

和笑天,王宏武,李鹏飞,等. AAO 工艺大型城市污水处理厂春节期间脱氮优化技术[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 208-215.

HE X T, WANG H W, LI P F, et al. Optimized technology of AAO process for denitrification in large urban WWTP during the Spring Festival [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 208-215.

AAO 工艺大型城市污水处理厂春节期间脱氮优化技术

和笑天,王宏武,李鹏飞*,杨丽亚,张 潇

(中原环保股份有限公司,河南郑州 450000)

摘要 【目的】为探索并解决城镇污水处理厂在春节假期期间因进水化学需氧量(COD_{Cr})、碳氮比、进水水量等降低而造成污水处理厂出水总氮逐步升高甚至超标的问题。【方法】文章通过分析城镇污水处理厂春节假期前后的进水水量水质的变化规律,对比了延长生物池缺氧段停留时间、外加碳源、停运生物池增加其他生物池进水负荷、减少初沉池排泥或超越初沉池增加进水碳源等措施的实施效果及优缺点,提出了在拥有多条生产线的污水处理厂,可选择一个或多个生物池进行交替运行进行生物脱氮的方法,即通过选择一个或者多个生物池停止进水 12 h,再恢复进水 12 h 的方法,将停止进水的生物池因内回流循环的作用而可以充分利用生物池内的各种碳源进行反硝化。【结果】通过上述措施,该停止进水的生物池内存水的总氮可降低 4~5 mg/L,当再次投运该停止运行的生物池后约 12 h,该系列生物池池内总氮开始出现反弹升高的现象,通过各条生产线出水相互混合作用,进而延缓出水总氮整体的升高。【结论】经过多次工程试验验证,得出以下结论:在春节假期期间,拥有多条生产线的污水处理厂采用交替运行一个或者多个生物池的方法,不仅可有效控制总出水的总氮指标的恶化,整体降低出水总氮指标,还节省了用电、药剂等生产成本费用。

关键词 春节假期期间 碳氮比低 交替运行生物池 出水总氮降低 节省生产成本

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)02-0208-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.024

Optimized Technology of AAO Process for Denitrification in Large Urban WWTP during the Spring Festival

HE Xiaotian, WANG Hongwu, LI Pengfei*, YANG Liya, ZHANG Xiao

(Central Plain Environmental Protection Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract [Objective] To explore and solve the problem of gradually increasing or even exceeding the total nitrogen concentration in the effluent from urban wastewater treatment plants (WWTPs) during Spring Festival holiday, due to the decrease in influent chemical oxygen demand (COD_{Cr}), carbon-nitrogen ratio, and influent flow. [Methods] This paper analyzed the influent flow and water quality of urban WWTPs before and after the Spring Festival holiday, and compared the implementation effects and advantages and disadvantages measures such as extending the anoxic section's detention time in the bioreactor, adding external carbon sources, stopping the operation of the bioreactor to increase influent load of other bioreactors, reducing the sludge discharge from the primary sedimentation tank or bypassing the primary sedimentation tank to increase the influent carbon source. It proposed a method of alternating operation of one or more bioreactors in WWTPs with multiple production lines thus stopping the influent for 12 hours and then resuming it for 12 hours, so that the bioreactors with stopped influent could fully utilize the various carbon in the bioreactor for denitrification due to the internal recirculation. [Results] By using the above measures, the total nitrogen in the water in the bioreactors with stopped influent could be reduced by 4~5 mg/L. When the stopped bioreactors were put back into operation after 12 hours, the total nitrogen in the bioreactors began to rebound. By mixing the effluent from different production lines, the overall increase in the nitrogen of the effluent could be delayed. [Conclusion] After multiple engineering trials, the following conclusion is drawn: During the Spring Festival holiday, urban WWTP with multiple production lines can not only effectively control the deterioration of the

[收稿日期] 2023-06-15

[作者简介] 和笑天(1986—), 硕士,高级工程师,主要从事城镇污水处理及运营管理工作,E-mail: hexiaotian@cpepgc.com。

[通信作者] 李鹏飞(1989—), 男,工程师,主要从事城市污水处理运营及管理工作,E-mail: lipengfei@cpepgc.com。

total nitrogen in the effluent but also reduce the overall total nitrogen in the effluent by alternating operation of one or more bioreactors. This method also saves on electricity and chemical costs.

