

梁振声, 黄韬, 黄晓东, 等. 高速公路服务区污水的高波动特征与优化调控[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 98-104, 130.

LIANG Z S, HUANG T, HUANG X D, et al. Characteristics and optimized control for high variability of wastewater in expressway service areas[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 98-104, 130.

高速公路服务区污水的高波动特征与优化调控

梁振声^{1,2}, 黄韬¹, 黄晓东³, 黎新才³, 陈聪凝⁴, 江峰^{1,*}

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 水污染低碳治理技术广东省工程研究中心, 广东广州 510275; 2. 广东第二师范学院生物与食品工程学院, 广东广州 510310; 3. 广东广乐高速公路有限公司, 广东广州 510180; 4. 广东省交通集团有限公司, 广东广州 510100)

摘要 【目的】低维护分散型水处理技术与装备是全球工程开发前沿领域, 而高速公路服务区污水处理系统作为典型的低维护、分散型污水处理设施, 其污水的稳定处理与达标排放一直是极具挑战的工程难题。【方法】文章通过长期连续的现场监测以揭示其污水处理效率低和系统稳定性差的原因, 并基于人工智能算法建立的数学模型提出可行的解决方案。【结果】监测结果显示, 服务区污水的水量和水质呈显著高波动特征, 水量和水质的日波动系数分别高达 5.2 倍和 2.3 倍, 特别是进水氨氮峰值质量浓度及其负荷日变化系数分别达到 220 mg N/L 和 9.9 倍。高浓度氨氮衍生的有毒物质自由氨质量浓度可达 97 mg N/L, 显著抑制污水处理系统的微生物活性, 导致系统的氨氮去除能力下降了 94%, 并对系统造成持续性的负面影响, 这是导致系统稳定差和处理效率低的关键原因。为此, 解决问题的关键在于控制高浓度自由氨对生物系统的冲击。数据分析显示, 服务区污水中的氮主要源自厕所尿液污水, 其中男厕尿液污水贡献可达 54%, 但其水量贡献率仅为 17%。基于所建立的污水水量和水质预测模型的模拟结果显示, 尿液污水的分离调蓄与预处理调控方法能够有效降低自由氨的瞬时峰值浓度及波动幅度, 有望减轻自由氨对微生物活性的抑制作用。【结论】文章为我国高速公路服务区污水处理系统的升级改造提供了切实可行的解决方案, 为解决达标排放的难题提供了新的思路。

关键词 高速服务区污水 高氨氮 高波动 特征解析 优化调控

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0098-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.011

Characteristics and Optimized Control for High Variability of Wastewater in Expressway Service Areas

LIANG Zhensheng^{1,2}, HUANG Tao¹, HUANG Xiaodong³, LI Xincan³, CHEN Congning⁴, JIANG Feng^{1,*}

(1. Guangdong Provincial Key Lab of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science & Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Biological and Food Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China;

3. Guangdong Guangle Expressway Company Limited, Guangzhou 510180, China;

4. Guangdong Provincial Transportation Group Co., Ltd., Guangzhou 510100, China)

Abstract [Objective] Low-maintenance, decentralized water treatment technologies and equipment are a frontier area in global engineering development, and the wastewater treatment systems in expressway service areas serve as typical examples of such low-maintenance, decentralized facilities, where achieving stable treatment and compliance with discharge standards has remained a substantial engineering challenge. [Methods] This paper introduced the causes of poor system stability and low efficiency in these systems through long-term continuous on-site monitoring. Furthermore, feasible solutions were proposed utilizing a mathematical model

[收稿日期] 2024-12-18

[基金项目] 广东省交通集团委托科研项目技术研发课题(HT-99982020-0234); 广东省城市水系统管理与治理技术国际联合研究中心(2021A0505020010)

[作者简介] 梁振声(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为水污染控制, E-mail: liangzhsh3@mail.sysu.edu.cn。

