水侧,在对应的井盖处固定好信号传输器用以记录数据^[5]。

本次水质监测指标为 COD_{Cr} 和氨氮, COD_{Cr} 采用重铬酸钾法,氨氮采用纳氏试剂分光光度法,具体方法见《水和废水监测分析方法》(第四版)^[6]。本次水质监测采用人工取样的方式,按照管网不同的运行工况,选取高、低峰期及晴雨天不同工况监测,同时,为避免偶然取样误差,每次取样时,同一点位均间隔 20 min 取 1 次,共取 3 次,3 次样混合为一个样品。具体如表 1 所示。

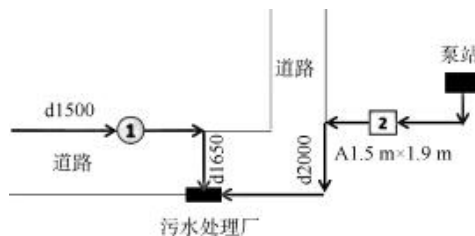


图 1 两进厂主干管拓扑关系

Fig. 1 Topological Relationship of Two Main Influent Pipes into the WWTP

2.2 分析方法

污染物量的计算如式(1)。

$$W = CV \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中: W ——某项水污染物总量, t ;

C ——该污染物质量浓度, mg/L ;

V ——水量, m^3 。

表 1 2 条进厂主管水质监测方案

Tab. 1 Monitoring Scheme of Water Quality of Two Main Influent Pipes into WWTP

取样日期	取样时间	取样点位
7月4日—7月7日,	05:00—07:00	①西侧进厂主管 d1500
7月19日	11:00—12:00	②东侧进厂箱涵 A;
	16:00—18:00	1.5 m×1.9 m
	22:00—24:00	

3 结果与讨论

3.1 2 条进厂主管特性分析

3.1.1 水量分析

从7月2日—31日连续1个月对东西两侧进厂主管进行水量监测,根据气象局数据,在此期间经历过3场降雨,分别是7月2日—4日、7月16日—19日以及7月29日—31日。如图2所示,晴天时,东侧进厂箱涵液位随用水高低峰期稳定变化,平均液位为1.32 m,降雨期间,箱涵内液位迅速增加,平均液位为3.68 m,增幅为179%。西侧进厂主管在晴天时平均液位为1.13 m,降雨期间平均液位为3.26 m,增幅为188%。从液位变化情况来看,降雨期间两侧进厂主管均存在外水入侵问题。

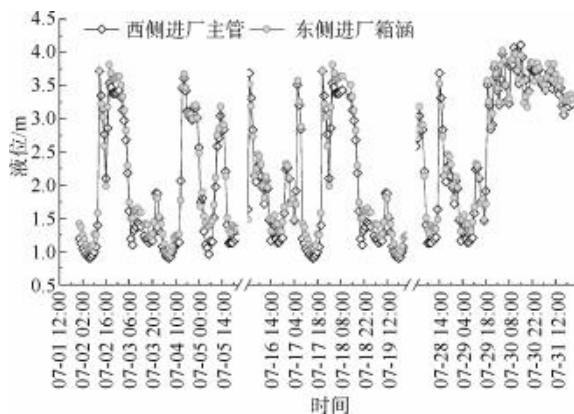


图 2 2 条进厂主管液位变化特性

Fig. 2 Variation Characteristics of Two Main Influent Pipes in Terms of Liquid Level

东西两侧进厂主管流量和流速变化情况如图3所示,降雨时东侧进厂箱涵水量大幅增长,进水瞬时流量从 $8000 m^3/h$ 增至 $14000 m^3/h$,流速从 0.9

m/s 增至 $1.4 m/s$;而西侧进厂主管进水瞬时流量由 $2500 m^3/h$ 降至 $2000 m^3/h$,流速从 $0.7 m/s$ 降至 $0.2 m/s$,日均流量降低 $19.1%$ 。经现场勘察,西侧进厂主管管底标高(黄海高程,下同)为 $0.84 m$,东侧进厂箱涵管底标高为 $0.88 m$,而两主管汇集并管底标高为 $0.88 m$,三者管底标高近乎相等。晴天时,东西两侧进厂主管充满度均低于 $20%$,西侧进厂主管流态顺畅。降雨期间,3处干管均满管运行,由于东侧进厂箱涵由泵站压力输送,其瞬时流量和流速的增长在汇集井处对西侧进厂主管来水造成了顶托作用。

