

鲍任兵, 徐健, 张云志, 等. 多级 AO 工艺短程硝化反硝化的启动与运行调控[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 95-103.

BAO R B, XU J, ZHANG Y Z, et al. Start-up and operation regulation of shortcut nitrification-denitrification in multi-stage AO processes[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 95-103.

多级 AO 工艺短程硝化反硝化的启动与运行调控

鲍任兵^{1,*}, 徐健¹, 张云志², 夏娜¹, 蔡世颜¹, 杜敬², 万年红¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北武汉 430070)

摘要 采用处理水量为 0.15 m³/h 的中试装置, 开展多级 AO 工艺耦合短程硝化反硝化处理低 C/N 城市污水试验研究, 通过优化溶解氧控制、污泥浓度及进水分配比, 探究最佳运行工况, 并通过分析各工况下的氮组分变化, 探讨实现短程硝化反硝化的触发条件。结果表明, 水温为 14 ℃ 以上时, 通过微氧运行、增大污泥浓度、进水分配比设为 30%:10%:30%:30%, 出水可实现优于一级 A 排放标准, 并实现了部分短程硝化反硝化, 降低了 12.5% 的曝气量和 20% 的碳源需求, 为今后污水处理厂的提标改造和节能降耗提供技术支持。

关键词 多级 AO 工艺 短程硝化反硝化 多点进水分配 溶解氧控制 脱氮

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)09-0095-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.09.012

Start-Up and Operation Regulation of Shortcut Nitrification-Denitrification in Multi-Stage AO Processes

BAO Renbing^{1,*}, XU Jian¹, ZHANG Yunzhi², XIA Na¹, CAI Shiyan¹, DU Jing², WAN Nianhong¹

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract A test device with treatment scale of 0.15 m³/h was used to carry out a multi-stage AO processes coupled with SND to treat low C/N urban wastewater. The optimal operating conditions were explored by optimizing dissolved oxygen control, sludge concentration and influent distribution ratio. The trigger conditions for shortcut nitrification-denitrification were discussed by analyzing the changes of nitrogen components under various operating conditions. The results showed that when the water temperature was above 14 ℃, through micro oxygen operation, increasing sludge concentration and setting the influent distribution ratio as 30%:10%:30%:30%, the effluent can be better than the first-class A discharge standard. Also, partial shortcut nitrification-denitrification was realized, reducing the aeration volume and carbon source demand by 12.5% and 20%, so as to provide technical support for the upgrading and transformation of WWTP and energy conservation and consumption reduction in the future.

Keywords multi-stage AO processes shortcut nitrification-denitrification multipoint inflow distribution dissolved oxygen control denitrification

在我国中部和南部地区, 由于存在污水收集率不高、排水管道入渗、雨污混流等问题, 污水处理厂普遍存在进水碳氮比(C/N)较低的情况^[1-2], 导致 TN 去除率不高, 很难达到日益严苛的出水 TN 要求

(TN 质量浓度 ≤ 10 mg/L 或 8 mg/L)。以一级 A 为出水标准(TN 质量浓度 ≤ 15 mg/L)的污水处理厂在提标改造时, 通常采用外加碳源或新建深度脱氮单元来实现更低的出水 TN; 而在用地较为紧张的时候, 外加碳源似乎成为了最为简单的首选方案, 但这不可避免地增加了污水处理厂的运行成本, 也对日常调控带来了更大的挑战^[3]。如何响应“碳中和”和“碳达峰”的目标要求, 进一步探索更为绿色、节能的污水处理工艺及优化调控策略, 成为了当今行

[收稿日期] 2022-05-09

[基金项目] 湖北省建设科技计划项目; 双碳背景下城镇污水处理厂强化脱氮除磷工艺技术研究

[通信作者] 鲍任兵(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为水体污染与防治, E-mail: rbingbao@163.com。

业技术发展的新命题。

在污水生物脱氮过程中主要存在常规硝化反硝化、同步硝化反硝化、短程硝化反硝化 (shortcut nitrification-denitrification, SND) 及厌氧氨氧化等反应。近年来,同步硝化反硝化和 SND 因其在低进水浓度、低曝气量下具有较高的脱氮性能,有助于降低污水处理药耗及能耗、提高处理效能,弥补了常规活性污泥工艺的不足,受到了广泛关注。SND 是通过控制生化池溶解氧 (dissolved oxygen, DO), 将氨氮的硝化反应控制到生成 NO_2^- -N, 并直接进行反硝化反应,省去了 NO_2^- -N \rightarrow NO_3^- -N \rightarrow NO_2^- -N 的过程。SND 不仅可以降低曝气量节约电能,还能在低碳源的基础上保持较高的反硝化脱氮性能。根据理论公式, SND 能够节省 25% 的供氧量和 40% 的有机碳源^[4], 是污水生化处理提质增效和减少碳排放的有效手段。根据王海等^[5] 研究,碳源类型和 DO 控制是影响 SND 反应的关键因素。SND 需要在生化池低曝气量下实现 NO_2^- -N 的稳定积累,但出水氨氮往往无法稳定达标,或发生不完全反硝化,导致出水 TN 浓度超标,这成为限制 SND 大规模应用的主要因素。另外,多级厌氧好氧 (AO) 工艺因其交替的“缺氧/好氧”单元及多点进水分配的特点,不仅能够实现进水碳源的充分利用,也是减小外加碳源下强化脱氮性能的有效途径^[6-7]。多级 AO 工艺的重点优化控制点在于各 AO 段的容积控制、DO 控制及多点进水分配等。相关研究^[8-9] 表明,各级缺氧区与好氧区的容积比设为 0.6、进水分配比设为 5:4:3 时,在进水 C/N 为 6 下仍能保证较好的氮、磷去除效果。

