

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.01.002

分流制排水系统降雨对污水处理厂运行的影响

王伟¹, 丁永伟¹, 尤岚¹, 黄继会¹, 马九利², 徐守强³

(1. 苏州市排水有限公司, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州苏水环境监测服务有限公司,
江苏 苏州 215100; 3. 南京水务集团有限公司, 江苏 南京 210002)

摘要: 降雨引发的入流入渗会使污水处理厂进水量大幅上升,并稀释排水系统收集的污水,造成进厂污染物浓度降低,进而影响污水处理效率。研究揭示了分流制污水管网在不同液位运行条件下,管道冲刷作用对COD、SS等污染物浓度的影响。在保持泵站管网恒液位条件下,降雨量在5~10 mm时,每1 mm降雨量对应水量增加3%~10%,且降雨量越大,增幅越明显。工艺模拟结果显示,降雨期间污水处理厂进水量增加,进水浓度下降,污泥向二沉池转移,出水污染物浓度呈上升趋势。峰值处理能力分析表明,在降雨条件下AAO工艺系统较改良型交替工艺系统更稳定。

关键词: 分流制; 低水位; 降雨; 污水管网; 工艺模型; 生物响应

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0009-07

Impact of Rainfall on Operation of Wastewater Treatment Plants in Separate Sewer Systems

WANG Wei¹, DING Yong-wei¹, YOU Lan¹, HUANG Ji-hui¹, MA Jiu-li²,
XU Shou-qiang³

(1. Suzhou Drainage Co. Ltd., Suzhou 215006, China; 2. Suzhou Su Shui Environmental
Monitoring Service Co. Ltd., Suzhou 215100, China; 3. Nanjing Water Group Co. Ltd., Nanjing
210002, China)

Abstract: Rainfall-induced inflow and infiltration can cause a significant increase in the influent volume of wastewater treatment plants(WWTPs), and dilute the collected sewage of the drainage system, resulting in a decrease in pollutant concentrations at the plant, which in turn affects the efficiency of wastewater treatment. Research has revealed the impact of pipeline scouring on the concentration of pollutants such as COD and SS under different liquid level operating conditions of a separate sewer network. Under the condition of maintaining a constant liquid level in the pump station and pipeline, when the rainfall was between 5 mm and 10 mm, each 1 mm of rainfall corresponded to a water volume increase of 3% to 10%, and the greater the rainfall, the more significant the increase. Simulation results of wastewater treatment processes showed that during rainfall, the influent volume of the WWTP increased, the concentration of influent quality decreased, sludge was transferred to the secondary sedimentation tank, which in turn affected the effluent quality. As the influent volume increased, the effluent concentration of the WWTP showed an upward trend. Peak capacity analysis indicated that the AAO process system of the WWTP was more stable under rainfall conditions compared to the modified

alternating process system.

Key words: separate system; low water level; rainfall; sewer network; process model; biological response

与合流制管网相比,分流制管网显著减少了雨水入侵量,从而提高了污水处理厂的运行效率,并显著降低了管网溢流及其对河流造成的污染风险。近年来,国内各地纷纷进行了大量的雨污分流工作,并取得了显著的成效^[1]。然而,尽管分流制污水管网在设计和运行上具备诸多优势,但仍不可避免地会面临外水入渗、入流的问题,其中雨水(径流)入侵是主要的挑战之一^[2]。雨水通过雨水口以及管道连接破损处等流入管网,例如长三角某市老城区的分流制管网在旱季和雨季时,外来水占比分别为22%和43%^[3],这意味着在雨季,管网中的外来水量接近甚至超过收集的原污水量,导致污水被稀释。