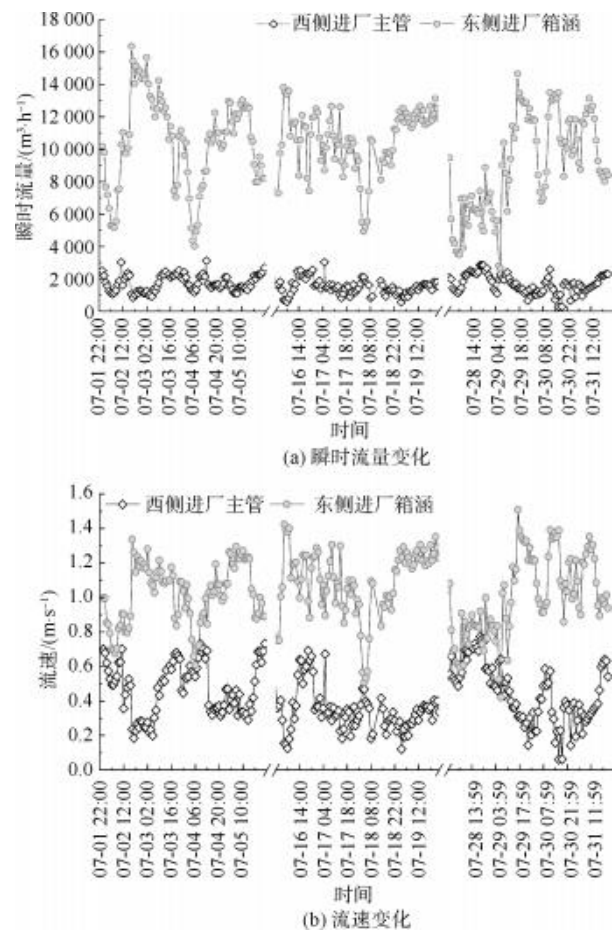


图 3 2 条进厂主管瞬时流量和流速变化特性

Fig. 3 Variation Characteristics of Two Main Influent Pipes in Terms of Instantaneous Flow Rate and Flow Velocity

为进一步验证降雨期间东侧进厂箱涵对西侧进厂主管的对冲顶托作用,选取7月18日(降雨量为 $91.5 mm$)进行分析(图4),当天从 $09:20$ 开始降雨, $17:30$ 结束,历时 $8 h$ 。根据东侧进厂箱涵所在泵站的启停记录及两进厂主管的水量变化发现,

10:00,当东侧进厂箱涵所在的两泵站停产后,箱涵内水量迅速减少,此时西侧进厂主管水量开始上升;15:00,当两泵站恢复运行时,西侧进厂主管水量下降,而东侧进厂箱涵水量上升。两侧进厂主管的水量在降雨期间呈现此消彼长的态势,从而证明,东侧进厂箱涵对西侧进厂主管存在对冲顶托作用。

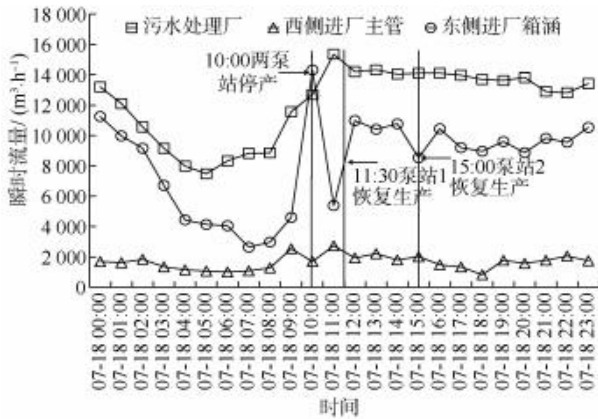


图4 7月18日两进厂主管与污水厂瞬时流量变化特性
Fig. 4 Variation Characteristics of Instantaneous Flow Rate of Two Main Inlet Pipes and WWTP on July 18th