[通信作者] 江峰(1980—), 男, 教授, 研究方向为水污染控制, E-mail: jiangf58@mail.sysu.edu.cn。

established with artificial intelligence algorithms. [Results] The monitoring result revealed significant variability in both the quantity and quality of wastewater, with daily variability coefficients as high as 5.2 fold for quantity and 2.3 fold for quality. Specifically, the peak ammonia nitrogen mass concentration and its daily load variation coefficient reached 220 mg N/L and 9.9 fold, respectively. The mass concentration of free ammonia, resulting from high ammonia nitrogen levels, could peak at 97 mg N/L, severely inhibiting microbial activity within the treatment system and leading to a 94% reduction in ammonia nitrogen removal capacity. This sustained negative impact was a critical factor contributing to the system's instability and low treatment efficiency. Thus, the key to resolving these issues lay in controlling the impact of high concentrations of free ammonia on biological systems. Data analysis indicated that nitrogen in service area wastewater predominantly originated from toilet urine, with male toilet urine contributing up to 54% of the nitrogen load, while accounting for only 17% of the total water volume. Simulations results based on the established wastewater quantity and quality prediction model indicated that the separation, storage and pretreatment regulation methods of urine wastewater could effectively reduce both the instantaneous peak concentrations and variability amplitudes of free ammonia, thereby mitigating its inhibitory effects on microbial activity. [Conclusion] This paper provides practical and feasible solutions for the upgrading and reconstruction of wastewater treatment systems in expressway service areas in China, offering new insights into achieving stable compliance with discharge standards.

Keywords wastewater in expressway service area high ammonia nitrogen high variability characteristics analysis optimized regulation and control

随着我国水污染防治行动计划的深入实施,集中式的城镇污水处理问题已基本解决,低维护分散型的污水处理难题逐渐成为水环境治理的重点关注领域。中国工程院发布的 2024 全球工程前沿问题中,低维护分散型水处理技术与装备是环境工程领域的工程开发前沿。高速公路服务区(以下简称“服务区”)作为一种典型、常见的分散式污水污染源,其污水治理显得尤为重要。由于服务区通常远离市区,需要配备独立的污水处理系统。然而,服务区规模较小、位置分散和数量众多,其污水处理系统普遍缺乏维护管理,出现污水超标排放甚至直排现象。因此,我国交通运输部在 2017 年颁布《推进交通运输生态文明建设实施方案》,各地如广西、江苏、贵州等对服务区污水处理现状进行了调查与分析,结果显示,服务区污水水质和水量波动大,进水氨氮和总磷浓度明显高于城市生活污水水质,同时污水处理系统存在设备老旧损坏、管养力度不足、工艺落后等问题从而导致出水超标排放^[1-3]。虽然各地开展了服务区污水处理系统的升级改造工作,包括维护设备、加强管理、扩大调节池、增加处理规模和更换工艺等,但服务区的出水仍然难以满足稳定达标排放的要求^[4]。因此,为解决此全球工程前沿问题,本研究结合现场调查与数学模拟的方法,揭示服务区污水的产排特征、甄别影响污水处理系统稳定运行的关键因素并建立基于人流量的污水水量和水质预测模型,探索低维护分散型污水处理的工程

技术方案,为我国服务区污水稳定达标排放提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 现场监测和取样

经初步调研,本研究选择的服务区位于广东省,其污水组成主要包括厕所污水、餐饮污水、洗车污水及员工宿舍污水,日污水量为 80~120 m³。原污水处理工艺为厌氧/好氧(AO)活性污泥法,其调节池、厌氧池、好氧池的有效容积分别为 124、20、45 m³。由于出水氨氮超标排放,管理单位对污水处理系统进行了工程改造及运行参数优化,包括在好氧池增加挂膜填料、投加药剂、调整曝气量和延长反应时间。然而,改造后系统仍无法稳定达标,节假日期间黑臭现象仍然存在。

因此,2020 年 9 月 28 日—2020 年 11 月 15 日,对该服务区进行了连续 48 d 的现场监测。根据人流量显著差异,将其划分为国庆节假日高峰时段(9 月 28 日—10 月 8 日)与平时时段(10 月 9 日—11 月 15 日)。现场监测对象包括综合污水水质、尿液污水水质、污水量和厕所人流量。其中,综合污水水样的采样位置包括调节池和污水处理系统出水口;尿液污水水样来自男厕小便斗的总出水管。水样采样时间为每天的 10:00—11:00。现场测定水质指标包括氨氮、溶解氧和 pH;总氮(TN)、化学需氧量(COD)、悬浮物则按照标准方法保存并运回实验室当天测定。此外,污水量由安装在污水处理系统出水口

的电子流量计每小时自动记录。厕所人流量则由安装在男厕和女厕门口的红外人流计数器实时记录。

1.2 水质分析方法

水质指标的测定均采用国家标准方法。其中,氨氮采用《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)、TN 采用《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)、COD 采用《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)、悬浮物采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—1989)、溶解氧采用《水质 溶解氧的测定 电化学探头法》(HJ 506—2009)、pH 采用《水质 pH 值的测定 电极法》(HJ 1147—2020)。

1.3 污水稳定化调控模拟

为探究合适的污水进水稳定化方案,根据氨氮主要来源于尿液污水的调查分析结果,提出了尿液污水分离调蓄与预处理的源头减量方法,并结合人工智能算法研究男性尿液污水分离预处理对污水水质稳定化的影响。

