

陆漾, 沈怡. 改良 AAO 工艺精细化脱氮控制技术在某污水处理厂的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 119-127.

LU Y, SHEN Y. Application of improved AAO process for refined denitrification control technology in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 119-127.

改良 AAO 工艺精细化脱氮控制技术在某污水处理厂的应用

陆漾, 沈怡*

(江苏中法水务股份有限公司, 江苏常熟 215500)

摘要 针对某市政污水处理厂改良 AAO 工艺中存在的进水碳氮比(C/N)低、碳源投加单耗偏高的问题,进行了脱氮环节精细化调控技术研究与应用,形成了碳源投加和内回流比联动控制的生物脱氮调控策略,根据缺氧段氨氮实时调整回流量。同时根据缺氧段硝酸盐氮(NO_3^- -N)浓度智能化控制乙酸钠投加量,从而使硝化液回流携氧造成的碳源损失最小化。该控制技术应用后,可使碳源的吨水单耗由 60 g 降至 20 g(以纯乙酸钠计),日均节约 12 t 碳源(乙酸钠有效质量分数为 20%),每月可节约 46.8 万元的碳源费用,每年碳减排量可达 430 t。在碳达峰、碳中和的背景下,此调控技术对低 C/N 进水的市政污水厂的精细化运行管理具有重要参考意义。

关键词 低碳氮比进水 脱氮 内回流比 外加碳源 碳排放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)12-0119-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.014

Application of Improved AAO Process for Refined Denitrification Control Technology in a WWTP

LU Yang, SHEN Yi*

(Jiangsu Sino French Water Supply Co., Ltd., Changshu 215500, China)

Abstract Taking a municipal wastewater treatment plant(WWTP) using AAO process for example, current operational problems of low carbon nitrogen ratio (C/N) influent and high carbon source dosage denitrification were analyzed respectively. Its refinement operation measures of denitrification were studied respectively and a systematic operational strategy for denitrification was established, which included carbon source dosage and reflux ratio linkage control. The best internal re-flux ratio was adjusted in real time according to the ammonia nitrogen(NO_3^- -N) concentration in anoxic zone. Meanwhile, the external carbon source was dosed flexibly according to the nitrate nitrogen concentration in anoxic zone. Thus, the wasted part of carbon source due to oxygen dissolved in internal reflux could be minimized. After adjustment, per ton of carbon source dosage decreased from 60 g to 20 g, and the carbon source dosage could be saved by 12 ton each day (sodium acetate solution with effective mass fraction of 20%). About 0.468 million yuan per month could be saved. The indirect carbon emission generated from external carbon source was cut down by 430 ton annually. At the background of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, the operational strategy is valuable for the refinement operation of WWTP with similar low C/N influent.

Keywords low C/N influent denitrification internal reflux ratio external carbon source carbon emission

反硝化过程是以有机碳源作为电子供体,利用硝酸盐氮(NO_3^- -N)中的氮进行缺氧呼吸,其中污水

的碳氮比(C/N)对于反硝化效率至关重要。我国许多地区的市政污水处理厂均存在不同程度进水水质波动大、C/N 低、碳源不足的现象^[1]。在水质标准提高及进水碳源偏低的双重背景下,污水厂需要外加碳源实现出水总氮(TN)达标。

目前污水处理厂生化脱氮工艺的控制主要有 2 种方式,一是通过回流控制,即根据设计手册设置内

[收稿日期] 2023-11-23

[作者简介] 陆漾(1987—),男,工程师,研究方向为污水处理, E-mail: luyang@cssf.com.cn。

[通信作者] 沈怡,女,硕士,工程师,研究方向为污水处理, E-mail: shenyi1@cssf.com.cn。

回流比;二是通过碳源投加,即根据总出水或二沉池出水 TN 的检测数据调整碳源投加量。但这 2 种方式均存在缺陷,第一种方式未考虑实际进水水质,若根据设计手册设置固定的内回流比可能存在回流量导致携氧过多而浪费碳源情况^[2-4];第二种方式存在严重的滞后性,生化池前端到出水口存在较长的水力停留时间,当发现出水 TN 超标时,即使在缺氧池投加碳源,也无法在短时间内降低出水 TN 浓度。因此,寻找污水处理厂出水达标与经济效益的平衡点是十分必要的。

研究以我国江南地区某低 C/N 进水的污水处理厂(总处理规模为 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$)为例,对其生化脱氮工艺进行优化调控,考察调控措施对脱氮效率及碳源单耗的影响,并探讨调控措施的经济环境影响,以期同类污水处理厂脱氮效率提升、运行节能降耗提供参考。

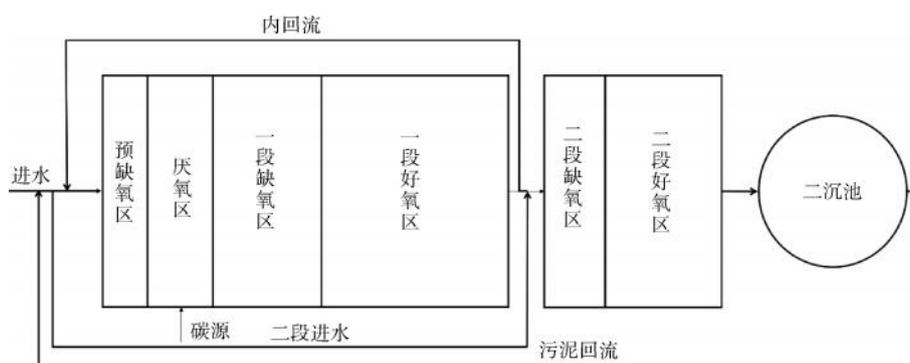


图 1 生化段工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Biochemical Section

表 1 实际进水水质

Tab. 1 Actual Influent Quality

统计值	COD _{Cr} / (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ /COD _{Cr}	BOD ₅ /TN	BOD ₅ /TP
最大值	448	190	10.8	44.8	29.9	0.6	7.2	63.7
最小值	79	32.4	1.5	17.4	8.6	0.3	1.3	5.1
平均值	210	83.1	4.1	31.6	21.3	0.4	2.7	20.6