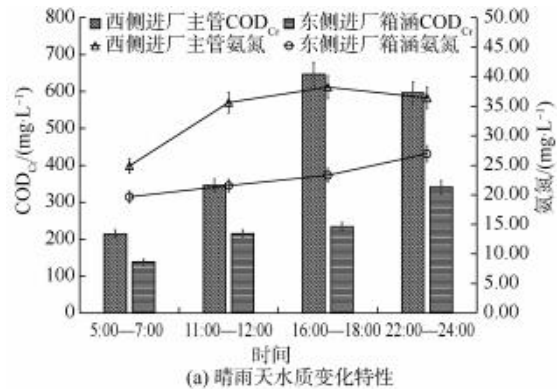
3.1.2 污染物量分析

两侧进厂主管的水质监测结果如图5(a)所示,东侧进厂箱涵 COD_{Cr} 和氨氮质量浓度在晴天时分别为 271.25 mg/L 和 24.77 mg/L;雨天时分别为 124.75 mg/L 和 15.66 mg/L,较晴天降幅分别为 54.0%和 36.8%。西侧进厂主管 COD_{Cr} 和氨氮平均质量浓度晴天时分别为 526.08 mg/L 和 35.63 mg/L;雨天时分别为 258.25 mg/L 和 28.78 mg/L,较晴天降幅分别为 50.9%和 19.2%。从晴雨水质浓度下降现象来看,2条进厂主管均存在雨天外水入侵问题,这也是造成污水处理厂降雨期间进厂污染物浓度下降的直接原因。

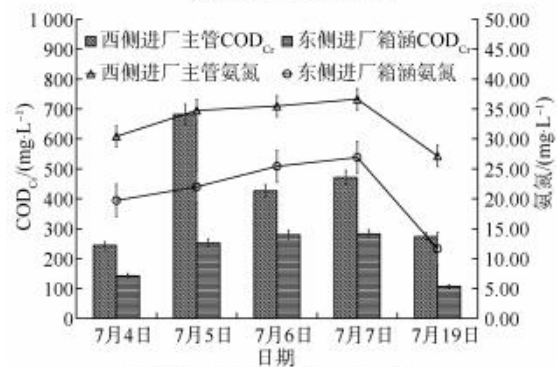
因降雨期间存在雨水入侵的混流管网内往往会携带泥砂、树叶等部分颗粒性杂质,这些物质会对水体 COD_{Cr} 含量的测定产生干扰,因此降雨期间的水质以氨氮作为定量计算依据。以氨氮作为基数分析两侧进厂主管污染物量,东侧进厂箱涵晴天污染物总量为 3.93 t/d,雨天污染物总量为 3.88 t/d,未收集污染物总量为 0.05 t/d。西侧进厂主管晴天污染物量为 1.67 t/d,而实际降雨期间的污染物量仅为 1.09 t/d,即使不考虑初雨污染,已存在 0.58 t/d 的污染物量未被收集,而实际漏排污染物更多,这部

分污水在降雨期间除管网液位升高所能调蓄部分以外,剩余水量必然经由联通点进入雨水管道从排口溢流出河或直接发生路面冒溢。从进厂污染物总量来看,东侧进厂箱涵雨天大幅增长的水量得以处理,抵消了其因水质下降所造成的污染物总量损失,因此污染物总量漏排率低。而西侧进厂主管由于受东侧箱涵的顶托作用,降雨期间污水无法收集进厂,水量和水质的双重下降作用导致其进厂污染物量大幅减少,加剧了其污染物总量损失。

晴天西侧进厂主管 COD_{Cr} 和氨氮较东侧进厂箱涵分别高 48.4%和 30.5%,雨天西侧进厂主管 COD_{Cr} 和氨氮较东侧进厂箱涵分别高 51.7%和 45.6%。进一步分析发现,西侧进厂主管的污染物浓度在晴雨天以及全天用水高低峰期均明显高于东侧进厂箱涵(图5),表明西侧进厂主管收集范围内管网系统相对完善,因此,应该合理调度两侧进厂水量比例,尤其是降雨期间,应将西侧因对冲顶管作用所损失的污水全量收集进污水处理厂处理,根据上文的估算,未处理污染物质量浓度(以氨氮计)约为 0.57 t/d。