首先,以人流量为自变量,污水量、氨氮浓度和氨氮负荷为因变量构建了高速服务区污水水量和水质动态预测模型,用于模拟产生的污水水量和水质。采用的算法包括 K 近邻(KNN)、支持向量机(SVR)、线性回归(LR)、多项式回归(PR)、梯度提升决策树(GBDT)和随机森林(RF)。通过决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)评价各算法的拟合效果,并选择表现最佳的算法进行后续模拟。

其次,利用模型研究尿液污水分离预处理对污水稳定性的影响。假设条件如下:(1)根据调查结果和发明专利^[5]描述,增设尿液污水存储池和好氧微生物预处理池,前者容积固定取 10 m^3 ,后者体积分别取 $0, 20, 40, 60, 80, 100 \text{ m}^3$ 以确定预处理池体积及其处理能力。其中真实尿液污水生物处理工艺的氨氮去除速率为 $280 \sim 1\,100 (\text{g N}) \cdot \text{d}/\text{m}^3$ ^[6-7],选取 $550 (\text{g N}) \cdot \text{d}/\text{m}^3$ 进行计算。另外,基于服务区产生的尿液污水量及其氨氮浓度动态变化,预处理后的出水氨氮浓度可由式(1)进行计算。当计算结果为负数时取 0;(2)硝化反应导致污水 pH 的变化可根据文献公式^[8]进行估算,其中污水碱度统一取 $250 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$;(3)研究^[9]表明,AO 工艺能够承受最大水量冲击为平时时段的 2 倍,故高峰期污水生物处理工艺的进水流量以 2 倍计算。

$$C_{p,\text{out}} = [C_{p,\text{in}}Q_p - r_p/(tQ_p)]/Q_p \quad (1)$$

其中: $C_{p,\text{out}}$ ——预处理池平均出水氨氮质量浓度,mg N/L;

$C_{p,\text{in}}$ ——预处理池平均进水氨氮质量浓度,mg N/L;

Q_p ——预处理池处理水量, m^3/d ;

r_p ——氨氮去除速率, $(\text{g N}) \cdot \text{d}/\text{m}^3$;

t ——天数,d。

2 结果与讨论

2.1 服务区污水处理现状及成因分析

2.1.1 污水高波动特征及处理现状

图 1 为现场监测的厕所人流、污水水量、进水和出水水质波动变化情况。各项指标变化均呈现非线性高波动特性,且在节假日人流高峰时段出现最大值。总体上,各变化曲线同频变化,在节假日高峰时段先急剧上升后快速下降,最后逐渐恢复到平时时段水平。该服务区污水水量为 $63 \sim 330 \text{ m}^3/\text{d}$,日波动系数为 5.2 倍;进水氨氮质量浓度为 $96 \sim 220 \text{ mg N/L}$,日波动系数为 2.3 倍,明显高于典型城市生活污水情况(表 1)。氨氮浓度与污水水量的波动曲线同频振动,导致高峰时段进水氨氮负荷(浓度×流量)在短期内急剧上升,其负荷日变化系数高达 9.9($7.1 \sim 70.5 \text{ kg N/d}$)。

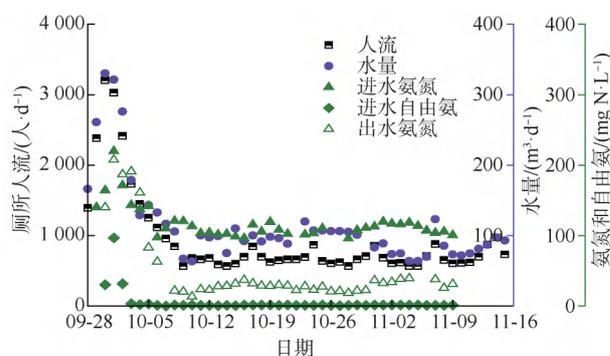


图 1 厕所人流、污水量、进水氨氮、自由氨和出水氨氮浓度日变化

Fig. 1 Daily Variation of Passenger Flow, Wastewater Capacity, Influent Ammonia Nitrogen, Free Ammonia and Effluent Ammonia Nitrogen Concentrations

高波动的水量和水质通过改变工艺的水力停留时间(HRT)和微生物群落组成进而影响污染物的处理效率^[10-11]。该服务区污水在高波动的水量和水质下,出现污水处理效率低、不稳定、多项指标不

同程度的超标排放现象。总体上,高峰时段的人流量越大,水量和进水物质浓度越大,出水物质浓度越高;在平时时段,该变化趋势并不明显。具体而言,氨氮、COD和悬浮物的平均出水浓度均高于标准限值(表1)。其中氨氮一直超标排放,其平均出水质量浓度高达49 mg N/L,为标准排放限值的4.9倍;COD和悬浮物平均出水质量浓度分别为排放标准

