

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.015

总氮前置调控方法在污水处理厂的应用

李 溯¹, 张永梅², 邬 浩², 蒋元奎¹, 李 洪¹, 费 扬²,
韩 芳¹, 彭可佳¹, 黄信宇¹, 尤丁一¹, 胡林安², 陶 正³

(1. 泗洪水务有限责任公司, 江苏 宿迁 223900; 2. 江苏水务投资有限公司, 江苏 南京 210000; 3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 总氮的稳定达标是很多污水处理厂出水水质控制的难点。目前主要根据人工经验对系统工艺参数进行调控来实现,如控制溶解氧、投加碳源等,但是这些方法比较粗放且反应滞后,已不能适应精细化管理的要求。通过对总氮及硝态氮、氨氮在各工段的数据关系进行分析,发现将缺氧区末端混合液的溶解性硝态氮、氨氮控制在一定范围内(硝态氮与氨氮之和 $<10\text{ mg/L}$),出水总氮可以稳定达标($<10\text{ mg/L}$),据此实现了出水总氮的前置调控。

关键词: 污水处理厂; 精细化管理; 缺氧区; 硝态氮; 氨氮; 总氮; 内回流; 前置调控

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)20-0089-06

Application of Total Nitrogen Pre-regulation Method in a WWTP

LI Su¹, ZHANG Yong-mei², WU Hao², JIANG Yuan-kui¹, LI Hong¹, FEI Yang²,
HAN Fang¹, PENG Ke-jia¹, HUANG Xin-yu¹, YOU Ding-yi¹, HU Lin-an²,
TAO Zheng³

(1. Sihong Water Co. Ltd., Suqian 223900, China; 2. Jiangsu Water Investment Co. Ltd., Nanjing 210000, China; 3. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The stable and up-to-standard discharge of total nitrogen is a challenge for effluent quality control in many wastewater treatment plants (WWTPs). Currently, it is mainly achieved through the regulation of system process parameters based on the experience of management personnel, e. g., controlling dissolved oxygen and adding carbon sources. However, these methods are relatively inaccurate and have delayed reactions, which no longer meet the requirements of refined management in WWTPs. By analyzing the data relationship between total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonia nitrogen contents in each treatment section, it is found that controlling the dissolved nitrate nitrogen and ammonia nitrogen contents in the mixed liquor at the end of the anoxic zone within a certain range (the sum of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen contents less than 10 mg/L), then the total effluent nitrogen content can be stably discharged up to standard (less than 10 mg/L), i.e. achieving pre-regulation of total effluent nitrogen.

Key words: wastewater treatment plant; fine management; anoxic zone; nitrate nitrogen; ammonia nitrogen; total nitrogen; internal reflux; pre-regulation

通信作者: 李溯 E-mail: 691201803@qq.com

污水处理厂生物脱氮一般分为氨化、硝化和反硝化几个阶段,其中难点是反硝化段的工艺控制。对反硝化阶段影响较大的因素有溶解氧、碳源、回流比、温度等。目前,常用的总氮控制方法往往依据经验,指导生产也过于粗糙,并不能较精确地控制总氮指标且往往造成工艺调控比较滞后^[1],无法确保出水水质的稳定,也会造成资源和成本的浪费。

笔者通过分析污水中总氮的组成和转化过程,统计整理缺氧池末端硝态氮、氨氮与好氧池出水溶解性总氮之间的数据关系,找出其中的规律,对缺氧池末端硝态氮和氨氮进行前端控制,进而控制出水总氮,减少碳源投加和能耗。

1 项目背景

江苏某污水处理厂总处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两期实施,其中一期采用三级AO工艺,二期采用改良型AAO工艺,规模均为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水水质	500	200	200	30	40	3.0
出水标准	50	10	10	5(8)	15	0.50