自20世纪90年代起,苏州中心城区开始实施截污工程,兴建污水处理厂,特别是2004年以来结合城中村改造、街巷改造等工程,实施了大规模的雨污分流改造,截至2012年底基本形成了以雨污分流为主、局部少量合流的排水系统。苏州地区属于亚热带季风海洋性气候,年均降雨量高达1 100 mm,主要集中于夏季,这种气候特点给厂站一体化调度工作带来严峻挑战^[4]。雨季对污水处理厂的影响主要体现在两个方面:一是降雨量增加导致污水处理厂处理负荷上升;二是水量增加和水质变化影响生物处理单元的稳定性^[5]。为了应对这些挑战,研究雨季期间分流制污水管网水量及水质变化至关重要,这不仅有助于评估污水处理厂的处理负荷,还能在日常运行和未来扩容提供科学依据。此外,通过污水工艺模型模拟不同降雨强度对生物处理单元的影响,并分析处理负荷与出水水质之间的动态响应,可以更准确地评估降雨对运行的影响,为污水处理厂的运营管理提供科学指导。

1 研究对象

1.1 污水处理厂

苏州某城镇污水处理厂的服务面积为46.10 km²,一期、二期生物池分别采用AAO工艺、改良型交替式工艺,设计规模分别为6×10⁴、12×10⁴ m³/d,出水水质执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)

标准。AAO工艺分2组,每组共15格生物池,设计时提供多点进水(第1、3、5格),内回流渠道共有4个回流点(硝化液可根据需求选择切换至第1、3、5、7格),如图1所示。设计水力停留时间为18.18 h,泥龄为15 d,负荷为0.067 kgBOD₅/(kgMLSS·d)。

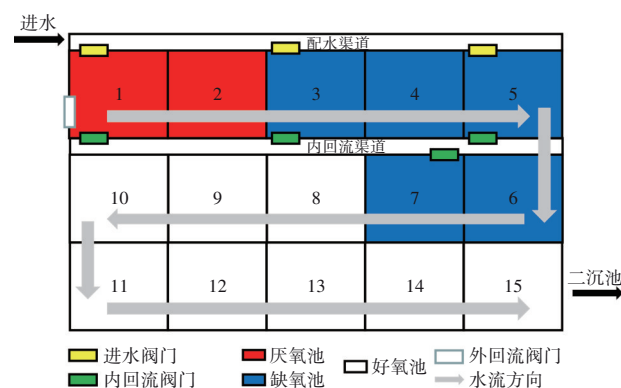


图1 AAO工艺平面布置

Fig.1 Plan of AAO process

改良型交替式工艺共设4组,每组分隔成5格顺序连通的矩形反应池(见图2)。设计水力停留时间为23.5 h,泥龄为18.9 d,负荷为0.053 kgBOD₅/(kgMLSS·d)。厌氧池与缺氧池、连续好氧池与边池之间通过隔墙底部开孔连通;缺氧池至连续好氧池和厌氧池通过回流泵实现混合液流动;边池到缺氧池通过边池末端底部闸阀控制;剩余污泥由边池两侧的剩余污泥泵定期排放。

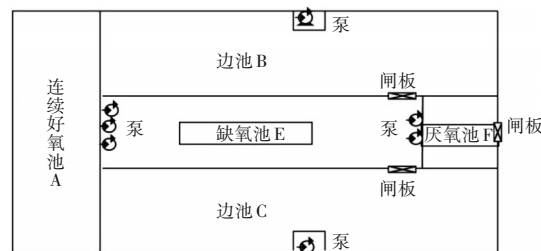


图2 改良型交替式工艺平面布置

Fig.2 Plan of modified alternating process

1.2 污水泵站区域

选取污水处理厂上游末端某污水泵站服务区域作为研究对象,该泵站服务面积为1.28 km²,进水管管径为600 mm,管底黄海标高为-2.1 m,配备4台提升泵,提升水量为4 600 m³/d。

2 研究方法

2.1 不同液位对管网水质和流量的影响

通过人工采集泵站集水井在液位降低后 90 min 的水样进行水质分析,包括 COD、SCOD(溶解性 COD)、SS、TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 STN(溶解性 TN)等,探究经管道冲刷后的水质变化。通过控制泵站提升泵的启停和运行频率使管网在不同低液位运行,收集分析不同液位条件下泵站流量计的数据,分析流量变化规律。

2.2 降雨对管网水质和流量的影响

收集降雨期泵站集水井的 COD、SCOD、SS、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TP 数据以及降雨量,分析降雨对管网水质的影响;收集分析旱季及雨季泵站服务片区的用水量、污水处理厂容纳污水量以及污染物负荷,以污染物负荷的变化估算污水处理厂的增产扩容量。