Keywords Spring Festival holiday low C/N ratio alternating operation of biopool TN reduction in effluent production cost saving

由于春节期间大部分人返乡、城镇常住居民人数减少等原因,城镇污水处理厂的进水呈现进水水量大幅减少、进水水质整体降低、碳源不足等一系列特征^[1]。针对这些情况,污水处理厂一般会采取投加外碳源、增加污泥浓度甚至停运多余的生产线等措施以维持出水水质的稳定达标排放。本文以华北地区某城镇污水处理厂近几年春节期间的调控措施为例,总结了春节期间常见的调控措施,同时将序批式活性污泥法(SBR)的工艺特点灵活应用于改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺中,通过交替运行生物池,研究停运

生产线的生物池以及其他生产线生物池增加进水负荷后的生物反硝化趋势,为其他城镇污水处理厂节假日期间的工艺调控提供了思路。

1 污水处理厂概况

本研究位于华北地区某城镇污水处理厂,该厂一期工程处理规模为 $3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,分为4个系列,每个系列处理能力均为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,处理工艺采用多点进水前置AAO工艺,出水水质执行《贾鲁河流域水污染物排放标准》(DB41/908—2014)。主要工艺流程如图1所示,主要构筑物参数如表1所示,主要排放指标如表2所示。

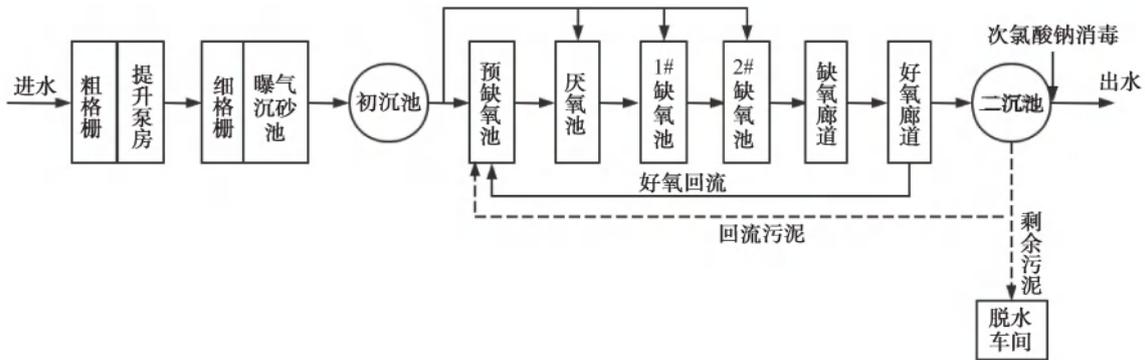


图1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment

表1 工艺构筑物参数

Tab. 1 Parameters of Process Structures

构筑物	水力停留时间/h	池体数/个	容积/ m^3	水深/m
预缺氧区	1.5	4	18 340	6.0
厌氧区	1.5	4	18 340	6.0
缺氧区	5.5	4	39 800	6.0
好氧区	10.0	4	120 480	6.0
二沉池	4.7	8	14 624	4.6

2 春节假期对污水处理厂的影响规律

2.1 进水水质分析

截取2021年—2023年春节前后的进水数据进行分析,进水化学需氧量(COD_{Cr})变化情况如图2所示,均呈现出相同的趋势:春节假期前开始下降,正月初二或者正月初三降至最低点,随后逐渐上升,春节假期后开始逐渐平稳。由于疫情,2021年—