鉴于两种工艺在低 C/N 下的处理优势,本研究通过将多级 AO 工艺作为 SND 的反应主体,并引入微氧曝气、多点进水^[10] 等定量优化控制措施,旨在将多段 AO 单元的中部实现 SND 反应控制,并利用后段好氧区保证出水氨氮和 TN 浓度达标,以探究实现多级 AO-SND 的关键触发条件及调控策略,为今后污水处理厂工程设计及生产运行提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

如图 1 所示,本试验以三级 AO 为基础,设有多点进水系统,进水可分别进入生化池的厌氧区、缺氧 1 区、缺氧 2 区和缺氧 3 区,进水分配比可根据需要进行灵活调整。二沉池的回流污泥先进入污泥再生池,经过微曝气再生后进入厌氧区。



图 1 多级 AO 工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Multi-Stage AO

1.2 试验方法

(1) 设计参数

本试验处理规模为 $0.15 \text{ m}^3/\text{h}$, 主要由生化池和二沉池组成。如图 2 所示,本试验装置生化池尺寸 (长 \times 宽 \times 高) 为 $2.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$, 有效容积为 2.6 m^3 , 试验装置总水力停留时间 (HRT) 为 19.1 h。生化池共分为 7 个区域, 污水依次通过厌氧区、缺氧 1 区、好氧 1 区、缺氧 2 区、好氧 2 区、缺氧 3 区、好氧 3 区。

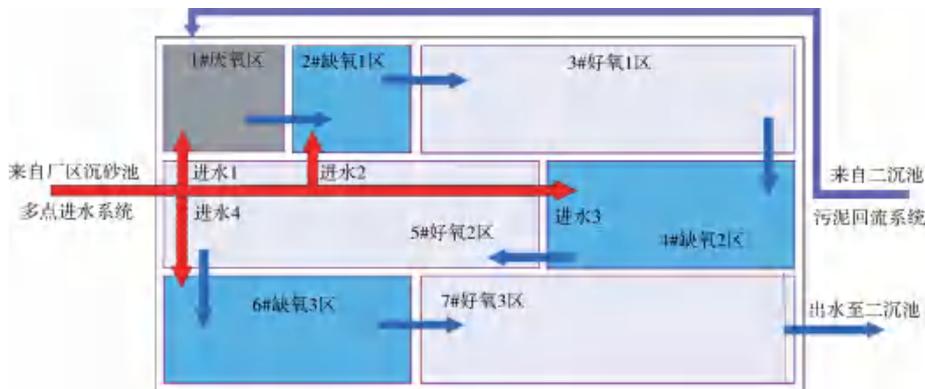


图 2 生化池试验装置

Fig. 2 Test Device of Biochemical Tank

3区。本试验装置各段AO区容积比采用2:3, HRT依次为1.2、1.2、3.5、2.9、4.4、2.4、3.5 h。二沉池采用中进周出式圆形沉淀池, 直径为0.8 m。

(2) 污泥接种

本试验装置活性污泥取自厂区生化池内, 经一周时间稳定后试验装置内污泥浓度达到稳定, 沉降性能良好, 混合液悬浮固体质量浓度 (MLSS) 为3 000 mg/L左右。

(3) 试验方案

试验分为多级AO工艺启动阶段和优化运行阶段(SND启动、进水分配试验)。

多级AO工艺启动阶段进水分配比例采用40%:20%:20%:20%; 在运行启动阶段污泥再生池不曝气; 剩余污泥排放量为260 L/d(污泥龄为10 d); 生化池内MLSS为3 000~5 000 mg/L; 总气水比采用4:1, 通过设置气体流量计及阀门控制好氧1区和好氧2区内原始DO质量浓度为2.0 mg/L, 好氧3区DO质量浓度为3.0 mg/L。试验装置运行稳定后通过分析各反应区内的DO、污泥浓度及关键水质指标, 提出优化控制方式。优化运行阶段将进水分配比设为40%:20%:20%:20%(工况1)(与初始阶段一致)、30%:20%:30%:20%(工况2)、30%:10%:30%:30%(工况3), 并进行DO控制试验, 通过检测各工况下各反应区内的氮组分(NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN)浓度变化, 分析SND的实现条件及运行参数。

在试验过程中, 曝气量控制至关重要, 为保证各反应区的DO条件, 在各进水分配调整后均需要重新计算调整各好氧区的曝气量。微氧控制有助于SND的快速实现, 但也易导致出水NO₂⁻-N超标^[11], 因此, 重点在保证前两级好氧区位于微氧状态, 最后一级好氧区位于高氧状态, 以实现多级AO中部的NO₂⁻-N积累和最终出水的NO₂⁻-N和氨氮的达标。