注: B/C、BOD₅/TN、BOD₅/TP 均采用同一天进水混样的 BOD₅、COD_{Cr}、TN、TP 计算所得。

1.2 调控原理及方法

1.2.1 调控原理

本调控方法是通过生化段的过程数据测算最佳内回流比,调整碳源投加量,既保证出水 TN 达标,同时让硝化液回流造成的碳源损失最小化。

1 试验材料及方法

1.1 污水处理厂概述

案例位于我国江南地区某市,设计规模为 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,主要收集处理生活污水及少量工业废水,采用多点进水多段式的 AAO 工艺。生化段工艺流程如图 1 所示,一期和二期处理规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该污水处理厂的实际进水水质如表 1 所示。进水水质波动较大,污水的(BOD₅/COD_{Cr})约为 0.4, BOD₅/TN 均值为 2.7, BOD₅/TP 均值为 20.6,进水中易降解有机物浓度偏低。进水中的易降解有机物对于反硝化过程至关重要,根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)的建议,一般 BOD₅/总凯氏氮(TKN)大于 4 时满足生物脱氮需求,而该厂进水属于典型的低 C/N 污水,需要额外补充碳源进行生物脱氮。该厂采用的外加碳源为乙酸钠,有效质量分数约为 20%。

如图 2 所示,污水中进水 TN 主要包括氨氮、NO₃⁻-N 及有机氮,以氨氮为主。污水进入缺氧段后,与回流液混合进行反硝化,大部分 NO₃⁻-N 被转化为氮气去除,因此缺氧出水的 TN 主要包括氨氮及少量有机氮和 NO₃⁻-N。污水进入好氧段后,氨氮转化为 NO₃⁻-N。根据氮元素守恒,缺氧出水的氨

氮+NO₃⁻-N+溶解性有机氮=同步硝化反硝化脱氮量+好氧出水 TN(内控值)。由于好氧出水 TN 以 NO₃⁻-N 为主,而在缺氧反硝化效果正常时,该部分 NO₃⁻-N 主要由缺氧出水氨氮转化而来。因此,在本控制策略中,缺氧区氨氮和 NO₃⁻-N 为关键控制参数。调控时,需要通过检测缺氧区进水与内回流液混合后的氨氮数值来精确调整硝化液回流量,这样的调控方

式一方面确保氨氮数值处于设定值范围内,另一方面使缺氧区的 NO₃⁻-N 可满足系统的脱氮要求。此外,大多数市政污水处理厂未安装内回流量计,检测缺氧区氨氮数值可更为直观地控制内回流量。在正常工况下,缺氧区出水 NO₃⁻-N 质量浓度应控制在 2 mg/L 以内,缺氧区氨氮与厂区的出水 TN 直接相关。因此氨氮与 NO₃⁻-N 数值可结合厂区实际进行设置。

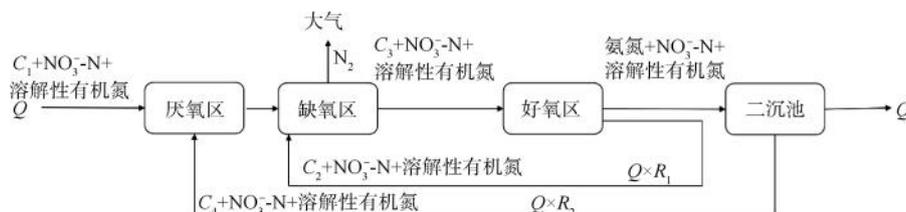


图2 氮的迁移路径

Fig. 2 Migration Path of Nitrogen in Wastewater

由式(1)得式(2),其中 C₁ 为变化值,由来水水质决定。当生化系统运行良好 C₂、C₄ 远小于 C₁,可忽略不计。C₃ 为控制值,则内回流比根据 C₁ 和 C₃ 的变化进行调整。由式(2)可知,当 C₁ 升高时,内回流比应适当调高从而控制好氧出水的 NO₃⁻-N。由于存在少量的 NO₂⁻-N 及有机氮的影响,因此还需要根据不同的水质特性设置不同的安全系数。

$$QC_1 + R_1QC_2 + R_2QC_4 = (1 + R_1 + R_2) \frac{C_3Q}{C_3} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{(C_1 - C_3) + R_2(C_4 - C_3)}{C_3 - C_2} \quad (2)$$

- 其中:Q——水量, m³/d;
- R₁——内回流比;
- R₂——外回流比;
- C₁——进水氨氮质量浓度, mg/L;
- C₂——内回流液氨氮质量浓度, mg/L;
- C₃——缺氧区混合后的氨氮质量浓度(控制值), mg/L;
- C₄——外回流液氨氮质量浓度, mg/L。