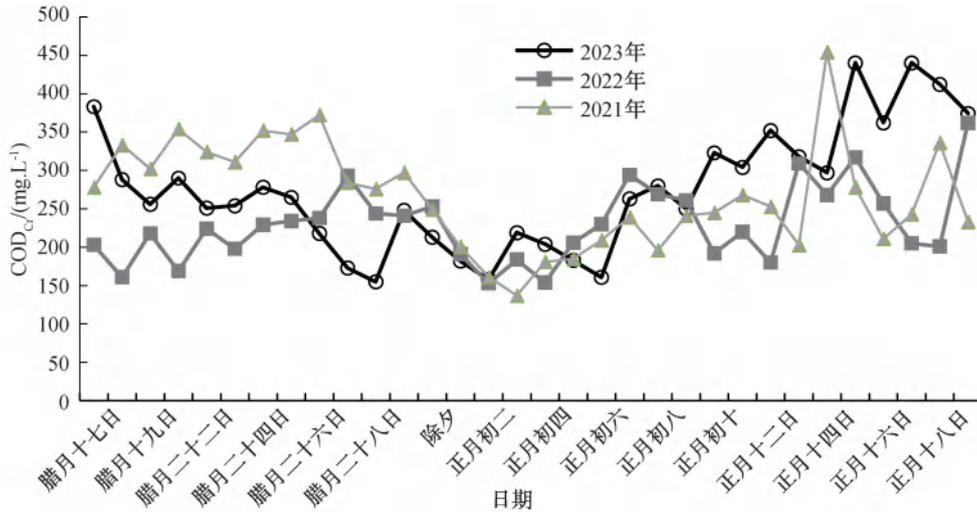
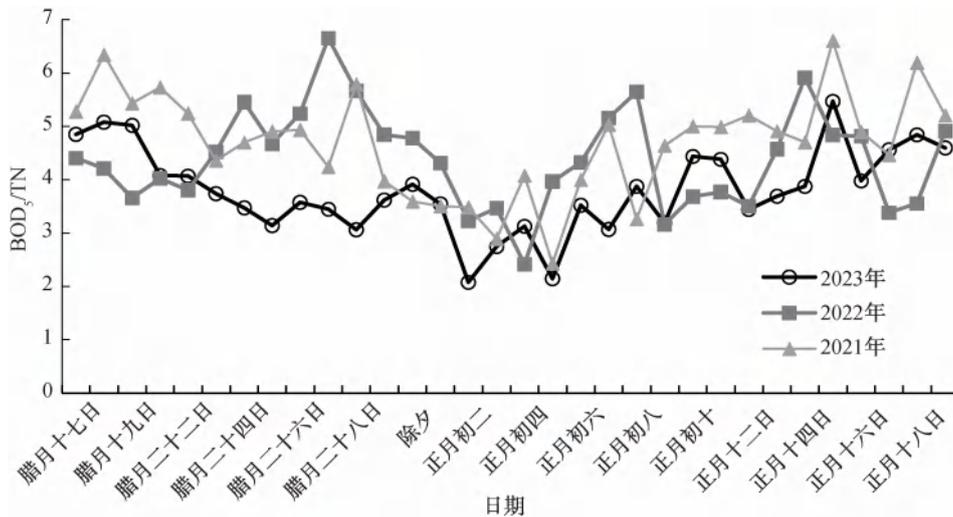
2022年的进水 COD_{Cr} 波动幅度及拐点与2023年略有差异,2021年—2022年春节假期前后进水 COD_{Cr} 波动幅度小,数据更加平稳。2023年春节假期前进水 COD_{Cr} 整体比较平稳,自腊月二十五日开始,表现出持续下降的趋势。春节假期期间,进水 COD_{Cr} 质量浓度持续保持较低的水平,平均值为 195 mg/L 。春节假期结束后,进水 COD_{Cr} 开始呈现出逐步上升的趋势,直至恢复到正常水平。

2021年—2023年春节假期及其前后的进水五日生化需氧量(BOD_5)/总氮(TN)和 BOD_5 /总磷(TP)变化情况如图3及图4所示。其中进水 BOD_5/TN 均表现出相同的趋势:自春节假期开始前开始下降,正月初二—正月初五降至最低点,随后逐渐上升。2021年—2022年受疫情影响,春节假期期间城市常住居民较2023年多,进水 BOD_5/TN 波动

表 2 主要水质指标(单位:mg/L)

Tab. 2 Main Water Quality Indices(Unit: mg/L)

项目	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	氨氮	TP	TN
进水水质设计值	250.0	480	400	45.00	8.00	60.0
2022年进水水质年平均值	150.0	237	153	27.80	3.21	35.9
出水执行标准限值	10.0	40	10	3.00	0.50	15.0
2022年出水水质年平均值	0.8	17	4	0.31	0.10	11.1

图 2 进水 COD_{Cr} 变化Fig. 2 Changes of Influent COD_{Cr}图 3 进水 BOD₅/TN 变化情况Fig. 3 Changes of Influent BOD₅/TN

更加明显且集中。2023 年春节假期前进水 BOD₅/TN 比较平稳,自除夕开始持续下降,正月初三到达最低值为 2.07,之后开始持续上升,到正月十三日逐渐平稳,恢复到正常水平。

进水 BOD₅/TP 春节假期期间的变化趋势大致

与进水 COD_{Cr}、进水 BOD₅/TN 相同,但每年均略有不同:2021 年低值区位于假期前半段;2022 年低值区较短,集中在假期中段;2023 年低值区位于假期后半段。这是因为除受外部进水水质影响外,污水处理厂的进水 TP 还受厂内污泥处理上清液、污泥