(a) 晴雨水质变化特性



(b) 全天用水高低峰期水质变化特性

图5 两条进厂主管水质变化特性

Fig. 5 Variation Characteristics of Water Quality from Two Main Inlet Pipes

3.2 2条进厂主干管与污水处理厂关系分析

3.2.1 水量分析

2条进厂主干管与污水处理厂7月份平均日流量如表2所示,该污水处理厂7月份晴天平均处理水量为22.8万 m^3/d ,降雨期间平均处理水量为30.7万 m^3/d ,增幅为34.6%。西侧进厂主干管降雨期间日流量下降19.1%,而东侧进厂箱涵增加56.0%。东西两侧进厂主管日流量在晴天占污水处理厂进厂水量的比例为7:2,而在降雨期间此比例上升为8:1。通过与污水厂每日处理量对比,发现东侧进厂箱涵水量与污水厂进厂水量变化趋势近乎相同(图6)。因此,降雨期间东侧进厂箱涵水量的增加是污水厂处理水量增加的直接原因。

表2 2条进厂主干管与污水处理厂日流量

Tab. 2 Daily Flow of Two Main Influent Pipes and WWTP

污水来源	晴天/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	雨天/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	增幅
东侧进厂箱涵	15.9万	24.8万	56.0%
西侧进厂主管	4.7万	3.8万	-19.1%
污水处理厂	22.8万	30.7万	34.6%

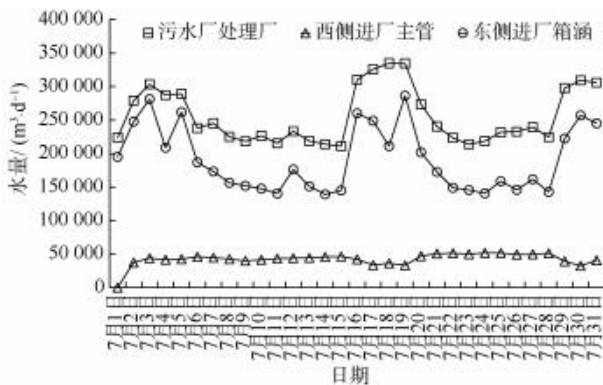


图6 2条进厂主干管与污水处理厂水量变化趋势

Fig. 6 Variation Trend of Water Quantity between Two Main Influent Pipes and WWTP

表3 2条进厂主干管与污水处理厂进厂水质

Tab. 3 Water Quality of Two Main Influent Pipes and WWTP

污水来源	晴天		雨天		增幅	
	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD_{Cr}	氨氮
东侧箱涵	271.25	24.77	124.75	15.66	-54.0%	-36.8%
西侧主管	526.08	35.63	258.25	28.78	-50.9%	-19.2%
污水处理厂	250.82	31.48	165.63	20.60	-34.0%	-34.6%

19.1%,主要原因为降雨时东侧来水箱涵瞬时流量和流速的快速增长在汇合并处对西侧来水造成了顶托作用,使得管内水量无法顺利进厂而在上游管网

3.2.2 污染物质分析

污水处理厂7月份进水 COD_{Cr} 和氨氮变化特性如图7所示,3次降雨期间的水质均大幅下降,其中, COD_{Cr} 和氨氮雨天较晴天的降幅分别为33.9%和34.6%,进厂氨氮降幅与东侧进厂箱涵氨氮降幅基本相同,其原因主要为降雨期间东侧进厂箱涵水量占污水处理厂进厂水量占比的增加(81%)以及西侧进厂主管受对冲作用使得进厂水量减少两方面。

2条进水主干管与污水处理厂的进水水质如表3所示,以氨氮为指标计算污染物质,得到晴天进厂污染物总量为7.18 t/d ,雨天进厂污染物总量为6.32 t/d ,由此计算,降雨期间存在0.86 t/d 的污染物质未进厂处理。经查阅该污水处理厂设计文件,降雨期间存在2万 m^3/d 的雨水进厂,按照研究者们^[7-8]初雨径流污染及衰减分析,这部分雨水的日均氨氮质量浓度为1 mg/L ,则由此估算得雨水污染物质量为0.2 t/d 。因此,降雨期间共存在1.06 t/d 的污染物损失,漏排率为15%。虽然降雨期间污水处理厂按峰值处理能力全量接收上游来水,但由于雨水挤占污水通道,使得污水厂处理了多余的雨水而使得本应进厂的污水未能全量处理,造成污水溢流风险。因此,进厂污水管网“挤外水”工作是当务之急。

4 结论与探讨

本文以分析污水处理厂降雨期间的外水入侵为目标,通过监测东西两侧进厂主干管水量和水质为手段,发现降雨期间污水厂进水水量大幅增加以及进厂浓度大幅下降,进而得出以下结论。