的1.8倍和1.1倍。为区分平时和高峰时段污水处理系统的处理效果,表2进一步展示了两时段的进、出水情况。在平时时段,氨氮的平均去除率约为71%,出水浓度为标准限值的3倍。然而,在高峰时段,氨氮的平均去除率明显下降至9%,平均出水质量浓度高达132 mg N/L,平均出水质量浓度为标准限值的13倍,污染严重。

表1 服务区污水与市政污水情况对比

Tab. 1 Comparison of Wastewater between Highway Service and Municipal Areas

项目	氨氮/ [(mg N)·L ⁻¹]	TN/ [(mg N)·L ⁻¹]	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	pH 值	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	污水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	
							平均值
本研究进水(调节池)	平均值	117	166	595	7.3	78	-
	数值	96~220	103~332	369~889	7.0~9.0	32~361	-
本研究出水	平均值	49	88	166	7.0	67	115
	数值	13~207	20~296	63~603	6.6~8.5	28~232	63~330
本研究尿液污水	平均值	95	558	607	8.1	75	-
	数值	43~140	137~1 059	350~2 010	6.8~8.5	28~195	-
典型市政污水 ^[12]	数值	20~75	30~100	500~1 200	6.0~9.0	250~600	-
服务区所在城市生活污水 ^[13]	数值	40	50	350	6.0~9.0	300	-
相邻城市生活污水 ^[14]	数值	20	25	296	-	-	-
我国40多个服务区污水统计 ^[15]	数值	15~143	140~172	110~800	-	5~417	30~360
排放标准*	数值	10	-	90	6.0~9.0	60	-

注:*表示《广东省水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准。

由式(2)和表2可知,污水处理系统的氨氮平均去除速率,其中平时时段约为69.30 kg N/d;高峰时段约为25.48 kg N/d。因此,针对高波动的水量和水质,必须制定针对性方案优化污水处理工艺以确保污水处理系统的稳定性。

$$r = Q_0 \times (C_{in} - C_{out}) / 10^6 \quad (2)$$

其中: r ——氨氮平均去除速率,kg N/d;

Q_0 ——总污水量,L/d;

C_{in} ——氨氮平均进水质量浓度,mg N/L;

C_{out} ——氨氮平均出水质量浓度,mg N/L。

表2 广东某服务区平时时段与高峰时段的污水处理情况

Tab. 2 Wastewater Treatment Situation in a Service Area in Guangdong during Normal and Peak Periods

取样点	项目	氨氮/[(mg N)·L ⁻¹]		TN/[(mg N)·L ⁻¹]		pH 值		悬浮物/(mg·L ⁻¹)		污水量/(m ³ ·d ⁻¹)	
		平时	高峰	平时	高峰	平时	高峰	平时	高峰	平时	高峰
调节池	平均值	108	145	153	218	7.2	7.8	78	78	90	196
	数值	96~120	97~220	103~186	141~332	7.0~7.3	7.1~9.0	44~172	32~361	63~132	116~330
出水	平均值	31	132	66	179	6.9	7.8	45	73	90	196
	数值	13~67	22~207	34~110	63~296	6.6~7.0	7.0~8.5	28~96	34~232	63~132	116~330
尿液污水	平均值	93	105	539	670	8.2	7.3	42	82	-	-
	数值	57~140	43~139	265~1 059	367~1 027	7.5~8.5	6.8~8.0	28~108	42~195	-	-

2.1.2 污水超标排放关键成因分析

节假日污水水量增大导致系统处理能力不足被认为是服务区污水超标排放的重要原因^[16]。然而,

管理单位通过增大调节池和新增污水处理设备的方式仍然未能有效解决超标排放问题。因此,亟需查明造成服务区污水多指标、长时间超标排放的成因,

并制定针对性解决方案。

高浓度氨氮通常伴随较高浓度的自由氨(FA)。FA的生物毒性会对微生物,如氨氧化菌(AOB)产生抑制作用,甚至导致其死亡。研究^[17]表明,当FA质量浓度为7~10 mg N/L时会对AOB产生明显的抑制作用;达到25 mg N/L时,AOB活性下降40%^[18];达到34 mg N/L时下降89%^[19]。根据文献公式^[20],该污水平时时段的平均进水FA质量浓度仅为0~2 mg N/L,几乎不会对AOB产生抑制作用;但在高峰时段,FA浓度迅速上升并维持在较高水平,如9月30日—10月2日的3 d内的FA质量浓度均超过30 mg N/L。FA浓度在短时间内急剧上升,使得微生物群落无法快速调整其生存策略以应对FA毒性。又如进水FA在10月1日的质量浓度高达97 mg N/L,能显著抑制甚至毒杀AOB,令系统氨氮去除能力仅为3.9 kg N/d,与平时时段平均去除速率69.30 kg N/d相比下降了94%,出水氨氮质量浓度高达207 mg N/L。经历高浓度FA毒性作用后,自养微生物AOB难以在短时间内恢复,导致高峰时段之后长时间出水氨氮持续处于超标排放状态。因此,服务区高峰时段污水高浓度、高波动的FA显著抑制甚至灭杀微生物,是处理系统多指标、长时间超标排放的关键原因。