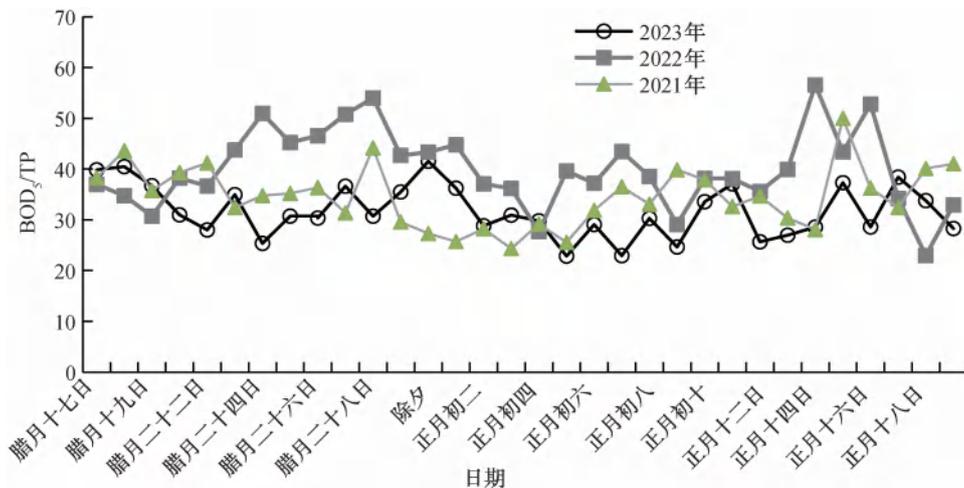


图4 进水 BOD₅/TP 变化情况

Fig. 4 Changes of Influent BOD₅/TP

池溢流液等因素的影响。春节假期期间水温较低,污泥药剂熟化效果较差,且冬季污泥黏性大、有机物含量高,导致污泥处理上清液含固率高。一般情况下,污水处理厂的污泥处理上清液都会经过厂内污水管网进入进水泵房进行处理,随着污泥处理上清液含固率的升高,进水 TP 随之升高。再加上春节期间水温较低,影响反硝化菌的活性。

根据 2016 年版的《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中生物脱氮、除磷要求,脱氮时,污水中的 BOD₅ 与总凯氏氮之比宜大于 4;除磷时,污水中的 BOD₅/TP 之比宜大于 17。春节期间的进水碳

源可以满足生物除磷的需求,但是不能满足生物脱氮的需求,从假期开始前,应当分步骤采取措施应对进水碳氮比(C/N)不足的情况。

2.2 进水水量分析

2021 年—2023 年春节假期及其前后的进水水量如图 5 所示。从除夕前 2 d 开始,进水水量逐渐下降,正月初一或者正月初二下降到最低值,正月初五水量开始逐步上升,春节假期结束后 3~4 d 内水量恢复至正常水平。分析可知,最低日进水量可下降至设计日进水量的 70%左右,并持续 5 d 左右,此时污泥负荷低,应当采取措施增加污泥负荷。