(1) 东侧进厂箱涵降雨期间日流量较晴天增长56.0%,西侧进厂主管降雨期间日流量较晴天降低

内调蓄和溢流。

(2) 两侧进厂主管在降雨期间均存在污染物质损失。东侧进厂箱涵雨天大幅增长的水量得以处

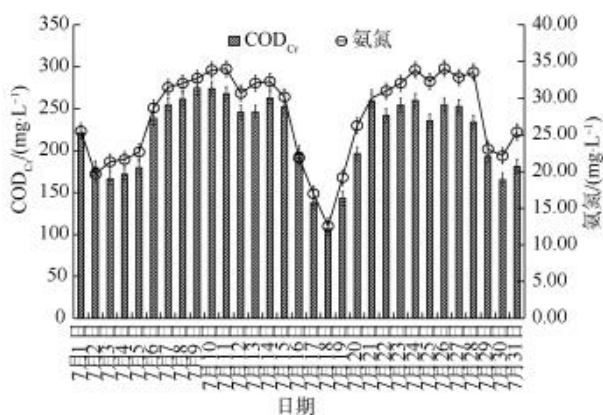


图7 污水处理厂7月份水质变化

Fig. 7 Variation of Water Quality of WWTP in July

理,而西侧进厂主管则因顶托作用,污水无法收集进厂导致进厂污染物质大幅减少。

(3)东西两侧进厂主管日流量在晴天占污水处理厂进厂水量的比例为7:2,而在降雨期间此比例上升为8:1。降雨期间东侧进厂箱涵水量的增加是污水厂进厂水量增加的直接原因。

污水处理厂作为排水管的最后一道防线,对于河流水质达标起兜底保障作用,而在现状运行前提下,通过优化调度规则提高污水处理厂的处理效能,从而对减少溢流污染至关重要。因此,下一步将继续开展以下研究工作。

(1)深度研究如何系统优化西侧主管进厂布局,提出可行性方案,避免东侧进厂箱涵来水对西侧进厂主管的对冲顶托作用,从整体污染减排的角度,西侧进厂主管降雨污水浓度高,应优先保障西侧污水进厂;同时优化降雨期间污水厂进厂调度规则,在保证西侧进厂主管污水全量收集进厂的前提下,合理调度东侧箱涵来水泵站。

(2)加大外水排查及整治力度,试点评估小区天面雨水立管影响程度。

参考文献

[1] 张伟, 潘芳, 张海行, 等. 污水处理提质增效“一厂一策”方案的编制思考 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 32-37.
ZHANG W, PAN F, ZHANG H X, et al. Reflection on the compilation of “one plant, one policy” scheme for quality and

efficiency improvement of sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 32-37.

[2] 李一平, 郑可, 周玉璇, 等. 南方城市污水处理系统效能评估与提质增效策略制定 [J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 50-57.
LI Y P, ZHENG K, ZHOU Y X, et al. Efficiency evaluation of a sewage system and strategy formulation of quality and efficiency improvement in city of Southern China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 50-57.

[3] 蒲贵兵, 谢天, 杨梅, 等. 重庆某城市污水处理系统雨污分流改造效果评价 [J]. 净水技术, 2023, 42(2): 77-84.
PU G B, XIE T, YANG M, et al. Effect evaluation of reconstruction for rainwater and wastewater separated system of a municipal wastewater treatment system in Chongqing [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2): 77-84.

[4] 王寅, 周传庭, 唐建国. 污水处理系统问题诊断及提质增效策略 [J]. 净水技术, 2021, 40(7): 75-78.
WANG Y, ZHOU C T, TANG J G. Problem diagnosis of wastewater treatment system and the strategies of quality and efficiency improvement [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 75-78.

[5] 王强. 厂站网河一体化项目液位和流量测量原理与实践 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
WANG Q. The principle and practice of water level and flow measurement in the integrated project of WWTP, pump station, sewage and river [M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2021.

[6] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*, State Environmental Protection Administration. *Methods for water and wastewater monitoring and analysis* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2002.

[7] 吴洋. 基于片区降雨与污染特征的初雨冲刷截流理论研究 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(11): 115-118.
WU Y. Study on the theory of initial rain scouring and interception based on regional rainfall and pollution characteristics [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(11): 115-118.

[8] 律启慧. 基于水质特征分析的大尺度区域雨水收集与利用技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
LÜ Q H. Research on the rainwater collection and utilization in large-scale region based on water quality characteristics [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.