外加碳源根据缺氧区末端的 NO₃⁻-N 进行投加,可根据式(4)进行校核计算。回流液中的 NO₃⁻-N 的反硝化程度取决于能供给反硝化的碳源量,以缺氧末端的 NO₃⁻-N 数据来校核碳源的投加量虽有一定的滞后性,但也是现阶段最快速的校核手段,相较于根据出水 TN 的变化来调整碳源投加量,反应时间缩短近 8 倍。根据李培等^[5]的研究,如果污水中含

有溶解氧(DO),为使反硝化进行完全,所需碳源有机物(以 BOD₅ 表示)总量可用式(3)计算。

$$C = 2.86C_{(\text{NO}_3^--\text{N})} + 1.71C_{(\text{NO}_2^--\text{N})} + R_1C_{\text{DO}} \quad (3)$$

- 其中:C——反硝化过程有机物需要量(以 BOD₅ 表示), mg/L;
- C_(NO₃⁻-N)——回流液 NO₃⁻-N 质量浓度, mg/L;
- C_(NO₂⁻-N)——回流液 NO₂⁻-N 质量浓度, mg/L;
- C_{DO}——内回流 DO 质量浓度, mg/L。

在实际监测时发现 NO₂⁻-N 质量浓度较低,仅为 0.1 mg/L 左右,可以忽略不计。研究以有效质量分数为 20% 的乙酸钠溶为例,换算得式(4),即每天的碳源(假设为乙酸钠)投加计算如式(4)。

$$W_{\text{carbon}} = \frac{Q(S_{\text{NO, HY}} - S_{\text{NO, CON}})2.86}{0.68w} + \frac{R_1 + R_2 + 1}{0.68w} R_1QC_{\text{DO}} \quad (4)$$

- 其中:W_{carbon}——碳源理论投加量, g;
- S_{NO, HY}——缺氧池末端硝氮质量浓度, mg/L;
- S_{NO, CON}——缺氧池末端硝氮控制限值, mg/L;
- 2.86 ——反硝化 1 kg NO₃⁻-N 消耗 2.86 kg BOD₅, kg BOD₅/(kg NO₃⁻-N);

0.68——乙酸钠 BOD_5 当量, $kg BOD_5/$
(kg 乙酸钠);

w ——乙酸钠溶液质量分数。

1.2.2 调控方法

如图 3 所示。调控系统主要由以下 4 部分组成:自动仪表监测系统、数据处理及控制系统、回流控制系统、碳源投加系统。自动仪表监测部分包括缺氧段、好氧段的氨氮及 NO_3^- -N 监测,缺氧池进水端的流量监测、碳源储罐液位监测。通过在线监测数据给予的反馈,通过数据处理及控制系统的计算和指令,由回流控制系统调节内回流的开度。由碳源投加系统校核缺氧区碳源的投加量是否充足,从而达到系统设置的确氮和氨氮的控制值。回流控制系统和碳源投加系统可实现联动控制减少碳源投加迟滞性所带来的风险,例如当进水碳源充足、缺氧区运行状态良好的情况下,缺氧末端 NO_3^- -N 长期处于控制值范围内,碳源投加系统经过校核将停止投加碳源;当进水水质发生变化或缺氧区反硝化效果降低,缺氧末端 NO_3^- -N 将升高,碳源投加系统将根据 NO_3^- -N 监测值重新计算碳源投加量并开始投加药剂。在此期间内,二级缺氧段可作为保障工艺段,在一级好氧区出水超出内控值时可进一步脱氮。

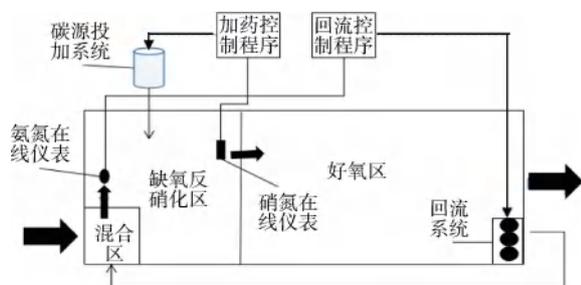


图 3 精细化脱氮技术控制逻辑

Fig. 3 Control Logic of Refined Denitrification Technology

1.3 水质监测分析方法

为了解该污水处理厂 TN 及碳源单耗长期偏高的原因,于该厂一期生化池 2 条线(1#线和 2#线)的缺氧前端、缺氧末端以及好氧末端分别设置 3 个采样点,每隔 12 h 采集点样,将采集的泥水混合物通过定性滤纸过滤后检测氨氮及 NO_3^- -N 的浓度,根据缺氧进出水的 NO_3^- -N 浓度来判定缺氧区的反硝化效果,以好氧出水 NO_3^- -N 浓度作为控制出水 TN 的依据。

2 结果分析与讨论

2.1 反硝化碳源投加过高原因分析

该厂进水 BOD_5/TN 偏低,一直处于外碳源投加状态。由图 4 可知,该段时间内外碳源的吨水单耗(以纯乙酸钠计)一直处于高位,最高可达 117 g,该段时间的平均外碳源单耗为 64 g。