2.1.3 氨氮来源分析

服务区污水中尿液污水含量大^[15],是污水氨氮的主要来源。尿液污水对总污水氨氮含量的贡献按式(3)~式(4)进行估算,结果如图2所示。平时时段尿液污水量占总水量的24%,而随着高峰期人流增加,尿液污水比例上升至29%。其中男性尿液污水的比例相对稳定,约17%;而女性尿液污水的比例随着人流的增大,从7%上升至12%。进一步分析,平时时段污水的氮负荷约80%来自尿液污水;而在高峰期,这一比例达到91%。值得注意的是,虽然男性尿液污水仅占总污水量的17%,但其氮负荷贡献为54%~56%。这一结果表明,若对男厕尿液污水进行收集与预处理,将有助于降低后续污水处理设施的进水氨氮和FA浓度。

$$Y_1 = (Q_1 + Q_2) \times N \div Q_0 \quad (3)$$

$$Y_N = C_1 \times (Q_1 + Q_2) \times N \div C_0 Q_0 \quad (4)$$

其中: Y_1 ——尿液污水占总污水量比例;

Q_1 ——人均尿液量,取0.2 L/人次^[21];

Q_2 ——小便后每次冲刷用水量,2.5~5 L/人次^[22],取3 L/人次;

N ——厕所人流,人/d;

Q_0 ——总污水量,L/d;

Y_N ——尿液污水中TN含量占总污水TN的比例;

C_1 ——尿液污水TN质量浓度,mg N/L;

C_0 ——总污水中TN质量浓度,mg N/L。

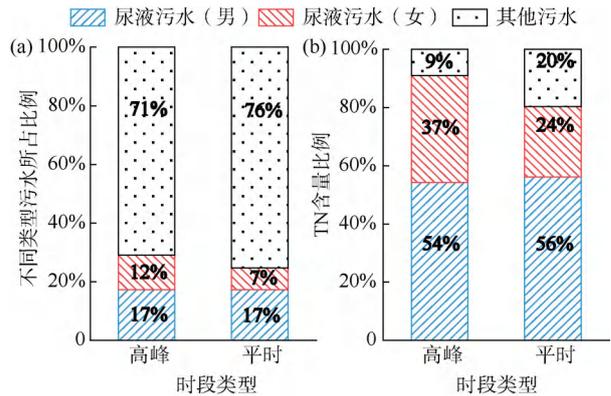


图2 尿液污水(a)占总污水的水量比例和(b)TN比例
Fig. 2 (a) Proportions of Urine Wastewater in Total Wastewater Capacity and (b) TN Proportion

2.2 基于数学模型的服务区高波动污水稳定化升级改造方案

2.2.1 解决思路与目标

基于服务区污水的氨氮主要来源于尿液废水,与高波动的人流变化密切相关。因此,以人流量为自变量,利用人工智能算法建立预测模型,研究男性尿液污水分离预处理措施对污水FA浓度及波动的稳定效果。其中,设进水FA质量浓度控制目标为不高于7 mg N/L,该浓度不会对AOB活性产生显著抑制作用^[17]。

2.2.2 基于模型的效果评估

模拟结果如表3所示,PR算法对污水水量拟合效果最好, R^2 为0.936,其次分别为SVR>KNN>RF>LR>GBDT;氨氮浓度和氨氮负荷拟合效果最好的是KNN, R^2 分别为0.705和0.933,其次均为RF>PR>SVR>LR>GBDT。因此,采用PR算法模拟污水流量和KNN算法模拟氨氮浓度及其负荷。另外,FA浓度主要与氨氮浓度和pH有关,根据前文描述和公式^[20]进行计算。

模拟结果如图3和图4所示,尿液污水分离预

表3 模型对污水量、氨氮浓度和氨氮负荷的拟合效果

Tab. 3 Model Fitting Performance for Wastewater Volume, Ammonia Nitrogen Concentration and Loading