1.3 试验原水

试验原水取自某污水处理厂沉砂池出水, 水质数据如表1所示。本试验污水C/N(BOD₅/TN)在1.4~1.8, 而根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021), C/N(BOD₅/TKN)宜大于4, 可见进水中的有机碳源严重不足, 需要重点关注缺氧区反硝化的实现条件, 尽量减小好氧区的无效碳源损耗。

表1 试验原水水质

Tab. 1 Raw Water Quality in Test

指标	数值
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	124~250
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	50~80
TN/(mg·L ⁻¹)	28~35
氨氮/(mg·L ⁻¹)	13~21
TP/(mg·L ⁻¹)	1.3~2.5
pH值	7.2~7.6

1.4 检测指标及分析方法

(1) 检测指标

中试装置稳定运行后, 每日进行进出水水质监测。检测指标包括COD_{Cr}、BOD₅、氨氮、TN、TP、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、pH、DO、电导率、污泥浓度[MLSS、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)]等, 测试方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

(2) NO₂⁻-N 累积率分析

为定量分析生化池在运行过程中产生SND的标志性参数, 本试验根据张功良等^[12]研究, 计算NO₂⁻-N累积率, 按式(1)进行分析。

$$r = \frac{C_{NO_2^- - N}}{C_{NO_2^- - N} + C_{NO_3^- - N}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: r——NO₂⁻-N 累积率;

C_{NO₂⁻-N}——生化池运行中的NO₂⁻-N质量浓度, mg/L;

C_{NO₃⁻-N}——生化池运行中的NO₃⁻-N质量浓度, mg/L。

(3) SND 贡献率分析

目前针对SND在脱氮过程中的贡献率分析尚无相关报道, 本试验通过计算多级AO工艺中3段AO单元的NO₂⁻-N浓度差的累积与进出水TN的浓度差比值, 即按式(2)来指示整体脱氮反应过程中SND的贡献率。

$$\eta = \frac{\sum \Delta C_{NO_2^- - N}(AO_i)}{\Delta C_N} \times 100\% \quad (2)$$

其中: η——SND 贡献率;

∑ΔC_{NO₂⁻-N}(AO_i)——各段AO单元的

NO_2^- -N 质量浓度差之和,mg/L;

ΔC_N ——进出水 TN 质量浓度差,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 多级 AO 工艺启动

中试装置经两周启动,出水 COD_{Cr} 、 BOD_5 、SS、TN、氨氮能稳定达到一级 A 排放标准。其中,出水 COD_{Cr} 和氨氮均能达到地表 IV 类水质标准,去除率分别稳定达到 80% 和 90% 以上;出水 TN 质量浓度位于 13 mg/L 左右,去除率为 50% 左右;而出水 TP 质量浓度在启动末期位于 0.5 mg/L 左右,还不能稳定达标。本试验阶段进水 BOD_5 质量浓度为 53~75 mg/L, BOD_5/TN 为 2.59~2.76,进水碳源不足,导致 TN 去除率不高。

对出水氮元素成分进一步分析,发现 NO_3^- -N 占比最大,为 91.34%;而氨氮和 NO_2^- -N 占比较小,其中出水氨氮质量浓度稳定低于 0.5 mg/L,说明控制好氧 1 区和好氧 2 区内 DO 质量浓度为 2.0 mg/L,好氧 3 区 DO 质量浓度为 3.0 mg/L 时,可保证生化池硝化反应较完全。同时对各级缺氧区进行氮成分分析,发现 NO_2^- -N 累积率几乎为 0,说明此运行条件下未发生 SND 反应,存在进一步降低曝气量的空间。

2.2 运行优化试验

(1) SND 启动

如图 3 所示,将整体气水比由 4:1 降低至 3.5:1,各反应区 DO 整体下降并进行单独控制。其中厌氧区和缺氧 1 区质量浓度均为 0.2 mg/L 以下;好氧 1 区质量浓度由 2.58 mg/L 下降至 1.72 mg/L;缺氧 2 区质量浓度由 0.47 mg/L 下降至 0.33 mg/L;好氧 2 区质量浓度由 2.66 mg/L 下降至 1.67 mg/L;缺氧 3 区质量浓度由 0.42 mg/L 下降至 0.29 mg/L;好氧 3 区质量浓度由 3.25 mg/L 下降至 2.23 mg/L。稳定运行一周后,氨氮去除率为 97.77% 左右,TN 去除率为 50.42% 左右,出水中 NO_2^- -N 质量浓度达到 1.0 mg/L 左右, NO_2^- -N 累积率为 8.77%,说明好氧区 DO 的降低能够有效增加 NO_2^- -N 的累积,为实现 SND 提供良好的条件。然而,此时出水氨氮质量浓度却达到 2.30 mg/L 左右,无法实现 1.50 mg/L 以下的要求。