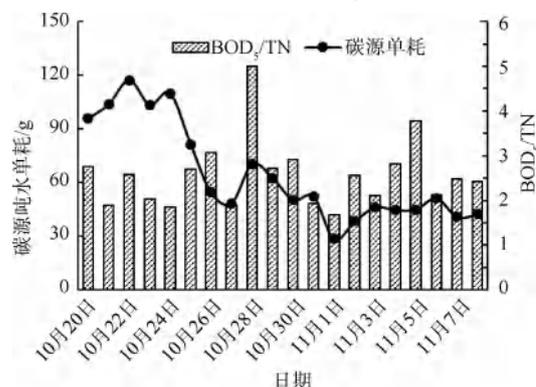


图 4 调试期间碳源单耗及进水 BOD_5/TN 变化

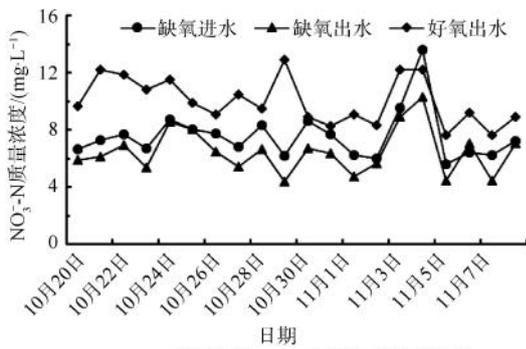
Fig. 4 Unit Consumption of External Carbon Source and Influent BOD_5/TN during the commissioning

如图 5 所示,一期 1#线和 2#线的缺氧段进出水的 NO_3^- -N 基本接近,缺氧段 NO_3^- -N 质量浓度降低为 0.5~1.5 mg/L ,由于反硝化效果不佳,整个生化段的脱氮量较少。缺氧出水 NO_3^- -N 质量浓度均高于 4 mg/L ,导致好氧出水 TN 偏高。通过对缺氧反硝化区氧化还原电位(ORP)进行监测,其平均值为 61 mV,大多数时段的 ORP 为正值,故判定其缺氧反硝化区的主要问题为内回流比过大导致回流液携带的 DO 破坏缺氧区的缺氧状态,从而造成碳源的浪费和反硝化效率的下降。此外,该系统内回流比和外回流比分别为 200%和 100%,缺氧区实际停留时间为 1.1 h 左右,过大的回流量减少了缺氧区实际停留时间,反硝化反应时间被压缩,反硝化的碳源利用率较低^[6]。

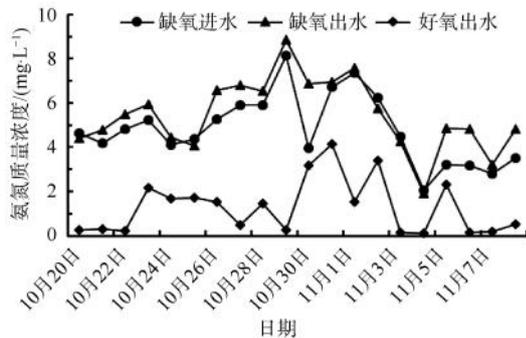
该污水处理厂分期建设,一期工程完成调试后于 2021 年 6 月起投入运行,分为 1#线和 2#线。运行期间控制内回流比为 200%,外回流比为 100%。自 6 月投运开始,厂区碳源单耗持续偏高,月均单耗最高可达 63 g(以纯乙酸钠计),每月碳源费用约为 70 万元。此外,进入冬季后气温降低导致污泥活性有所降低,出水 TN 易受低温影响^[7],达标难度升高,存在超标风险。

2.2 调控前后碳源用量及损耗对比

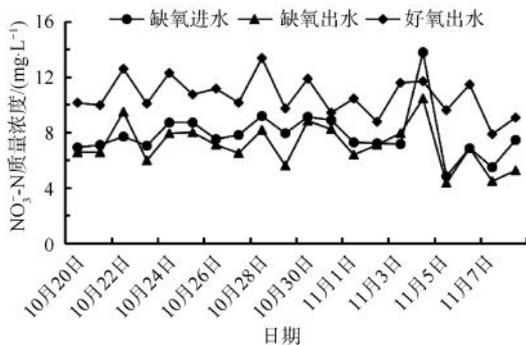
自 11 月初开始进行了为期半个月的工艺调整,



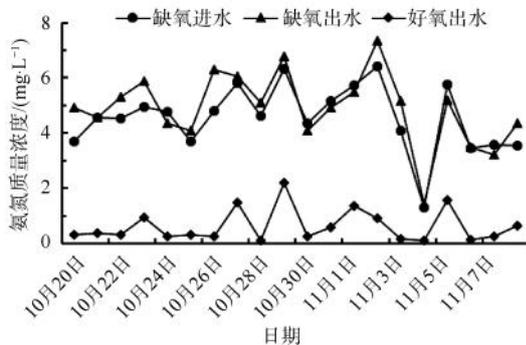
(a) 1#线生化段NO₃-N质量浓度变化趋势



(b) 1#线生化段氨氮质量浓度变化趋势



(c) 2#线生化段NO₃-N质量浓度变化趋势



(d) 2#线生化段氨氮质量浓度变化趋势

图5 生化段中氮的转化及去除

Fig. 5 Nitrogen Transformation and Removal in Biochemical Section

通过采用内回流与碳源投加联动控制,根据缺氧前

端、缺氧末端及好氧末端的氨氮和 NO₃-N 数据,将污水处理厂的內回流比由 200%调整至 100%,此外将好氧区末端溶解氧控制值由 3.0 mg/L 降至 1.5 mg/L 左右。调整前后的碳源单耗变化如图 6 所示,其中调整期为 11 月 1 日—11 月 14 日,调控后的碳源单耗逐月递减,由 60 g 降至 20 g(以纯乙酸钠计),降幅可达 66.7%,使该污水处理厂的碳源用量日均节约 12 t。由图 7 可知,进出水 TN 浓度在 7 月—12 月较为平稳,且 11 月、12 月的进水 TN 浓度及去除率略有升高,进水 BOD₅ 浓度也较为平稳,略有降低。因此,可排除进水 TN 及 BOD₅ 浓度变化带来的影响,经系统联动控制后碳源单耗降低效果明显。