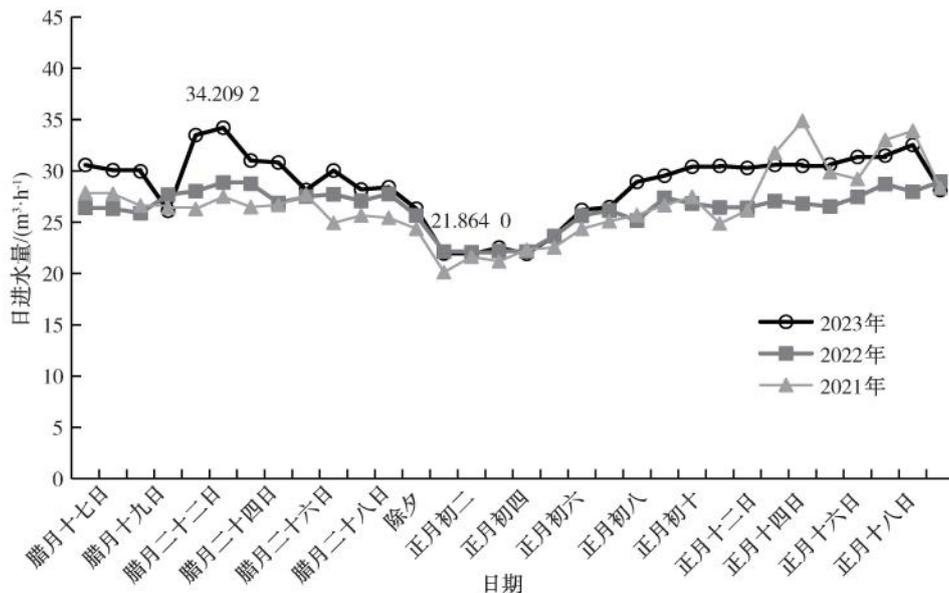


图5 春节前后日进水量变化情况

Fig. 5 Variation of Daily Influent Flow before and after the Spring Festival

2.3 进水水温分析

我国处于北半球,春节假期在一年之中最冷的冬季,污水水温较低。表3为该污水处理厂2021年—2023年春节假期期间的平均进水水温,其中2022年—2023年均低于15℃。大量研究表明,温度低于15℃时,硝化菌和反硝化菌活性降低,硝化速率和反硝化速率都会明显下降。

表3 春节假期期间进水水温

Tab. 3 Influent Temperature during the Spring Festival

年份	春节假期期间 平均水温/℃	前一年年度 平均水温/℃
2021年	16.2	21.53
2022年	14.9	21.43
2023年	14.7	21.44

3 应对措施

根据春节期间的进水规律和运行经验,春节假期第2~3d起,出水TN开始升高。根据我国污水处理厂主要应用的除磷脱氮工艺,含氮污染物的去除主要通过氨化作用、硝化作用、反硝化作用来实现,其中硝态氮的去除主要是由缺氧段反硝化细菌完成,保证有大量活跃的反硝化微生物、合适的缺氧环境、足够的停留时间和充足的可利用碳源是关键影响因子。针对这些条件,城镇污水处理厂一般会采取以下措施进行控制。

3.1 优化工艺调控

春节假期前,观察到进水 COD_{Cr} 开始持续下降时,首先优化工艺调控。

第一,对生物池好氧廊道混合液的氨氮做流程分析,根据氨氮拐点变化规律关闭生物池好氧廊道末端曝气上升立管,使其变成脱气廊道,降低回流硝化液中的溶解氧,在提高硝化液回流比的同时保证缺氧池始终保持良好的缺氧环境^[2]。同时,也可在保证好氧段停留时间充足的前提下,将好氧前端调整为不曝气状态,延长缺氧段反硝化停留时间。本项目脱气廊道的水力停留时间为0.4h时效果最好,此时好氧段末端溶解氧质量浓度由2.0mg/L下调至1.8mg/L,既保证了好氧回流硝化液的反硝化效果,又保证了出水混合液在二沉池中不会发生反硝化反应,影响污泥沉降。调整后出水TN较调整前整体下降了11.8%,质量浓度整体下降了约1.5mg/L。

第二,本项目的生物池进水方式为多点进水,通

过增加缺氧段进水配比,提高缺氧段污泥负荷,增加内碳源,提高反硝化作用效率。将缺氧段进水配比由75%调至85%之后,出水TN质量浓度较调整前整体下降了约0.5mg/L。

第三,减少初沉排泥,将系统中的初沉污泥控制在合适的含固率,以作为生物脱氮除磷的快速碳源。当进水 COD_{Cr} 进一步下降时,可通过超越全部初沉池,保证全部初沉污泥可作为快速碳源^[3]。超越初沉池后,单系列出水TN质量浓度较调整前整体下降了约0.5mg/L。

3.2 投加外碳源

春节假期第2~3d,进水 COD_{Cr} 和进水 BOD_5/TN 维持在低值,由于没有足够的碳源,反硝化速率下降,出水TN开始升高。应对措施是根据微生物利用情况、碳源价格和 COD_{Cr} 当量选择合适的碳源并确定合适的投加比。再根据每日进水量及水质,向生物处理缺氧段投加外碳源^[4]。投加外碳源虽然脱氮效果较好,但是存在药剂费用高、污泥产量增加、不符合碳达峰碳中和的时代发展需求等一系列问题^[5]。

4 交替运行生物池

为了应对进水量大幅减少的情况,春节假期还可以采取停运放空部分生物池的措施,来提高其他生物池的进水负荷,从而达到处理效果。这种措施的优点是出水水质变好、电费和药剂费用减少、停运期间可以进行设备检修等。但是存在3方面的问题:一是恢复运行时存在需要重新培菌驯化、操作复杂、增加人工和运行管理费用等问题;二是停运放空构筑物需要在环保部门进行污染防治设施停运或闲置申请和备案,手续复杂;三是停运期间进水水质如果有变化,不能及时恢复运行,整个活性污泥系统存在超标风险。