为增强本中试装置生化池内污泥浓度,提升硝化反应能力,从厂区生化池补充污泥,并将污泥龄由 10 d 提高至 15 d。为进一步增强污泥活性,增大污

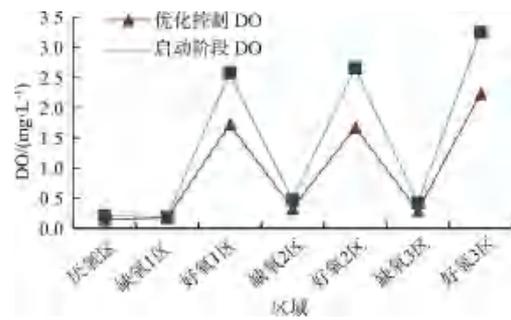


图 3 各反应区 DO 浓度变化

Fig. 3 Dissolved Oxygen Change in Each Reaction Area
 泥生长速率,在二沉池回流污泥后增设污泥再生池,并控制 DO 质量浓度位于 0.5 mg/L 左右。如图 4 所示,经过一周时间稳定,各反应段污泥浓度显著升高,其中好氧 3 区 MLSS 质量浓度由 2 637 mg/L 增大到 4 358 mg/L, f 值(通常采用 MLVSS/MLSS 值表示生化池内的活性污泥中的微生物占比)由 0.41 升高至 0.49。进一步对出水检测,此时出水氨氮质量浓度为 1.0 mg/L 左右, NO_2^- -N 累积率在第二缺氧区达到峰值,为 5.32%,说明微氧及较高的污泥浓度能够实现 SND 的快速启动。

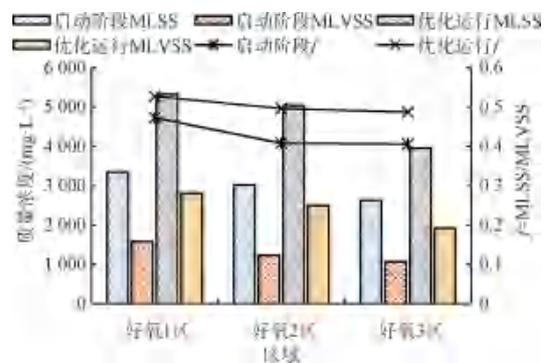


图 4 各反应段污泥浓度变化

Fig. 4 Variation of Sludge Concentration in Each Reaction Section

温度和 pH 也是影响污水生化反应的重要因素,大部分污水厂难以在低温条件下实现较好的 TN 去除效果。在试验初期水温为 15~19 °C,但生化池内 MLSS 较低,质量浓度为 2 000~3 000 mg/L,基本无法产生 NO_2^- -N 的积累,SND 无法实现。随着试验的进行,水温逐渐降低至 12~15 °C,同时为了优化好氧硝化效果,提升生化池内的 MLSS 至 4 000~5 000 mg/L,TN 和 TP 去除率相应提升, NO_2^- -N 累积率也得到了有效提高。因此,MLSS 更能影响 SND 反应的进行,当水温低于 15 °C 时采取增大 MLSS 至

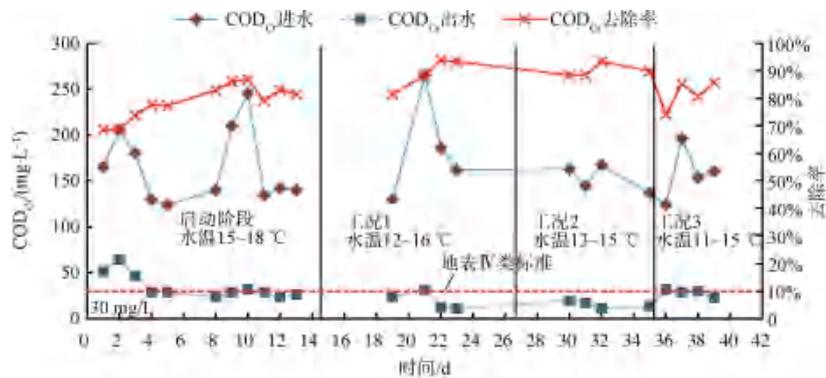
4 000~5 000 mg/L,可有效实现 SND 反应。另外,在本试验过程中,进水 pH 值位于 7 以上,能够为反硝化提供较好的反应条件。通过对每日的出水进行分析,发现当 pH 值高于 7.5 时,出水的 NO_2^- -N 明显增多,说明更高的 pH 更有助于 SND 的实现。同时,试验过程中发现当温度低于 12 ℃ 时,出水氨氮质量浓度偶尔超过 2.0 mg/L,说明在低温条件下微氧条件运行有氨氮超标风险。

(2) 进水分配试验

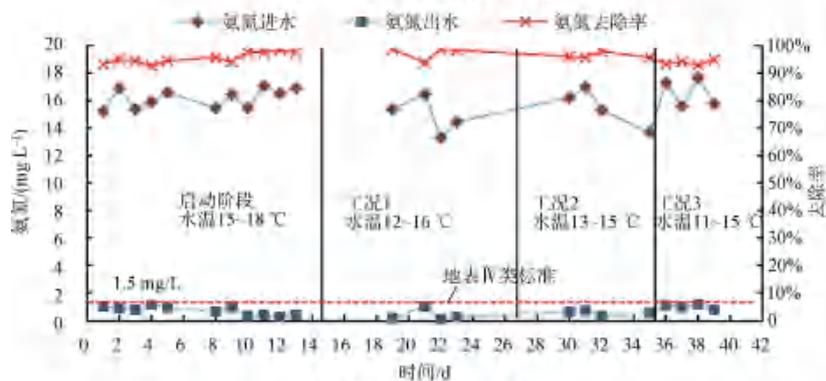
进水分配比是多级 AO 工艺的重要运行参数,其调整将对生化反应产生较大影响,并直接影响出水水质。本试验多级 AO 工艺共设置有 4 个进水