2.3 模拟降雨对污水厂生物处理系统运行的影响

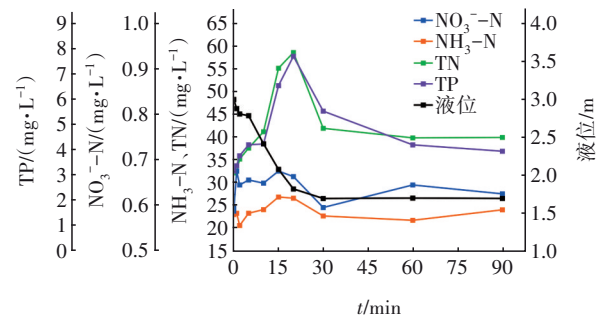
采用 BioWin 工艺软件搭建污水处理厂工艺仿真模型,基于污水处理厂的实际运行数据,对其进行校正。采用芝加哥雨型模拟单次不同降雨强度下的降雨量,分析污水处理厂进水水质(COD、SS、TN 和 TP 浓度)、生物处理系统的出水水质(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP)和系统内污泥转移(SS 和二沉池底部污泥浓度 MLSS_0)的动态响应。同时考察降雨条件下,污水处理厂生物处理系统可接受的最大处理能力。

3 结果与讨论

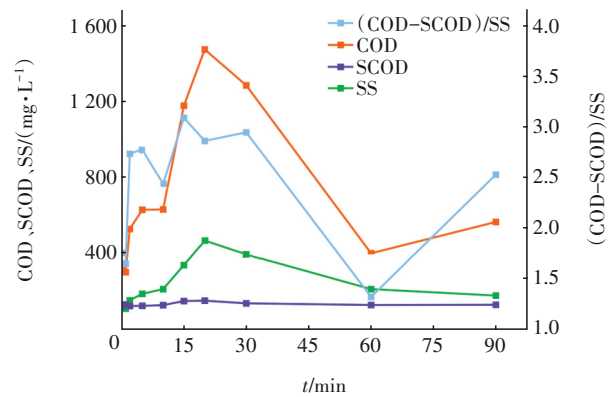
3.1 泵站液位和降雨对管网水质和流量的影响

3.1.1 运行液位对管网水质的影响

对泵站进行了恒液位调整,将液位从 3.0 m 降至 1.7 m。调整后的 90 min 内水质变化如图 3 所示。随着液位的降低,TN、TP、SS 和 COD 浓度在初期出现较大波动后逐渐稳定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 波动较小,但最终也趋于稳定;SCOD 浓度基本保持不变。值得注意的是,(COD-SCOD)/SS 值较高,且波动较大,这表明管网运行液位的降低增加了污水流速,水流对沉积物的剪切力随之增强,这破坏了管网沉积物的稳定性,导致部分沉积物中的污染物被冲刷出来。其中,COD 的增加主要来自非溶解性固体污染物。当剪切力与沉积物的抗剪切力达到平衡时,水质开始稳定^[6]。



a. 氮、磷浓度及液位随时间的变化



b. 有机物及 SS 浓度随时间的变化

图3 液位由 3.0 m 降为 1.7 m 后 90 min 内水质随时间变化
Fig.3 Change curve of water quality over time within 90 minutes after the liquid level is adjusted from 3.0 m to 1.7 m

3.1.2 运行液位对管网流量的影响

在不同的恒液位设置下,泵站的旱天流量保持相对稳定,管网运行液位的调整对流量的影响并不显著(见图 4)。这一现象表明该区域排水管网密闭性较好,旱天外来水量较少。

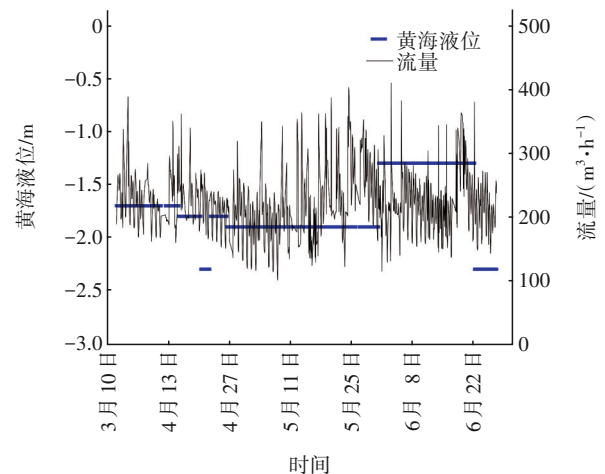


图4 不同恒液位条件下旱天典型日的流量变化
Fig.4 Flow rate variation under different constant liquid level conditions on a typical dry day