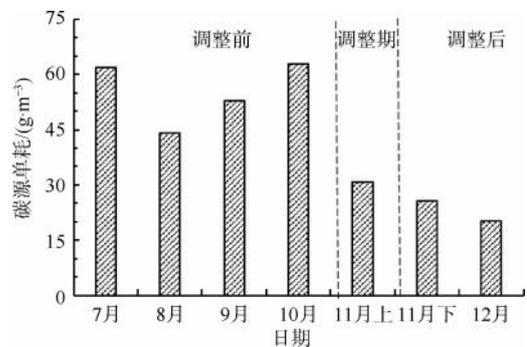


图6 外加碳源单耗变化

Fig. 6 Unit Consumption of External Carbon Source

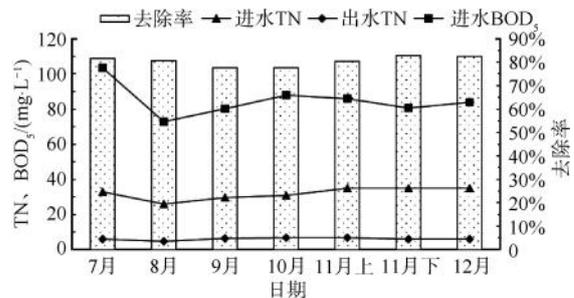


图7 进出水 TN、进水 BOD₅ 浓度及去除率的变化趋势

Fig. 7 Change trend of Concentration and Removal Rate of TN in Influent and Effluent and BOD₅ in Influent

反硝化过程作为决定氮削减量的重要环节,将內回流中的 NO₃-N 在缺氧段进行脱除,但由于內回流硝化液中携带大量 DO,若回流量过大会使大量 DO 带入缺氧区,破坏缺氧状态,加入的碳源将优先被水中的溶解氧消耗,造成碳源用量增加。如表 2 所示,调控后由內回流造成的碳源损失降低了 75%。一般污水处理厂的设计內回流比为 100%~

300%, 由于内回流比决定了脱氮效率, 大多数污水厂都会通过提升内回流比来降低出水 TN, 文献中的内回流比大多设置为 200%~300%^[6,8]。但实际运行中进水水质浓度和特性与设计值往往存在差异, 内回流比仍需根据污水厂实际运行工况进行调整, 文献^[7]表明内回流携氧可造成 TN 去除量减少, 当缺氧区停留时间为 1 h, 携氧的内回流比分别为 100% 和 300%, 与相同内回流比的未充氧内回流发生的反硝化反应相比, 被去除的 TN 分别减少了 1.84 mg/L 和 5.84 mg/L。另有文献^[2]表明, 当内回流比从 400% 降至 200% 后, 缺氧出水 NO₃-N 质量浓度由 5 mg/L 降至 2 mg/L。

表 2 工艺调控前后碳源损耗对比

Tab. 2 Comparison of Loss of External Carbon Sources after Process Adjustments

项目	调控前	调控后
末端 DO/(mg·L ⁻¹)	3	1.5
BOD ₅ 的耗氧量/ [mg O ₂ ·(mg BOD ₅) ⁻¹]	1	1
水量/(m ³ ·d ⁻¹)	60 000	60 000
内回流比	200%	100%
碳源损失/(kg·d ⁻¹)	529.4	132.3

注: 碳源损失为纯乙酸钠的损失量。

2.3 调控前后的碳源利用率对比

该污水处理厂生化段各工艺构筑物的停留时间如表 3 所示。设计停留时间总计为 26.04 h, 其中, 反硝化脱氮主要发生在一段缺氧池, 考虑内外回流量后缺氧池的实际停留时间为 1.48 h。缺氧区中存在的异养菌会与反硝化菌抢夺碳源并消耗氧气, 压缩了反硝化的反应时间^[9]。调控后的内回流量减

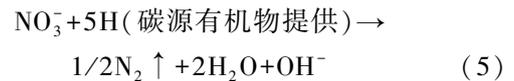
表 3 各工艺段停留时间

Tab. 3 Hydraulic Retention Time of Different Processes

生化池 构筑物	名义停 留时 间/h	实际停留时间/h	
		(内回流比为 200%, 外回流比为 100%)	(内回流比为 100%, 外回流比为 100%)
预缺氧池	0.8	0.2	0.3
一段厌氧池	2.0	0.5	0.6
一段缺氧池	4.4	1.1	1.5
一段好氧池	9.9	2.5	3.3
二段缺氧池	3.9	1.0	1.3
二段好氧池	5.1	1.3	1.7