点:厌氧区、缺氧 1 区、缺氧 2 区和缺氧 3 区。为探究进水分配比对多级 AO 工艺的出水水质影响,本试验将进水分配比设为 40%:20%:20%:20% (工况 1) (与初始阶段一致)、30%:20%:30%:20% (工况 2)、30%:10%:30%:30% (工况 3)。

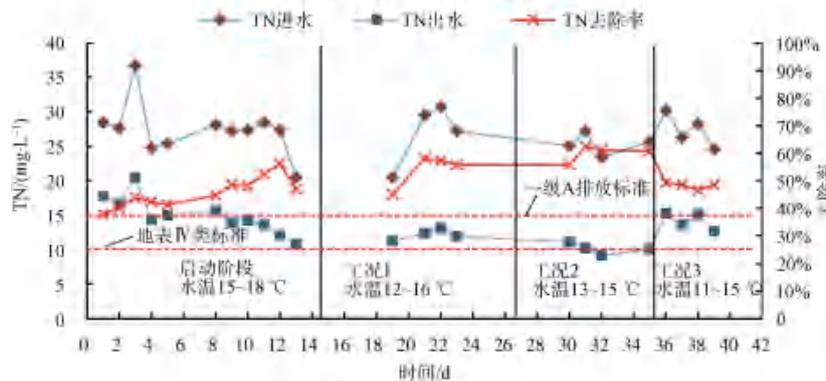
本试验期间水温由启动阶段的 19 ℃ 左右逐渐降低至 15 ℃ 以下,MLSS 在 5 000 mg/L 左右。如图 5 所示,各项污染物指标均保持了较好的去除效果,其中,出水 COD_{Cr} 和氨氮显著能稳定达到地表水 IV 类标准;TN 去除率由 50.42% 提高至 57.17%,TP 去除率由 84.10% 提高至 91.22%,均能达到优于一级 A 排放标准。



(a) 各进水分配下 COD_{Cr} 去除性能



(b) 各进水分配下氨氮去除性能



(c) 各进水分配下 TN 去除性能

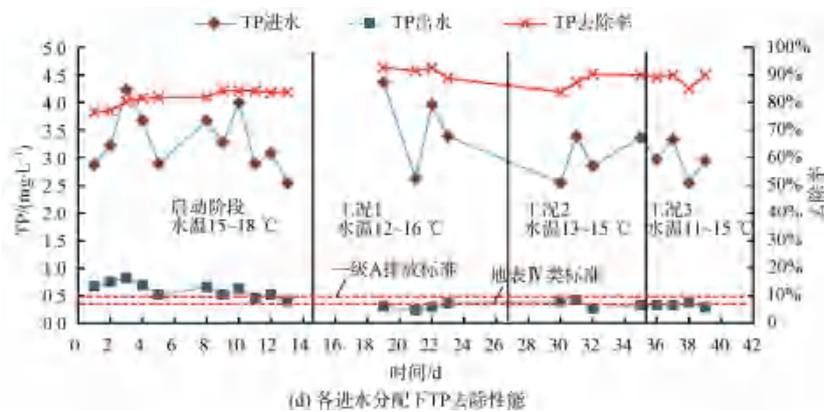


图5 各进水分配下主要污染物去除性能

Fig. 5 Removal Performance of Main Pollutants under Each Influent Distribution

工况1和工况2运行条件下 COD_{Cr} 去除率较稳定,均在90%以上,氨氮去除率略有下降,但仍保持在90%左右,出水氨氮质量浓度均能稳定达到1.0 mg/L以下,且出水TN中 NO_3^- -N占比较高, NO_2^- -N在5%以下,说明工况1和工况2条件下有机物氧化反应和硝化反应较充足,各段AO单元均能实现较为完全的好氧反应。工况3条件下 COD_{Cr} 和氨氮去除率均明显下降,说明当第三段AO进水比例达到30%以上后将超出其氧化能力,导致出水 COD_{Cr} 和氨氮升高。进水分配比为30%:20%:30%:20%的条件下TN去除率最高,达到61.43%。进水TN质量浓度在25.45 mg/L时,出水TN质量浓度达到10 mg/L左右。对于TP,随着第一段AAO进水分配比的减小,去除率略有下降,但3种运行工况下去除率较为稳定,去除率均保持在88%~92%。其中在进水TP质量浓度为2~4 mg/L时,控制第一段AAO进水分配比为50%~60%的条件下,出水TP质量浓

度能稳定达到0.3 mg/L左右。

为进一步探究3种工况对TN的去除效果及SND实现程度,分别在典型运行条件下检测了出水 NO_3^- -N和 NO_2^- -N。如图6所示,随着后两段AO进水比例的增大,出水 NO_3^- -N占比由91%依次减小至73%,氨氮和 NO_2^- -N占比相应上升。工况1条件下出水氨氮和 NO_2^- -N占比之和最低,但TN去除率较低,说明此运行条件下虽然硝化反应较为彻底,但由于第一段AAO进水分配达到60%,大部分有机物经好氧1区曝气后被去除,后两段缺氧区有机碳源不足,反硝化效率低。工况3条件下出水氨氮和 NO_2^- -N占比之和为20%,TN去除率仅有47.88%,说明此运行条件下后段进水比例过高,导致进水中的氨氮硝化或反硝化不充分,引起 NO_2^- -N积累。3种工况下出水 NO_2^- -N累积率分别为0、5%和13%。工况3下有明显的 NO_2^- -N积累,出现了明显的SND反应,但出水水质尚无法稳定达标。