停运放空生物池的实践局限性,所以在实际应用中,针对水量变化系数较大的特点,考虑采用SBR工艺的运行特点进行调控。SBR工艺由于间歇运行,可以自由调节水力停留时间,同时实现缺氧段的反硝化、同步硝化反硝化和内源反硝化,所以脱氮效果较好^[6],适用于水量间歇排放和流量变化大的场合。但由于操作繁琐,目前多用于小型污水处理站。本项目结合SBR工艺的进水特点,于2023年春节假期第3d开始采取了交替运行生物池的措施,并

研究采取此措施后的脱氮效果和经济效益。

4.1 具体措施

本研究的运行周期分为4个阶段。第1阶段(P1)为2023-01-24 12:00—24:00,以1系列生物池为试验组,其他3个系列生物池为对照组。第2阶段(P2)为2023-01-25 12:00—24:00,以1系列生物池为试验组,其他3个系列生物池为对照组。第3阶段(P3)为2023-01-26 12:00—24:00,以4系列生物池为试验组,其他3个系列生物池为对照组。第4阶段(P4)为2023-01-27 12:00—24:00,以4系列生物池为试验组,其他3个系列生物池为对照组。各试验阶段,停止试验组进水、碳源加药,停止剩余泵和外回流泵等设备的运行,内回流泵

保持正常状态不变,减小曝气量,好氧段末端溶解氧质量浓度控制在2~4 mg/L。对照组正常进水、正常运行。P1阶段与P2阶段效果对比、P3阶段与P4阶段效果对比,用来试验间歇运行生物池的效果, P1阶段与P2阶段效果对比、P3阶段与P4阶段效果对比,用来试验间歇运行生物池的效果(重复), P2阶段与P3阶段效果对比,用来试验交替运行生物池的效果。