3.1.3 降雨对管网水质的影响

对6月1日—9月29日期间泵站集水井水质进行了测定,随着降雨的持续,雨水进入污水管网,其稀释作用使得污染物浓度下降^[7-8]。其中,旱天的COD、SCOD、NH₃-N、TN、TP、SS浓度为330、118、37.4、45.2、5.30、131 mg/L,雨天的为236、94、25.4、33.4、3.06、94 mg/L,降幅分别达28.5%、20.3%、32.1%、26.1%、42.3%、28.2%。从COD/TN(7.30→7.07,降幅为3.2%)和(COD-SCOD)/SS(1.62→1.51,降幅为6.7%)来看,雨天泵站水质浓度降低主要由雨水的稀释作用导致,而外来无机颗粒影响较小。

3.1.4 恒液位条件下降雨对管网水量的影响

选取6月1日—8月30日典型日雨天和旱天泵站的流量进行对比分析。结果表明,6月26日降雨5.7 mm,日流量为5 782 m³;8月3日降雨7.3 mm,日流量为7 630 m³;8月21日降雨10.5 mm,日流量为10 048 m³。三场次雨天流量分别较早天平均流量(4 944 m³/d)增加16.9%、54.3%和103.2%。在保持泵站管网恒液位(-2.30 m),且降雨量在5~10 mm时,每1 mm降雨量对应水量增加3%~10%,且降雨量越大增幅越明显。假设降雨期流量与服务面积同比例增加,由此推算,每1 mm的降雨量将给污水处理厂增加3%~10%的进水负荷。

3.2 降雨对生物处理系统的动态响应模拟

生物处理系统是大多数污水处理厂的核心处理单元,负责去除污水中的有机物、N、P等污染物,对污水处理厂的出水水质起着决定性作用^[9]。降雨会导致大量雨水流入污水管网,这种突发水量增加和水质变化对生物处理系统的稳定性和效率有显著影响^[10]。为了从理论上理解不同降雨强度对污水处理厂进水状况和生物处理系统的影响,以BioWin软件为平台,采用ASDM模型描述污水处理系统对碳、氮、磷的去除过程,采用Takacs一维模型描述二沉池内固液分离过程。

采用污水处理厂历史数据对模型进行校准,拟合主要出水水质指标和生化池内污泥浓度变化情况。其中,运行参数(内回流量、污泥回流量、进水配比、曝气量、泥龄等)依据污水处理厂实际运行情况设定。通过物化试验方法确定污水处理厂主要进水特征参数,其中,易生物降解COD占总COD的比例为35%,溶解性不可生物降解COD占5%,颗粒

性不可生物降解COD占20%。动力学参数氨化细菌最大比生长速率由默认值0.9 d⁻¹校准为0.7 d⁻¹。图5展示了典型日降雨量为10.5 mm时污水处理厂的进水流量和水质。将AAO工艺实际运行数据与校准后的模型模拟值进行对比,结果表明,出水COD、NH₃-N、TN、TP、SS以及反应池内污泥浓度均拟合较好。