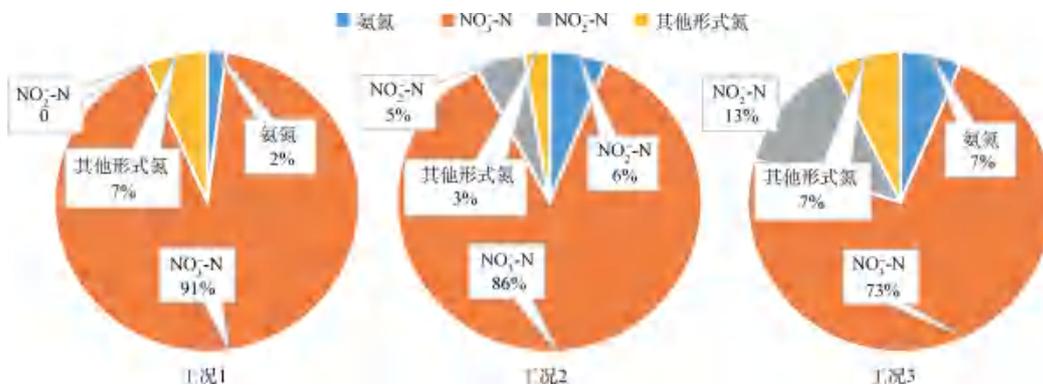


图6 各运行工况出水氮成分变化

Fig. 6 Variation of Nitrogen Composition in Effluent under Various Operation Conditions

2.3 SND 过程分析与优化调控

经过 3 种多点进水分配试验,工况 2 和工况 3 下水均出现了明显的 NO_2^- -N 积累现象。为进一步分析多级 AO 工艺各反应区的 SND 过程,探究出水达标前提下实现 SND 的关键条件,对工况 2 和工况 3 下的氮组分变化进行分析。

如图 7 所示,工况 2 下在厌氧区至好氧 1 区中 TN 浓度保持平稳,质量浓度位于 15 mg/L 左右,进入缺氧 2 区和好氧 2 区后迅速降低至 12 mg/L 左右,经过缺氧 3 区和好氧 3 区后逐渐降低至 10 mg/L,二沉池出水保持在 10 mg/L 以下。由于污泥回流的影响,工况 2 厌氧区 NO_3^- -N 质量浓度为 2.95 mg/L,经过缺氧区反硝化反应后 NO_3^- -N 降低至 1.76 mg/L。进入好氧 1 区后, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 质量浓度分别迅速升高至 6.12 mg/L 和 2.85 mg/L。 NO_2^- -N 浓度较高,说明在好氧 1 区内,DO 质量浓度为 1.5~2.0 mg/L 的运行条件下硝化反应不充分。污水进入缺氧 2 区后 TN 质量浓度大幅降低至 12.11 mg/L,而 NO_2^- -N 略有下降。在缺氧 3 区和好氧 3 区, NO_3^- -N 质量浓度先下降至 6.55 mg/L 随后升高至 8.95 mg/L; NO_2^- -N 则逐渐降低,出水质量浓度达到 0.5 mg/L 以下。工况 3 下 TN 变化趋势略有不同,缺氧 2 区内达到最小,随后上升,说明同样在缺氧 2 区内实现了反硝化速率高于硝化反应速率,缺氧 3 区由于进水比例的加大,TN 浓度略微升高。

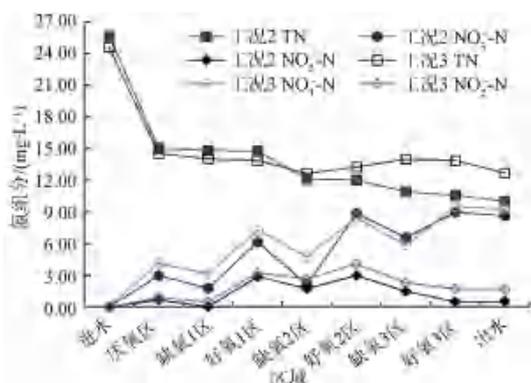


图 7 工况 2 和工况 3 下各反应区氮组分浓度变化
Fig. 7 Variation of Nitrogen Component Concentration in Each Reaction Area in Working Condition 2 and 3

由氮组分变化趋势可见,工况 1 的大部分反硝化脱氮均主要发生在缺氧 2 区,反硝化占比约为 53.54%;工况 3 下缺氧 2 区和缺氧 3 区的反硝化占

比相差不大,分别为 41.17% 和 42.65%。结合两种工况下的 NO_2^- -N 浓度变化,在缺氧 2 区后期工况 3 出现了更多的 NO_2^- -N 积累。工况 2 典型情况下,厌氧区和缺氧 1 区、好氧 1 区和缺氧 2 区、好氧 2 区和缺氧 3 区的 NO_2^- -N 质量浓度差分别为 0.62、1.13 mg/L 和 1.49 mg/L,进出水 TN 质量浓度差为 15.62 mg/L,计算 SND 贡献率为 20.74%;工况 3 典型情况下,上述反应区内的 NO_2^- -N 质量浓度差分别为 0.38、0.57 mg/L 和 1.80 mg/L,进出水 TN 质量浓度差为 11.90 mg/L,计算 SND 贡献率为 23.11%,说明在工况 3 下获得了更高的 SND 反应程度。