4.2 脱氮效果分析

针对P1、P2、P3、P4 4个阶段,分析系统在试验前后对各系列出水TN的去除效果。试验过程中各系列生物池出水上清液中TN变化情况如图6所示。

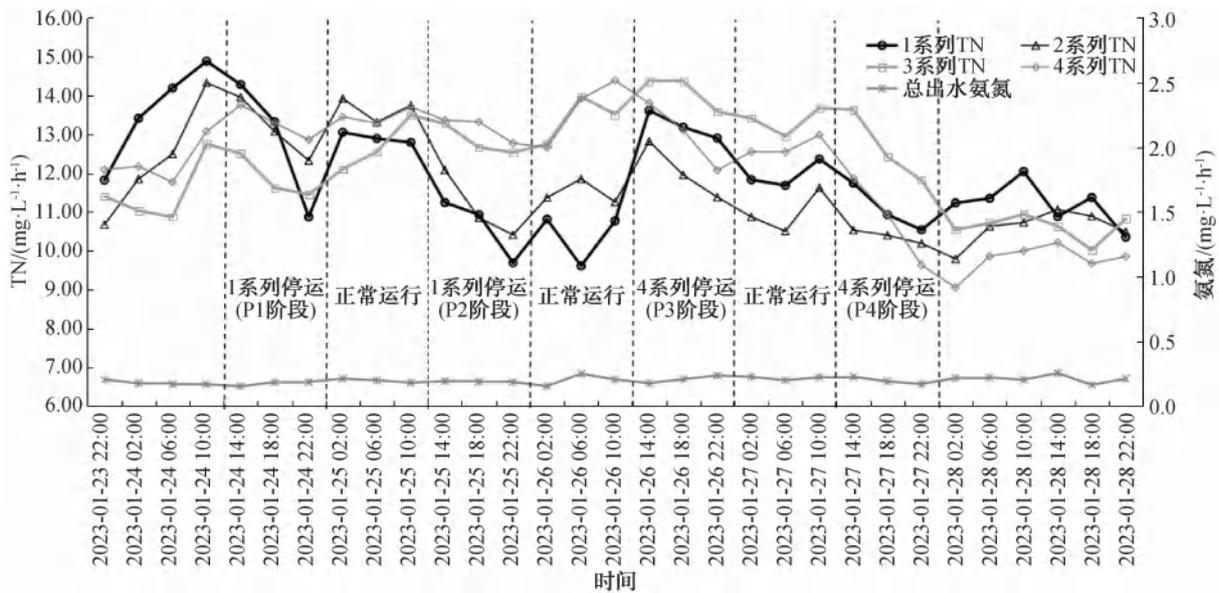


图6 出水TN变化情况

Fig. 6 Changes of Effluent TN

试验过程中,各系列生物池出水上清液中氨氮质量浓度维持在0.150~0.250 mg/L,说明硝化反应好,试验的重点在于反硝化反应,即硝态氮转化为氮气的过程。试验前,为了保证试验效果,停止1、2系列缺氧段碳源加药。停止碳源加药后,由于缺少碳源,1、2系列的反硝化效果变差,出水TN迅速上升。

试验各阶段各生物池的TN下降速率如表4所示。P1阶段和P2阶段的各系列出水TN规律基本一致,但P2阶段的出水TN下降速率明显低于P1阶段。1系列停运后,作为试验组,1系列出水TN下降。原因是停运期间,1系列生物池有微量曝气,曝气量约为3 000~4 000 m³/h,溶解氧质量浓度

表4 试验各阶段TN下降速率[单位:mg/(L·h)]

Tab. 4 Drop Rate of TN at Each Stage of the Experiment [Unit: mg/(L·h)]

阶段	1系列	2系列	3系列	4系列
P1阶段	0.334	0.167	0.108	0.018
正常运行阶段	0.151	0.153	-0.098	0.007
P2阶段	0.258	0.278	0.081	0.078
正常运行阶段	-0.233	-0.121	-0.136	-0.095
P3阶段	0.059	0.163	0.081	0.143
正常运行阶段	0.007	0.028	-0.018	0.058
P4阶段	0.152	0.119	0.155	0.279

始终保持在2~4 mg/L,相当于对生物池进行了闷

曝,污泥龄变长,污水在缺氧区的水力停留时间变长;另一方面,生物池停运期间,停运前在缺氧段未被完全利用的外加碳源继续在缺氧段循环,反硝化菌继续进行反硝化反应,反硝化效果变好(此时没有外加碳源)。2、3、4系列出水 TN 下降,是因为 1 系列停运期间,原来分配给 1 系列的进水量平均分配到其他系列,导致其他系列的进水量增加,生物池进水碳源总量增加,反硝化阶段的碳源增多,反硝化效果变好。1 系列恢复后,出水 TN 上升,是因为各系列进水量减少,进水碳源减少,反硝化效果变差。P2 阶段的出水 TN 下降速率明显低于 P1 阶段,原因是 1 系列第 2 次间歇运行时,整体污泥龄和水力停留时间进一步变长,超过了反硝化菌的世代周期太多,反硝化菌老化,反而影响了脱氮的效率。但 P4 没有出现出水 TN 下降速率明显低于前一阶段的现象,反而上升了,所以该原因需要再分析下。

P3 阶段,将试验组调至 4 系列,试验交替运行生物池的效果。由于当日进水 C/N 较低,与 P1 阶

段和 P2 阶段相比分别低 22% 和 32%,反硝化阶段所需的碳源不足,所以 4 系列停运后,4 系列出水 TN 虽然持续下降,但下降速率低于 P1 和 P2 阶段试验组的下降速率。

P3、P4 阶段的试验结果与 P1、P2 阶段的试验结果基本一致,说明切换到其他系列进行间歇运行,也可以有较好的脱氮效果。

4.3 经济效益分析

春节期间交替运行生物池,为污水处理厂带来的经济效益主要体现在 4 个方面:1)交替运行期间各系列曝气量降低,电费减少;2)交替运行期间,外回流泵等设备停运,电费减少;3)交替运行期间节省了外加碳源,药剂费减少;4)无外加碳源条件下,污泥产量降低,污泥处理处置成本降低。主要经济效益计算如表 5 所示,其中电费为 0.730 元/(kW·h),碳源药剂每吨单价为 1 250 元,污泥处理药剂每吨单价为 25 000 元。由表 5 可知,间歇运行生物池期间,运行费用降低 27 941 元/d,吨水处理费用减少 0.12 元。

表 5 主要经济效益计算

Tab. 5 Calculation of Main Economic Benefits

曝气节省电量/ [(kW·h)·d ⁻¹]	设备节省电量/ [(kW·h)·d ⁻¹]	污泥处理节省电量/ [(kW·h)·d ⁻¹]	污泥处理节省药量/ (kg·d ⁻¹)	碳源药剂节省药量/ (kg·d ⁻¹)	共节省费用/ (元·d ⁻¹)
1 530	510	1 418	109	18 153	27 941