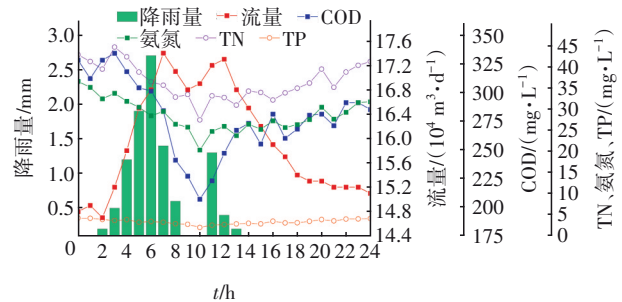
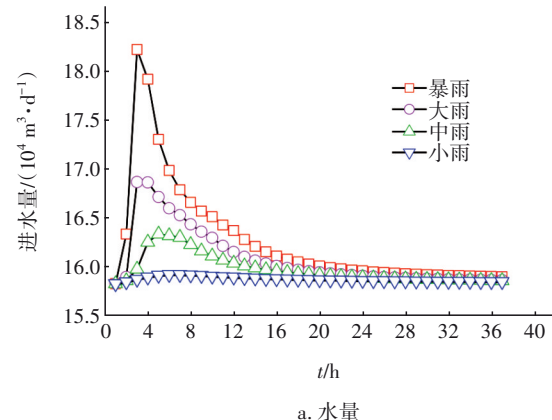


图5 降雨期间污水处理厂进水水量和水质

Fig.5 Influent flow rate and water quality of wastewater treatment plant during rainfall periods

3.2.1 降雨对进水水质和水量的影响

图6展示了不同降雨条件下污水处理厂进水量和水质(以SS为例,其他指标变化趋势与之相似)的变化。由图6(a)可知,降雨开始后,污水处理厂的进水量迅速上升,在较短时间内达到峰值;随着降雨的持续,水量逐渐减少,最终回落至非降雨条件下的正常水平;此外,降雨强度越大,污水处理厂的进水量增加越显著,且流量峰值出现的时间也越早。同时,污水厂进水中的COD、SS、TN和TP浓度在进水量增大时逐渐降低,随后随着进水量的减少又逐渐升高,并最终稳定至旱季的正常水平。这种变化主要由稀释效应引起。随着降雨强度的增加,稀释作用更加明显,导致污染物浓度达到最低值的时间缩短。



a. 水量

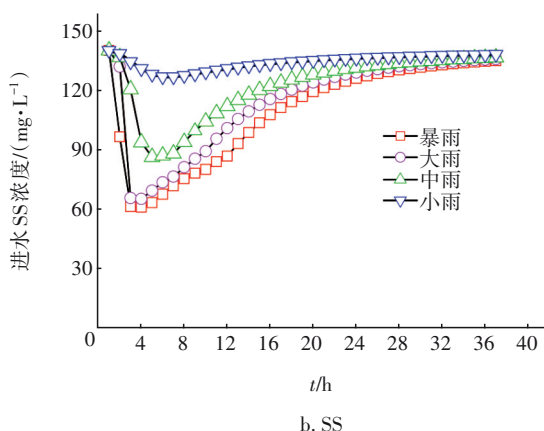


图6 不同降雨强度下污水厂进水水量和水质的动态波动

Fig.6 Dynamic fluctuations of inflow volume and water quality at WWTP under different rainfall intensities

3.2.2 降雨对生物处理系统出水水质的影响

图7显示了在不同降雨强度下污水处理厂AAO系统的动态响应(以COD为例)。在进水瞬时冲击作用下,生物处理系统的出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度瞬时升高;受降雨期间持续低浓度进水的影响,出水浓度逐渐降低;随着时间的推进,出水浓度逐渐恢复至非降雨时的正常水平。此外,降雨强度越大,降雨对生物系统的冲击影响越显著,出水水质的这种波动特性增强。