指标		PR	SVR	RF	KNN	LR	GBDT
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	R ²	0.936	0.935	0.933	0.935	0.927	0.840
	RMSE	16	16	16	16	17	25
氨氮质量浓度/[(mg N)·L ⁻¹]	R ²	0.663	0.569	0.690	0.705	0.528	0.513
	RMSE	14	16	14	13	17	17
氨氮负荷/[(g N)·h ⁻¹]	R ²	0.927	0.905	0.931	0.933	0.914	0.786
	RMSE	3 569	4 063	3 466	3 411	3 863	6 112

处理措施能够显著降低高峰时段氨氮和 FA 的峰值浓度和波动幅度。具体而言,在一定范围内预处理池体积越大,氨氮和 FA 浓度的稳定化效果越好。当预处理池体积在 60 m³ 达到最大调控效果,模拟的氨氮峰值质量浓度能从 168 mg N/L 降低至 79 mg N/L;模拟的 FA 峰值浓度降低了 92%,从

75 mg N/L 降低至 6 mg N/L 以下;波动率降低了 77%。该预测模型能够为高速服务区污水处理工艺升级改造方案提供参考。但是由于影响污水水量和水质的因素众多,各服务区的污水水量和水质存在差异,该模型还需要进一步优化和验证以提高其适用性。

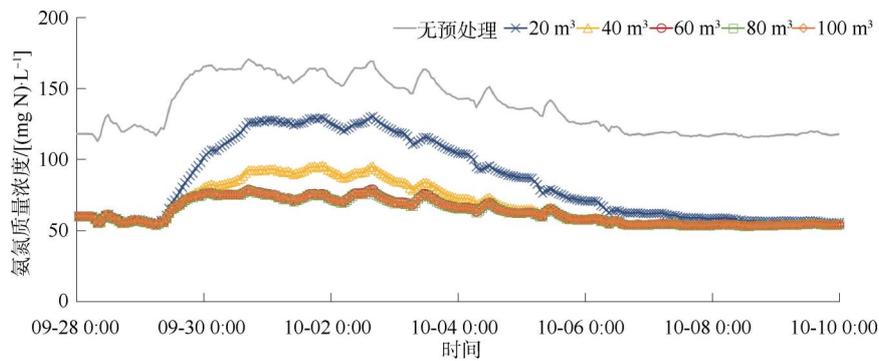


图3 不同体积预处理池调节池的氨氮浓度模拟

Fig. 3 Simulations of Ammonia Nitrogen Concentration in Regulating Tanks with Different Volumes of Pre-Treatment Tank

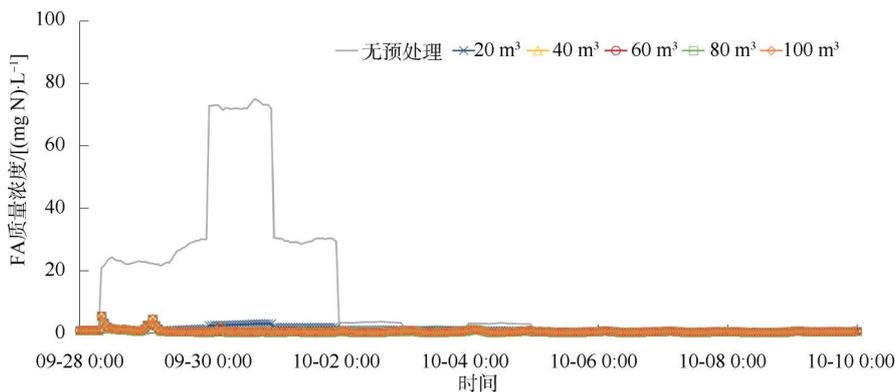


图4 不同预处理池体积调节池的 FA 浓度模拟

Fig. 4 Simulations of FA Concentration in Regulating Tanks with Different Volumes of Pre-Treatment Tank

以上表明,增加尿液污水前置分离与预处理措施能够有效降低进水氨氮和 FA 的峰值浓度及波动幅度,减少甚至消除 FA 对微生物活性的抑制作用,利于污水处理系统的稳定运行和污水的

达标排放。此外,该措施可在不影响原有处理工艺正常运行的前提下,支持不停产升级改造,具备影响小、易于实施、氨氮和 FA 去除效果显著等优势,在现有服务区污水处理系统改造中具有良

好应用潜力。

3 结论

低维护、分散型水处理技术与装备是全球工程开发前沿领域,而高速公路服务区污水处理系统是典型的低维护、分散型污水处理设施,保证此类系统在低维护甚至无人值守条件下的稳定运行,是环境工程领域的前沿难题。经过在高速公路服务区的长周期监测与数据分析,本研究结论如下。