少了 50%, 缺氧段的停留时间增加了 22 min, 为反硝化反应提供了更多时间, 有利于更多的原水 BOD₅ 被利用到反硝化脱氮反应中。

由于反硝化菌是一类兼性菌, 既能以 O₂ 为电子受体进行好氧呼吸, 又能以 NO₃-N 为电子受体进行反硝化脱氮, 当有 O₂ 存在时, 反硝化菌更易利用 O₂ 进行好氧呼吸消耗易生物降解有机物。于是, 当有 DO 存在时, 1 mg O₂ 消耗 1 mg BOD₅ 致使系统中 0.35 mg NO₃-N 少去除^[7]。本文采用 ΔBOD₅/ΔTN 为对整个生化系统脱氮效果的综合评判, ΔBOD₅ 包括外加碳源以及进水中被消耗的碳源, ΔTN 为进出水 TN 之差, 代表系统中脱除的氮元素。BOD₅ 一部分用于反硝化及氮的同化, 一部分用于缺氧区的消氧, 一部分在好氧区被氧化去除。当反硝化效果好, 碳源利用率高, 代表大部分 BOD₅ 用于反硝化脱氮, 则脱除的氮越多, 如式(5)。



在市政污水厂中, 不管是外加碳源还是原水碳源, 主要为了使其尽可能用于缺氧区的反硝化脱氮。若 ΔBOD₅/ΔTN 降低, 则表明每去除一个单位氮需要消耗的 BOD₅ 更少, 可间接反映碳源的利用效率升高。根据电子供受体理论计算, 当 1 mg NO₃-N 完全反硝化时需要 2.86 mg BOD₅。因此, 当 ΔBOD₅/ΔTN 越接近 2.86, 则代表溶解氧的影响越小, 碳源的利用效率越高。根据消耗的 BOD₅ 与去除的 TN 进行计算, ΔBOD₅/ΔNO₃-N 变化趋势如图 8 所示。调整期间, ΔBOD₅/ΔTN 从 5.4 降至 3.8, 降幅为 30%。调整后的碳源利用效率在 3.5 左右, 最低可达 3.3, 缺氧区的脱氮效率处于较高

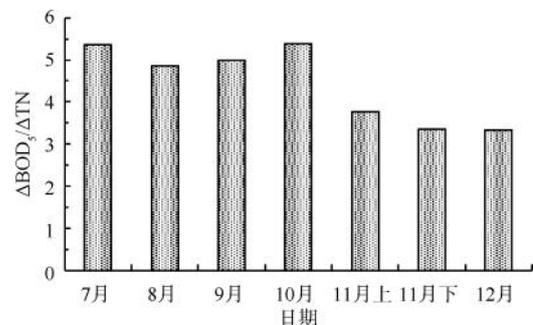


图 8 碳源利用效率

Fig. 8 Utilization Efficiency of Carbon Sources

的水平。

2.4 脱氮调控系统的运用及环境经济分析

2.4.1 常态化脱氮调控系统的运用

对于采用 AAO 工艺的污水厂,好氧池末端 TN 等于缺氧池前端氨氮、缺氧池末端硝氮以及有机氮、NO₂-N 之和。由于市政污水厂的进水中有机氮和 NO₂-N 含量较少,在控制时可设为经验系数 M 。根据上述逻辑关系,文章提出一种出水 TN 的实时控制方法,即在该污水处理厂缺氧区前端设置氨氮在线仪表,检测缺氧区进水中的氨氮含量;在缺氧段末端设置硝氮在线仪表检测缺氧出水的硝氮含量,这 2 个数值与经验系数之和可近似等于好氧出水总氮含量。其中,硝氮含量作为碳源加药控制系统的自变量,由碳源加药控制系统根据硝氮数据计算碳源投加量而将缺氧末端硝氮浓度控制在一个相对固定的数值。缺氧进水氨氮受进水水质的影响而相对波动,作为回流系统调控的唯一自变量,可根据氨氮在线仪数值调整内回流比,通过这 2 个系统的联合调控,将污水厂出水总氮数值控制在设定的内控值范围内。

此案例中,该污水处理厂通过碳源投加系统将缺氧区末端硝氮数值控制在 2 mg/L 以内;经验系数根据污水处理厂的来水水质中的有机氮及 NO₂-N 浓度进行设置,根据该污水厂一段时间的过程数据得到一系列 M 值,考虑经济性及安全性, M 取平均值,设置为 1.5;假设污水处理厂 TN 内控指标为 8 mg/L,则通过回流控制系统将缺氧区氨氮质量浓度控制在 4.5 mg/L 以内。通过此调控系统,可对该污水厂进行常态化控制,使其生化脱氮效率处于最优状态。

此系统所述控制逻辑可实现脱氮过程的精准控制,通过实时数据分析预测进水水质变化,自动调整内回流比和碳源投加量。目前,智能化控制系统在污水厂加药方面的应用研究较为成熟^[10-12],未来该系统可采用算法实现设备的远程监控和预警,从而提高污水处理的效率和可靠性。通过在线仪表监测实时控制脱氮过程,提高了碳源的利用效率,这种精细化的控制手段对于提升污水处理效率和降低运行成本具有重要意义。

2.4.2 系统优化调控后的环境及经济效益分析

由于污水处理厂的出水指标日趋严格,全国 52.2% 的城镇污水处理厂进水 C/N 小于 4^[13],都属于低碳源污水,污水处理厂需要补充外加碳源为反硝化过程提供充足的有机物,从而实现出水 TN 的

达标。目前,污水厂采用的碳源包括传统碳源如甲醇、乙醇、乙酸钠、糖类^[14],以及可供替代型碳源如复合碳源、有机废物水解液^[15]等,其中乙酸钠的反硝化速率最高^[16],且运输方便,仍为大多数污水厂所使用。对于低碳源进水的污水处理厂,由于碳源投加量较大,碳源药剂的费用成为污水厂运维管理成本的重要组成部分^[17-18],因此碳源药剂的节约对污水厂运行成本有重要意义。由表 4 可知,此案例中的污水处理厂自 11 月开始进行精细化管理后,碳源成本占总运行成本的比例降幅显著,由 45.3% 降低至 13.5%,碳源吨水成本从最高 0.38 元污水降至 0.12 元污水,降幅达 68.4%,每月可节约 46.8 万元的碳源费用,提升污水处理厂运营管理的经济性。

表 4 9 月—12 月碳源成本变化趋势

Tab. 4 Variation Trend of Carbon Sources Cost from Sep. to Dec.