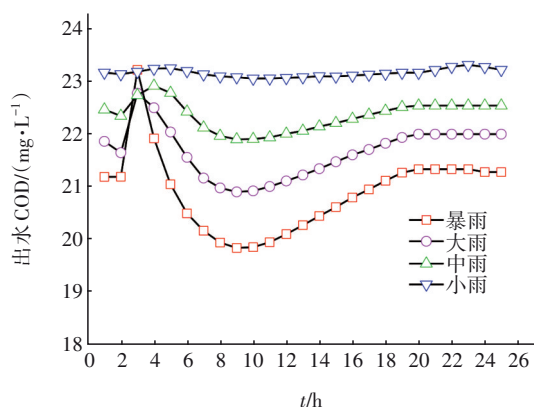


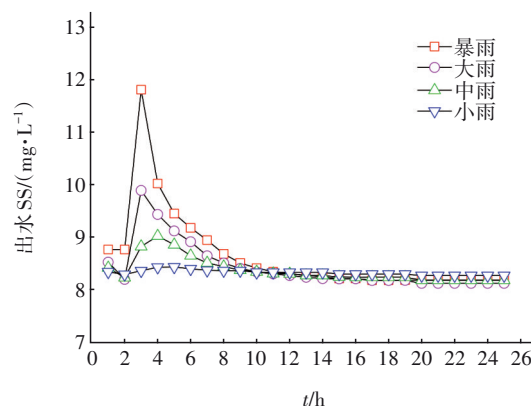
图7 不同降雨强度下污水处理厂出水COD的变化

Fig.7 COD of effluent from biological treatment system under different rainfall intensities

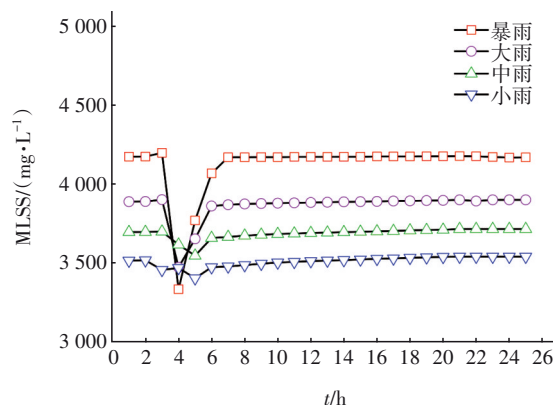
3.2.3 降雨对生物处理系统内污泥转移的影响

在降雨条件下,出水SS和 MLSS_u 浓度首先上升随后下降,而生物池内的污泥浓度(MLSS)则呈现先下降后上升并恢复的趋势(见图8)。这种变化是由于降雨对生物处理系统中生物固体通量和分布产生了影响。随着流量的增加,二沉池所承受的固体负荷也增加。如果在降雨期间,污泥回流比(RAS)

保持不变(与旱季相同),则沉淀池中的固体开始积累,导致越来越多的生物量转移到沉淀池,这会使得生物处理系统的污泥浓度下降,同时二沉池底部污泥浓度和出水SS浓度上升,从而在生物处理系统中产生显著的生物量转移现象。



a. 出水SS



b. MLSS

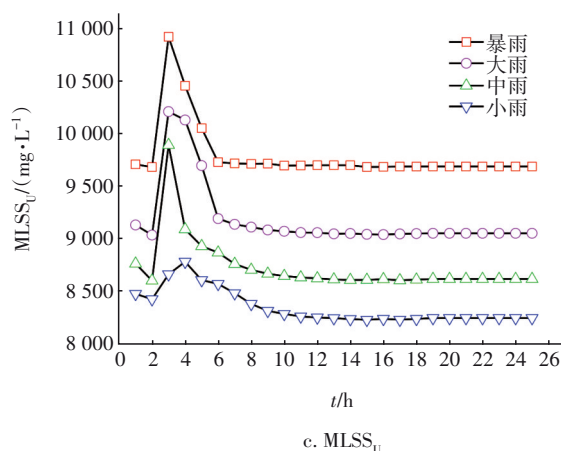
c. MLSS_u

图8 不同降雨强度下生物处理系统内的污泥转移

Fig.8 Sludge transfer within biological treatment system under different rainfall intensities

降雨模型的模拟结果显示,在降雨期间污水厂的进水量会迅速增加,同时进水COD、SS、TN和TP

浓度会降低,这可能对污水厂的稳定运行造成不利影响。增加的进水负荷首先会导致污泥向二沉池转移,引起出水水质的波动,表现为出水污染物浓度先下降后升高。此外,有效生物量的减少可能会降低有机物的降解速率,进而影响污水处理效率。进水水质的波动对生物处理系统的稳定性构成冲击,因为有机物是微生物生长和代谢的主要能量来源,进水COD浓度的降低可能抑制微生物的活性和生长速率,导致生物降解速率下降^[11]。为改善这一状况,在短期内可以通过调整生物处理系统的操作参数(如污泥回流量、曝气量或泥龄等)来实现;就长期而言,应考虑对污水处理厂的设计和运行策略进行调整,以适应雨季和旱季不同的运行条件。