(1)发现了服务区污水难以实现长期、稳定达标处理的关键在于水量和水质具有非线性高波动特征,其日波动系数分别高达 5.2 倍和 2.3 倍。尿液污水的比例大,导致污水中的氨氮质量浓度为 96~220 mg N/L,明显高于城市生活污水的氨氮浓度。此外,在节假日人流量激增的情况下,污水量和氨氮浓度同频增加,氨氮负荷日变化系数高达 9.9。

(2)揭示了高峰时段污水高浓度、高波动的 FA 显著抑制污水处理系统微生物的活性,是污水长时间超标排放的关键成因。高峰期 FA 质量浓度可在短期内快速上升至 97 mg N/L,显著抑制甚至杀死微生物,导致氨氮去除能力下降了 94%。这种微生物活性的抑制,使得污水处理系统在高峰时段后难以迅速恢复,造成多指标、长时间的超标排放现象。

(3)提出了结合人工智能算法与预测模型的尿液污水分离调蓄与预处理调控方法,以实现 FA 浓度和波动的自动化调控。该方法能显著降低高峰时段的氨氮浓度和 FA 浓度,其中 FA 峰值浓度和波动幅度分别降低了 92% 和 77%,避免高浓度 FA 对微生物抑制作用,使氨氮与 FA 浓度“线性化”,有利于污水稳定处理与达标排放。所建立的预测模型为服务区污水处理系统的前期设计和升级改造提供了有价值的建议。

这一研究为高速公路服务区污水这一典型的低维护、分散型水处理工程难题提供了一种可行的解决方案,目前已进行实践应用。

参考文献

[1] 梁丽萍,张林. 江苏省高速公路服务区污水处理现状及解决对策[J]. 中国给水排水, 2017, 33(4): 20-25.
LIANG L P, ZHANG L. Problems and solutions for sewage treatment in expressway service areas in Jiangsu Province [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(4): 20-25.

[2] 张水,黄家琰,张瑞雪,等. 贵州省高速公路服务区污水排放特

征及处理工艺遴选[J]. 给水排水, 2017, 53(s1): 120-122.

ZHANG S, HUANG J Y, ZHANG R X, et al. Characteristics of wastewater discharge and selection of treatment processes in Guizhou Province's expressway service area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(s1): 120-122.

[3] 王靖,王昌盛. 广西高速公路污水处理系统的管理现状和改进[J]. 西部交通科技, 2017(12): 122-125.
WANG J, WANG C S. Management status and improvement of sewage treatment system in Guangxi expressway [J]. Frontier of Environmental Protection, 2017(12): 122-125.

[4] LI J, YAO J L, LIU X X, et al. Evaluation and analysis of wastewater treatment technology applied in highway service area [C]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, Sanya (China), 2020, 474: 072097.

[5] 江峰,黄韬. 一种适用于高波动高氨氮污水的分质处理方法: 202210160998.6[P]. 2023-05-26.
JIANG F, HUANG T. A quality separation treatment method suitable for high fluctuation and high ammonia nitrogen wastewater: 202210160998.6[P]. 2023-05-26.

[6] MACKEY H R, REY M G, HAO T, et al. Pursuit of urine nitrifying granular sludge for decentralised nitrite production and sewer gas control [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 289, 17-27. DOI: 10.1016/j.cej.2015.12.071.

[7] UDERT K M, FUX C, MUNSTER M, et al. Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine [J]. Water Science and Technology, 2003, 48(1): 119-130.

[8] LIANG Z S, XIE W L, LI H, et al. Integrating machine learning algorithm with sewer process model to realize swift prediction and real-time control of H₂S pollution in sewer systems [J]. Water Research X, 2024, 23: 100230. DOI: 10.1016/j.wraa.2024.122230.

[9] 顾升波,李振川,李艺. A/O-MBBR 组合工艺和 A/O 工艺处理市政污水的影响因素研究[J]. 给水排水, 2017, 43(2): 49-55.
GU S B, LI Z C, LI Y. Study on influencing factors on the performance of A/O-MBBR and A/O processes in municipal wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2): 49-55.

[10] MASSIMO R, VINCENZO T, GIORDANO U. Influence of strong diurnal variations in sewage quality on the performance of biological denitrification in small community wastewater treatment plants (WWTPs) [J]. Sustainability, 2013, 5(9): 3679-3689.

[11] XIE Y D, ZHANG Q H, WU Q, et al. A modified anaerobic-anoxic-oxic system for optimizing rural sewage treatment with fluctuating influent flows [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148492. DOI: 10.1016/j.cej.2023.148492.