然而,工况 3 下水 TN 去除率较低,整体反硝化程度不足。进一步对工况 3 情况下的各反应区 COD_{Cr} 、氨氮和 DO 进行检测,发现好氧 2 区内 COD_{Cr} 和氨氮质量浓度分别为 27 mg/L 和 0.3 mg/L 左右,而出水却较差,好氧 2 区和好氧 3 区内 DO 质量浓度分别为 2.2 mg/L 和 2.5 mg/L,说明好氧 2 区内有机物氧化和硝化反应较完全,而好氧 3 区由于进水比例增大,氧化反应不够充分。通过调整阀门进一步优化曝气量控制,将好氧 2 区内 DO 质量浓度控制在 1.0~1.5 mg/L,将好氧 3 区内 DO 质量浓度控制在 2.8~3.0 mg/L,出水 TN 去除率提高至 60% 左右。

在保证出水 COD_{Cr} 和氨氮高去除率的基础上,工况 3 下气水比为 3.5:1,相较于启动阶段(4:1)所需的曝气量减小了 12.5% 左右。如表 2 所示,工况 2 和 3 运行条件实现了在更低的 BOD_5/TN 进水条件下较高的 TN 去除率。 $\Delta\text{BOD}_5/\Delta\text{TN}$ 反映在去除相同 TN 情况下的有机碳源需求量,通过计算工况 3 相较于启动阶段,可节省碳源量为 20% 左右,也即在相同的进水水质条件下,采用工况 3 运行可提升约 27% 的 TN 去除率。

表 2 各工况下进水碳源及 TN 去除性能对比
Tab. 2 Comparison of Influent Carbon Source and TN Removal Performance in Each Working Condition

工况	进水 BOD_5/TN	TN 去除率	$\Delta\text{BOD}_5/\Delta\text{TN}$
启动阶段	2.55	50.42%	4.48
工况 2	2.38	61.43%	3.52
工况 3	2.33	60.56%	3.58

3 结论

(1) 为强化多级 AO 工艺的脱氮性能,在水温位

于 14 ℃ 以上时,可采用微氧环境运行,使好氧 1 区和好氧 2 区 DO 质量浓度位于 1.5 mg/L 左右,好氧 3 区 DO 质量浓度位于 2.0 mg/L 左右,并尽量降低厌氧和缺氧区 DO;增大 MLSS,使好氧 3 区 MLSS 增大到 4 000 mg/L 以上;增设污泥再生区,控制低溶解氧曝气(DO 质量浓度=0.2~0.5 mg/L),增强污泥活性。

(2)在进水 BOD₅/TN 为 2.59~2.76 下,多级 AO 工艺通过多点进水方式可有效提高 TN 和 TP 去除性能。在水温为 14 ℃、进水 TN 质量浓度为 25 mg/L 左右下,进水分分配比设为 30%:20%:30%:20%时,TN 去除率最高;对于 TP 的去除情况,随着第一段 AAO 的进水分分配比的减小,去除率略有下降,但总体上去除率较为稳定,控制第一段 AAO 进水分分配比为 50%~60%的条件下,出水 TP 质量浓度能稳定达到 0.3 mg/L 左右。

(3)当水温低于 15 ℃ 时,可通过提高 pH 值达到 7.5 以上,MLSS 为 4 000~5 000 mg/L,实现多级 AO 工艺的 SND 快速启动;当水温低于 12 ℃ 时,在低温条件下微氧条件运行有氨氮超标风险,不适宜采用 SND 方式运行。

(4)进水分分配比为 30%:10%:30%:30%,好氧 2 区内 DO 质量浓度控制在 1.0~1.5 mg/L,将好氧 3 区内 DO 质量浓度控制在 2.8~3.0 mg/L,实现了较高的 SND 反应发生,占全部脱氮量的 23%左右,降低了 12.5%的曝气量和 20%的碳源需求,能有效降低运行成本,实现水质进一步提升。