5 结论

(1)污水处理厂春节期间会出现进水 COD_{Cr} 降低、进水 C/N 比大幅降低、进水量降低等现象,这也是导致污水处理厂出水 TN 上升的主要原因。

(2)春节假期前,进水量和 C/N 比缓慢下降,可以采取将好氧末端调整为脱气状态、增加缺氧段进水配比、超越初沉池、延长缺氧段停留时间等方法。春节假期第 2~3 d 开始,进水量和 C/N 比降低到低值,可以采取投加外碳源、交替运行生物池的措施。根据交替运行生物池的试验结果,春节期间交替运行生物池,停止进水的生物池出水 TN 质量浓度降低了 4~5 mg/L,出水 TN 最大下降速率可以达到 0.334 mg/(L·h)。其他未停止进水的生物池,出水 TN 最大下降速率为 0.278 mg/(L·h)。

(3)春节假期期间交替运行生物池,可选择出水硝态氮较高的生物池进行停止进水 12 h 后、恢复运行 12 h 的循环,单个生物池可连续循环多次,若生产线较多,每次可选择多个生物池进行同时进行

交替运行。

(4)春节假期期间在交替运行生物池的运行措施下,与传统的增加碳源的方法对比,污水厂在曝气、设备运行、污泥处理等方面的电费及药剂费均有所降低,吨水处理费用节省约 0.12 元。

参考文献

- [1] 宋晓雅. 春节期间凉水河流域典型污水处理厂进水水质分析[J]. 给水排水, 2021, 47(s1): 201-205.
SONG X Y. Analysis of influent water quality of typical sewage treatment plants in Liangshui river basin during Spring Festival [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(s1): 201-205.
- [2] 王小玲,王宏武,万晓瑞,等. 一种具有脱气功能的推流式污水生物处理系统: 201822156898. 8[P]. [2023-06-15].
WANG X L, WANG H W, WAN X R, et al. The utility model relates to a push-flow sewage biological treatment system with deqigong ability: 201822156898. 8[P]. [2023-06-15].
- [3] 吴一平,王旭东. 初沉污泥作为生物脱氮除磷快速碳源的转化因素研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(4): 501-503, 508.

- WU Y P, WANG X D. Study on primary sludge hydrolysis as biological nitrogen and phosphorous removal[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2005, 37(4): 501-503, 508.
- [4] 吉芳英, 陈思, 刘娜. 污水处理中微生物反硝化脱氮过程及代谢规律[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2013, 26(4): 10-14.
- JI F Y, CHEN S, LIU N. Denitrifying denitrification process and metabolic rule of microorganisms in wastewater treatment [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2013, 26(4): 10-14.
- [5] 吴芳磊, 贺航运, 陈博涵, 等. 低 C/N 进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2711-2719.
- WU F L, HE H Y, CHEN B H, et al. The efficiency and microbial change of urban sewage plant with low C/N influent based on low DO strategy[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2711-2719.
- [6] 甘露, 张磊, 姜洋彬, 等. 我国污水处理厂主要运行工艺分析[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 196-198.
- GAN L, ZHANG L, JIANG Y B, et al. Analysis of main operating processes of domestic wastewater treatment plants in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(5): 196-198.

(上接第 207 页)

- [19] KARPINSKA A M, BRIDGEMAN J. CFD-aided modelling of activated sludge systems—A critical review[J]. Water research, 2016, 88: 861-879. DOI: 10.1016/j.watres.2015.11.008.
- [20] GAO H, STENSTROM M K. Turbulence and interphase mass diffusion assumptions on the performance of secondary settling tanks[J]. Water Environment Research, 2019, 91(2): 101-110.
- [21] MINNIE J, GASZYNSKI C, BASITERE M. Modelling filamentous bacteria in activated sludge systems and the advancements of secondary settling tank models; A review[J]. Biochemical Engineering Journal, 2022, 186: 108598. DOI: 10.1016/j.bej.2022.108598.
- [22] GUYONVARCH E, RAMIN E, KULAHCI M, et al. iCFD: Interpreted computational fluid dynamics-degeneration of CFD to one-dimensional advection-dispersion models using statistical experimental design—The secondary clarifier [J]. Water research, 2015, 83: 396 - 411. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.012.