项目	9 月	10 月	11 月	12 月
成本占比	36.0%	45.3%	22.2%	13.5%
碳源吨水成本/元	0.32	0.38	0.17	0.12

另外,碳源也是污水厂碳排放的重要组成部分。当前我国市政污水处理厂的碳排放量占社会总排放量的 1%~2%^[19],成为碳减排升级改造的重要领域。污水处理厂碳排放分为直接碳排放和间接碳排放。外加碳源在反硝化过程中作为电子供体,转化为 HCO₃⁻,在好氧环境下被转化为 CO₂ 排入大气,作为污水厂的直接碳排放源之一,对污水厂的碳排放量有重要影响^[20]。

外碳源的碳排放量计算^[21]如式(6)。

$$E_{\text{CO}_2\text{外碳源}} = N\eta BE \quad (6)$$

其中: $E_{\text{CO}_2\text{外碳源}}$ ——每月外加碳源转化的 CO₂ 排放量,t CO₂;

N ——每月外加碳源投加量,t;

η ——外加碳源的有效成分质量分数,此案例中取 20%;

B ——碳源的氧当量,取 0.68 kg BOD₅/(kg 乙酸钠);

E ——外加碳源(以氧当量计)的 CO₂ 理论转化率,0.675 kg CO₂/(kg BOD₅)。

根据式(6)计算得该污水厂 7 月—12 月外加碳源所带来的直接碳排放量,由图 9 可知,碳排放量自

精细化调控措施后逐月下降,月度碳排放量的降幅可达 55.5%,吨水碳排放量由 28.9 g CO₂ 降至 9.3 g CO₂,每年碳减排量可达 430 t,环境效益显著。

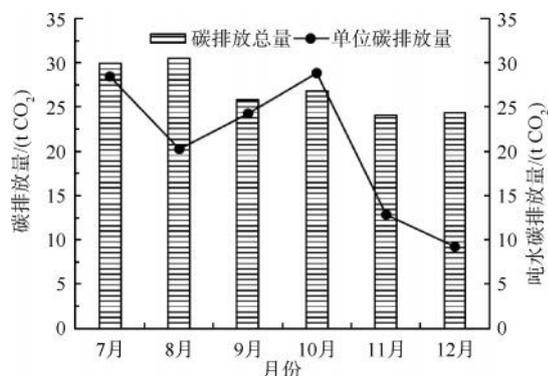


图9 碳排放环境效益

Fig. 9 Environmental Benefits of Carbon Emission

综上所述,此研究通过智能化调控内回流比和碳源投加量,大幅降低了污水处理的碳源消耗和成本,为污水处理厂的运营成本节约提供了有效途径。此外,本研究采用的智能化调控不仅降低了化学药剂的使用,还显著减少了碳排放,对于污水处理厂在应对气候变化和减少碳足迹方面具有示范意义。

3 结论

(1)根据污水厂实际的进水水质与排放要求来合理的调整内回流比例,使内回流造成的碳源损失降到最低,污水处理过程中所需的额外碳源投加量大幅减少,这有助于降低运行成本并提高碳源的经济效益。本案例通过采用内回流与碳源投加联动控制,将内回流比调至 100%,内回流造成的碳源损失降低了 75%,碳源的吨水单耗由 60 g 降至 20 g(以纯乙酸钠计),日均节约 12 t 碳源(有效质量分数为 20%)。

(2)调控后缺氧段的停留时间增加,为反硝化反应提供了更多时间,有利于碳源与 NO₃⁻-N 在反硝化菌的作用下进行充分反应。 $\Delta\text{BOD}_5/\Delta\text{TN}$ 从 5.4 降至 3.8,降幅为 30%,碳源利用效率显著提高,碳源与 NO₃⁻-N 的反应更加充分,碳源的利用效率得到了显著提升,这对于降低工艺对外部碳源的依赖具有重要作用。

(3)通过在缺氧段前端和末端分别设置氨氮和硝氮在线仪表对污水处理厂的出水 TN 进行工艺控制,根据氨氮在线数值调整内回流比,将污水厂出水 TN 数值控制在设定的内控值范围内,不仅确保

了污水处理厂的出水水质,也表明了该工艺在实时监控和自动调节方面的高效性。

(4)调控后污水厂运行的经济和环境效益都明显提升。外加碳源成本占总运行成本的比例降幅显著,由 45.3% 降低至 13.5%,碳源吨水成本降至 0.12 元污水,降幅达 68.4%,每月可节约 46.8 万元的碳源费用,对降低污水处理厂的运营成本具有显著贡献。月度碳排放量的降幅可达 55.5%,吨水碳排放量由 28.9 g CO₂ 降至 9.3 g CO₂,每年碳减排量可达 430 t,减轻了污水处理过程对环境的压力。