参考文献

- [1] 李激,罗国兵,李冰冰,等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-14.
- LI J, LUO G B, LI B B, et al. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on empassis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-14.
- [2] 景香顺,李鑫玮,张晓红,等. 低碳源市政污水处理优化运行的研究与工程应用[J]. 给水排水, 2019, 55(11): 33-37.
- JING X S, LI X W, ZHANG X H, et al. Research and engineering application of optimized operation of municipal wastewater treatment with low carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(11): 33-37.
- [3] 袁飞,马一行,卫鸣志. 城镇污水处理厂强化生物脱氮除磷的工艺优化探索与应用[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 173-178.
- YUAN F, MA Y X, WEI M Z. Exploration and application of process optimization for enhanced biological nitrogen and phosphorus removal in municipal sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 173-178.
- [4] 吕利平,李航,庞飞,等. 交替好氧/缺氧短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 城市污水[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1529-1536.
- LÜ L P, LI H, PANG F, et al. Alternating aerobic/anoxic short-cut nitrification and denitrification process for treating low C/N urban sewage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1529-1536.
- [5] 王海,阮辰旻. 同步硝化反硝化脱氮的关键因素探讨[J]. 净水技术, 2015, 34(s1): 77-80, 113.
- WANG H, RUAN C M. Key factors on nitrogen removal via simultaneous nitrification and denitrification [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(s1): 77-80, 113.
- [6] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
- BAO R B, GAO T Y, GONG L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [7] 程明涛,冯仕训. 苏州市某污水处理厂扩建及提标改造工程工艺设计要点[J]. 净水技术, 2019, 38(9): 39-43, 53.
- CHENG M T, FENG S X. Key point of process design for expansion and renovation of a wastewater treatment plant in Suzhou [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(9): 39-43, 53.
- [8] 王秋慧,刘胜军,李祖鹏,等. 多段多级 AO 除磷脱氮工艺的 AO 容积比研究[J]. 给水排水, 2016, 52(s1): 84-87.
- WANG Q H, LIU S J, LI Z P, et al. Study on AO volume ratio of multi-stage AO process for phosphorus and nitrogen removal [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(s1): 84-87.
- [9] 王敏,张智,陈杰云,等. 不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1430-1434.
- WANG M, ZHANG Z, CHEN J Y, et al. Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1430-1434.
- [10] 罗凡,李捷. 基于仿真模拟的污水处理厂提标改造方案[J]. 净水技术, 2018, 37(5): 88-92.
- LUO F, LI J. Scheme of upgrading and reconstruction for WWTP based on analogue simulation [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(5): 88-92.

- [11] 吴春英. 新型短程硝化同步反硝化除磷工艺的快速启动[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 111-114.
- WU C Y. Rapid Start-up of a novel shortcut nitrification coupled with simultaneous denitrifying phosphorus removal process[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 111-114.

- [12] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 610-616.
- ZHANG G L, LI D, ZHANG X J, et al. Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 610-616.

(上接第 6 页)

报修、咨询等流程,提升用水的便捷性;通过数字水表实时传输用水量,分析和预警可能的饮用水安全风险;强化供水企业员工教育培训,提升服务意识,减少用水纠纷,提升满意度,实现供水服务体验满意率 99% 以上。

4 最优供水系统建设初步成效

随着这两年嘉兴市域外配水工程、现状水厂纳滤工艺提升改造项目、管网改造项目等民生工程相继完成。目前嘉兴市水源水千岛湖原水已提升至 40%,约 88%的管网干管材质已更换为球墨铸铁管、不锈钢管等优质管材,龙头水饮用水口感得到显著提升,例如高锰酸盐指数、硫酸盐、溶解性总固体、总有机碳的浓度分别降低 66.7%、76.1%、47.5%、63.0%,老百姓普遍反映自来水越变越清澈,口感越来越好。

通过 GIS 系统全覆盖、智能水表全覆盖、用户水龄监测全覆盖率、30 min 抢修应急服务圈全覆盖,实现水质更好、漏损率更低、服务更及时、满意度更高。即在一定的经济技术条件下,通过最优的管理,建立基于数字化、智慧化全方位的综合服务体系,提供水质安全、口感佳、稳定性好的龙头水,实现老百姓对饮用水的感官体验好,享受智慧精准服务的最佳体验。最优供水系统的实施将全面提升用户的获得感、幸福感和满意度,不断增进百姓福祉,助推嘉兴市最美城市建设和文明典范城市创建,助力嘉兴市长三角城市群重要中心城市建设。

参考文献

- [1] 浙江省生态环境厅. 2005 年浙江省环境状况公报[EB/OL]. (2006-06-05)[2023-07-29]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2006/6/5/art_1229631931_58940552.html. Zhejiang Provincial Department of Ecology and Environment. Environmental status bulletin of Zhejiang Province in 2005[EB/OL]. (2006-06-05)[2023-07-29]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2006/6/5/art_1229631931_58940552.html.
- [2] 徐帆,孙海平,张刚,等. 嘉兴饮用水处理技术的发展与回顾[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 7-11.
- XU B, SUN H P, ZHANG G, et al. Development and review of drinking water treatment technology in Jiaxing[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(2): 7-11.
- [3] 张燕,郑国兴,查人光,等. 高氨氮和高有机物污染河网原水组合处理技术集成与示范[J]. 给水排水, 2013, 39(3): 17-20.
- ZHANG Y, ZHENG G X, ZHA R G, et al. Technologies and demonstrations of drinking water treatment for water polluted by high concentrations of ammonia and organic pollutants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(3): 17-20.
- [4] 张燕,张富标,王为东,等. 浙江太湖河网地区饮用水安全保障技术集成与示范[J]. 中国给水排水, 2017, 33(7): 42-45.
- ZHANG Y, ZHANG F B, WANG W D, et al. Technologies and demonstrations of drinking water safety in river network region[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 42-45.
- [5] ZHANG Y, LIU H Y, LIU Y. Optimization of enhanced sand filtration with secondary-flocculation for polluted water treatment[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(11): 2867-2874.
- [6] LIU H Y, ZHU L Y, TIAN X H, et al. Seasonal variation of bacterial community in biological aerated filter for ammonia removal in drinking water treatment[J]. Water Research, 2017, 123: 668-677. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.018.