3.3 降雨条件下污水厂的峰值处理能力

降雨以稀释进水污染物浓度为主,因此降雨条件下的运行关键是确定污水处理厂的峰值处理能力。为了考察降雨条件下,污水处理厂生物处理系统最大可接受的处理能力,对两组工艺在不同进水负荷下的主要出水水质指标进行模拟,结果见图9。

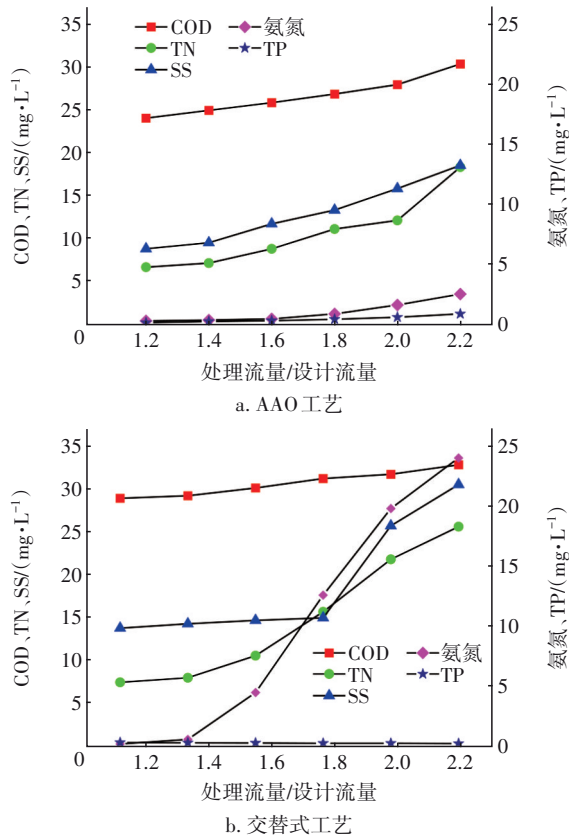


图9 处理负荷对出水水质的影响

Fig.9 Impact of different treatment loads on effluent quality

当进水量负荷超过1.4时,改良型交替式系统的出水水质将显著下降,尤其是NH₃-N浓度上升显著。相比之下,AAO系统更加稳定。但是整体上,随着进水量的增大,各工艺主要出水指标浓度呈升高趋势。因此,虽然污水处理厂的生物处理系统具有一定的超负荷工作能力,但过高的负荷会导致出水水质显著下降。

综上所述,在分流制排水系统中,降雨导致的外水入流对污水系统具有重要影响,因此提出以下建议:①持续推进分流制污水管网的查漏修复,保障管网的密闭性,从源头削减外来水的入流。②为减少降雨期间污水外溢风险,提高污水处理效能,污水处理厂在不扩建的基础上增加处理能力是较为经济的途径,可通过改造部分构筑物 and 工艺参数来实现^[12]。如针对生化池污泥流失现象,可利用厂内污泥浓缩池等污泥暂存设施对生化池进行污泥补充,或是临时投加絮凝剂以改善二沉池污泥沉降性能;生化池采用多点进水,部分可直接进入好氧段,同时提高污泥回流量,配合调整工艺参数保障水质达标^[13]。

4 结论

① 在污水管网密闭性较好的条件下,运行液位的降低在短时间内(0~30 min)引起管道冲刷作用,导致污水处理厂相应时间内进水COD、SS等非溶解性水质浓度的增加。

② 降雨对管网水质的影响以稀释为主,在保持泵站管网恒液位,且降雨量在5~10 mm时,每1 mm降雨量对应水量增加3%~10%,且降雨量越大,增幅越明显。

③ 在降雨期间,污水处理厂的进水量会在短时间内增大,进水COD、SS、TN和TP浓度会下降。增加的进水负荷导致污泥向二沉池转移,引起出水水质的波动(浓度先下降后升高),且生物处理系统的有效生物量减少。