(下转第 130 页)

- heat pump technology in qingdao tuandao wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(12): 86-89.
- [43] 黄雄虎, 顾敦罡, 陆嘉麒, 等. 污水源热泵技术在城市污水热能回收中的应用现状与研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(3): 922-928.
- HUANG X H, GU D G, LU J L, et al. Application and research progress of wastewater source heat pumps in municipal wastewater heat recovery[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(3): 922-928.
- [44] 高海霞. 污水处理厂污水污泥处理碳减排路径分析[J]. *清洗世界*, 2024, 40(1): 14-16.
- GAO H X. Analysis on carbon emission reduction path of wastewater sludge treatment in wastewater treatment plant[J]. *Cleaning World*, 2024, 40(1): 14-16.
- [45] 徐辉, 齐方琪, 宋昊祥, 等. 低温城市污水应用污水源热泵现状分析[J]. *智能城市*, 2019, 5(7): 138-139.
- XU H, QI F Q, SONG H X, et al. Application status of wastewater thermal power in severe cold areas[J]. *Intelligent City*, 2019, 5(7): 138-139.
- [46] 胥晓瑜. 关于在水厂和污水厂中使用水源热泵技术的新思路[J]. *净水技术*, 2018, 37(s2): 121-124.
- XU X Y. New ideas on the use of water source heat pump technology in water plants and sewage plants [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(s2): 121-124.
- [47] 郝晓地, 饶志峰, 李爽, 等. 污水余温热能蕴含着潜在碳交易额[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 7-13.
- HAO X D, RAO Z F, LI S, et al. Potential carbon trading volume of thermal energy contained in wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 7-13.
- [48] 张怀宇. 我国公共供水系统温室气体排放与碳减排探讨[J]. *给水排水*, 2023, 49(11): 16-24.
- ZHANG H Y. Discussion on greenhouse gas emission and carbon reduction of China's public water supply systems[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(11): 16-24.

(上接第 104 页)

- [12] CHEN G H, LOOSDRECHT M C V, EKAMA G A, et al. *Biological wastewater treatment: Principles, modeling and design* [M]. London: IWA Publishing, 2020.
- [13] 林忠军, 李胜. 清远市东城污水处理厂分区组团地下式总体设计[J]. *中国市政工程*, 2014(3): 80-82, 108-109.
- LIN Z J, LI S. The overall design of partition group underground layout type of Dongcheng wastewater treatment plant in Qingyuan [J]. *China Municipal Engineering*, 2014(3): 80-82, 108-109.
- [14] 于翔, 李捷. 广州城市污水厂进水水质组分和模型参数的测定[J]. *净水技术*, 2019, 38(8): 89-93.
- YU X, LI J. Determination of influent quality components and model parameters for urban WWTP in Guangzhou [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(8): 89-93.
- [15] 吴正运, 唐燕华, 刘一帆, 等. 国内外高速公路服务区污水处理现状与分析[J]. *交通节能与环保*, 2022, 18(5): 104-109.
- WU Z Y, TANG Y H, LIU Y F, et al. Current status and analysis of wastewater treatment in expressway service area at home and abroad [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2022, 18(5): 104-109.
- [16] 周德柱, 刘煌, 胡燕, 等. 高速公路服务区污水处理现状问题及应对策略浅析[J]. *公路交通技术*, 2020, 36(6): 131-136.
- ZHOU D Z, LIU H, HU Y, et al. Analysis on the current problems and countermeasures of sewage treatment in expressway service area [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2020, 36(6): 131-136.
- [17] LIU Y W, NGO H H, GUO W S, et al. The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review [J]. *Environment International*, 2019, 123: 10-19. DOI: 10.1016/j.envint.2018.11.039.
- [18] BALMELLE B, NGUYEN K M, CAPDEVILLE B, et al. Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification[J]. *Water Science and Technology*, 1992, 26(5/6): 1017-1025. DOI: 10.2166/wst.1992.0543.
- [19] JIANG Y S, POH L S, LIM C P, et al. Effect of free ammonia inhibition on process recovery of partial nitrification in a membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 6: 152-158. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.014.
- [20] ZUO Z Q, SONG Y R, REN D H, et al. Control sulfide and methane production in sewers based on free ammonia inactivation [J]. *Environment International*, 2020, 143: 105928. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105928.
- [21] 孟宪超, 胡正义, 刘小宁, 等. 小便器尿液源头分离及其磷资源回收关键技术的研究[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(1): 61-66.
- MENG X C, HU Z Y, LIU X N, et al. Phosphorus recovery from urine automatically collected from urinal based on source separation of urine from flushing water [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(1): 61-66.
- [22] 徐冬喜. 高速公路服务区给水排水设计[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(7): 60-61.
- XU D X. Characteristics and treatment technology of sewage in expressway service area [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(7): 60-61.