参考文献

- [1] 侯红娟,王洪洋,周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水, 2005, 21(12): 19-23.
HOU H J, WANG H Y, ZHOU Q. Effect of influent COD concentration and C/N ratio on denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(12): 19-23.
- [2] 赵俊娜. 低负荷运行时内回流比对 A²O 工艺脱氮的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 81-83.
ZHAO J N. Effect of internal reflux ratio on nitrogen removal in A²O process under low load operation [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5): 81-83.
- [3] 冯红利,赵梦月,丁舒喆. 城市污水厂 A²/O 工艺生物脱氮过程优化控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 102-106.
FENG H L, ZHAO M Y, DING S Z. Optimal control of biological nitrogen removal in A²/O process of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 102-106.
- [4] 温沁雪,唐致文,陈志强,等. A²O 工艺好氧末端溶解氧变化对脱氮除磷影响[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 1041-1046.
WEN Q X, TANG Z W, CHEN Z Q, et al. Effects of dissolved oxygen concentration at the end of aerobic stage in A²O on nitrogen and phosphorus removal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(5): 1041-1046.
- [5] 李培,潘杨. A²/O 工艺内回流中溶解氧对反硝化的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1): 103-106.
LI P, PAN Y. Influence of DO in Internal reflux of A²/O process on de-nitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(1): 103-106.
- [6] 滕荣国,庄新民. 城市污水厂减少外碳源投加量的研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 65-68.
TENG R G, ZHUANG X M. Study on reduction of carbon source dosage for sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 65-68.
- [7] 李家驹. A²/O 工艺城镇污水处理厂脱氮除磷优化研究[D]. 天津:天津理工大学, 2016.
LI J J. The study on optimization of biological nitrogen and

- phosphorus removal in urban A²/O wastewater treatment plant [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2016.
- [8] 王逸飞. 基于污水处理厂总氮提标的工艺运行优化及碳源投加技术 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- WANG Y F. Operation management optimization technologies and carbon source dosing technology based on total nitrogen improvement in wastewater treatment plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [9] 张景炳, 齐鲁, 汪俊妍, 等. 污水厂活性污泥耗氧速率的定量分析[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 20-25.
- ZHANG J B, QI L, WANG J Y, et al. Quantitative analysis on oxygen uptake rate of activated sludge in wastewater treatment plant[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 20-25.
- [10] 贾丽杰, 李文静, 乔俊飞. 基于神经元特性的径向基函数神经网络自组织设计方法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2618-2626.
- JIA L J, LI W J, QIAO J F. Self-organizing design of radial basis function neural network based on neuron characteristics [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2618-2626.
- [11] 林佳敏, 陈金良, 林晶晶, 等. BP神经网络和ARIMA模型对污水处理厂出水总氮浓度的模拟预测[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 573-578.
- LIN J M, CHEN J L, LIN J J et al. The simulation and prediction of TN in wastewater treatment effluent using BP neural network and ARIMA model [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 573-578.
- [12] 朱仁官. 智能控制在污水处理中的有效运用[J]. 科学技术创新, 2019(22): 183-184.
- ZHU R G. Valid application of intelligent control in wastewater treatment [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(22): 183-184.
- [13] 赵浩. 低C/N城镇污水处理厂改良A²/O工艺运行优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- ZHAO H. Study on modified A²/O process of low C/N wastewater treatment plant optimization [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [14] 刘宇航, 司亚楠. 生物脱氮外加碳源发展趋势研究[J]. 广东化工, 2015, 42(10): 113-114.
- LIU Y H, SI Y N. Study on directions of external carbon source for biological denitrification[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(10): 113-114.
- [15] 丁飞, 张红春, 郭洁, 等. 餐厨垃圾与剩余污泥协同发酵提升低C/N污水脱氮效能的中试研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3681-3688.
- DING F, ZHANG H C, GUO J, et al. Pilot study on co-digestion of food waste and waste activated sludge to improve nitrogen removal efficiency of low C/N sewage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3681-3688.
- [16] 朱启荣, 操家顺, 张腾, 等. 污水厂反硝化传统及可供替代碳源研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1600-1606.
- ZHU Q R, CAO J S, ZHANG T, et al. Research progress of traditional and alternative carbon sources for denitrification in wastewater treatment plants [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1600-1606.
- [17] 杨敏, 郭兴芳, 孙永利, 等. 某Bardenpho工艺污水处理厂精细化运行措施研究[J]. 给水排水, 2020, 46(s1): 177-182.
- YANG M, GUO X F, SUN Y L, et al. Study on refinement operation measures of a WWTP with Bardenpho process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(s1): 177-182.
- [18] 陈明飞, 郑凯凯, 王燕, 等. 基于全流程分析的污水厂高硝态氮进水优化运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 118-128.
- CHEN M F, ZHENG K K, WANG Y, et al. Optimized operation of a wastewater treatment plant with high nitrate nitrogen concentration influent based on whole process analysis method [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 118-128.
- [19] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 57(3): 1-5.
- DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.
- [20] 周曼. 某污水处理厂碳排放核算研究[J]. 广东化工, 2022, 49(5): 132-134.
- ZHOU M. Study on carbon emission accounting of a sewage treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(5): 132-134.
- [21] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 65-74.
- ZHANG Y, GE T G, SUN Y L et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74.