④ 在降雨引起进水量增加的条件下,AAO工艺系统的处理效果比改良型交替工艺更稳定。

参考文献:

- [1] 王浩正,冯宇,孙文超,等.城市排水系统模型综述[J].中国给水排水,2021,37(22):1-10.
WANG Haozheng, FENG Yu, SUN Wenchao, et al. Review of urban drainage system models [J]. China

- Water & Wastewater, 2021, 37 (22): 1-10 (in Chinese).
- [2] 李丹琳,郭帅,黄荣敏,等. 基于供排水一体化监测的污水管网外来水入侵风险评估[J]. 环境工程, 2023, 41(11): 39-45.
- LI Danlin, GUO Shuai, HUANG Rongmin, *et al.* Risk assessment of extraneous water in sewage systems based on integrated monitoring of water supply and drainage systems [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (11): 39-45(in Chinese).
- [3] WANG X T, YAO Y, ZHOU W, *et al.* Quantification of inflow and infiltration in urban sewer systems based on triangle method [J]. Water Pollution and Treatment, 2019, 7(4): 152-159.
- [4] 徐勇,王谦,高晓平,等. 苏州市1988—2017年降雨特性变化分析[J]. 江苏水利, 2021(2): 51-54.
- XU Yong, WANG Qian, GAO Xiaoping, *et al.* Analysis of rainfall characteristics in Suzhou from 1988 to 2017 [J]. Jiangsu Water Resources, 2021 (2): 51-54 (in Chinese).
- [5] WILÉN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, *et al.* Rain events and their effect on effluent quality studied at a full scale activated sludge treatment plant [J]. Water Science and Technology, 2006, 54(10): 201-208.
- [6] 刘丹. 污水管网汇流段水力变化对污染物的运移影响特性[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
- LIU Dan. Influence Characteristics of Hydraulic Variation on Pollutant Transport in Confluence of Sewage Pipe Network [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020(in Chinese).
- [7] 张明凯. 基于污染物过程线模型的污水管网水量水质动态模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
- ZHANG Mingkai. Research on Dynamic Variation of Wastewater Quantity and Quality in Sewer System Based on Pollutant Hydrograph[D]. Beijing:Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [8] 孟涛,崔慧萍,郭士涛. 分流制雨水管网滞留污染物的估算研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 105-109.
- MENG Tao, CUI Huiping, GUO Shitao. Estimation of retained pollutants in separate rainwater pipeline network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (9): 105-109(in Chinese).
- [9] ZLATEVA P. Sliding mode control of wastewater treatment process with activated sludge under extreme weather events [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 776(1): 1-8.
- [10] 吉芳英,周峰,范剑平,等. 降雨过程对污水处理厂无机颗粒物特性及活性污泥的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 4643-4648.
- JI Fangying, ZHOU Feng, FAN Jianping, *et al.* Influence of rainfall process on inorganic particle characteristics and activated sludge in wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 4643-4648(in Chinese).
- [11] 吉芳英,高茜,袁春华. 温度和COD对SBR反硝化同时除磷系统除磷能力的影响[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(6): 30-33.
- JI Fangying, GAO Qian, YUAN Chunhua. Effect of temperature and COD on ability of denitrifying phosphorus removal in SBR [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(6): 30-33(in Chinese).
- [12] 尹华升,陈雷,刘文举,等. 污水处理厂提升雨季处理能力控制溢流污染案例[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 87-93.
- YIN Huasheng, CHEN Lei, LIU Wenju, *et al.* Case project of WWTP for improving the processing capacity in rainy season to control overflow pollution [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 87-93(in Chinese).
- [13] 付尧,张丽婷,苏大雄. 多重叠组工艺用于污水厂原址准IV类提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39 (24): 87-92.
- FU Yao, ZHANG Liting, SU Daxiong. Multi-overlapping process for upgrading and expansion of wastewater treatment plant to surface water quasi IV discharge standard within the existing land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24): 87-92(in Chinese).

作者简介:王伟(1990-),男,江西吉安人,硕士,工程师,主要从事污水处理技术研究工作。

E-mail:827753772@qq.com

收稿日期:2024-08-23

修回日期:2024-10-12

(编辑:李德强)