一、二期工艺流程见图1。

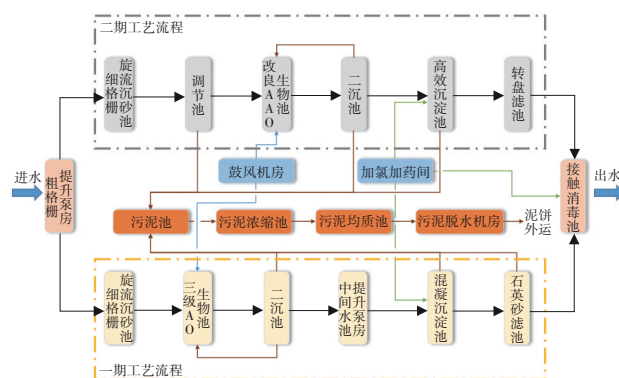


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process of the WWTP

其中一期碳源投加点设在一期内回流即第二个缺氧区进口处(以下简称A2,依次类推),另外A3也设有碳源投加点可供选择;二期碳源投加点设在缺氧区进口内回流处。

2 研究方法

每天在一、二期工程的缺氧、好氧区出口采样(混合液),水样经沉淀过滤后送至化验室根据国标法测定各点的硝态氮和氨氮(缺氧区/好氧区出口混合液的溶解性氨氮、硝态氮指标,以下简称缺氧区/好氧区氨氮、硝态氮)。进、出水水质来自在线监测仪表的日平均数据。拟通过对大量数据进行统计,观察缺氧区氨氮、硝态氮和好氧池出水溶解性总氮的关系,得出指标较低的出水溶解性总氮对应的缺氧区硝氮、氨氮控制区间,并探讨实现此目的的方法。

从理论分析,回流比越大,脱氮效率越高,脱氮效率公式如下:

$$\eta = \frac{r + R}{1 + r + R} \quad (1)$$

式中: η 为理论脱氮效率; R 为外回流比; r 为内回流比。

但是回流比过大会导致缺氧区溶解氧环境被破坏,实际脱氮效率反而受到影响。而缺氧区末端硝态氮正好可以指示回流液的脱氮情况:如果缺氧区末端硝态氮过高,说明碳源不足或回流过大;如果硝态氮过低,说明碳源过量或回流不足。因此缺氧区末端硝态氮对系统整个脱氮过程具有良好的指示作用。

在厌氧缺氧区反硝化反应完全、缺氧区末端硝态氮接近零的情况下,缺氧区末端氨氮和好氧区出口的溶解性总氮非常接近(此时进水中少量有机氮经过厌氧/缺氧段的氨化反应后,大部分已经转化为氨氮,可忽略不计),可以起到提前指示出水总氮的作用。

3 结果与分析

3.1 进、出水水质

2022年2月实际进、出水水质见图2。由图2(a)可知,平均进水总氮为 49.5 mg/L ,进水氨氮平均比总氮低 5.5 mg/L ,说明进水总氮主要以氨氮形式存在。进水COD波动较大,平均为 344 mg/L ,BOD₅平均为 138 mg/L ,平均B/C值为0.4,可生化性尚可。BOD₅/TN平均为2.76,而一般情况下,BOD₅/TN需要达到4才能确保反硝化脱氮碳源充足,以该厂实际进水为例,COD/TN需要不低于10才能确保碳源充足^[2]。由此可见,该厂进水碳源不足,需要投加外碳源。

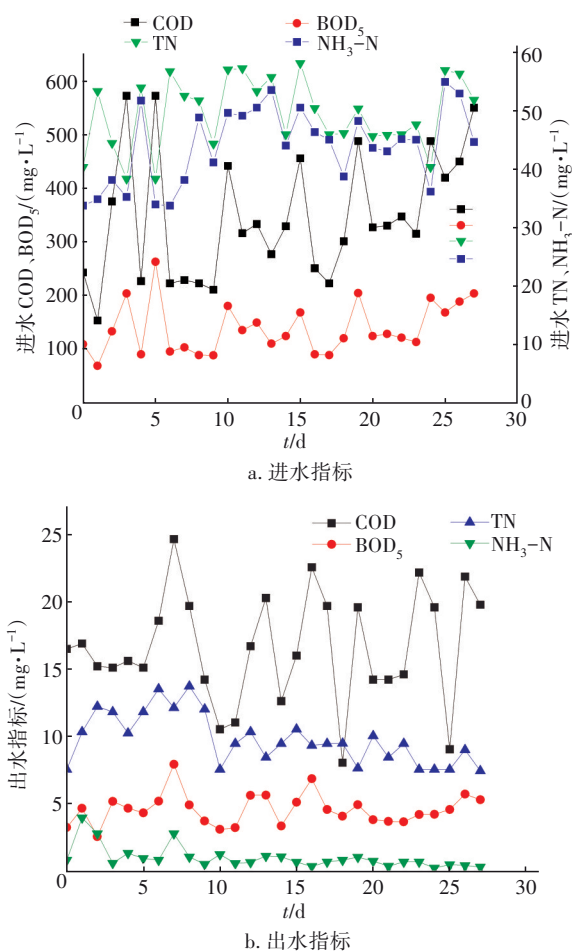


图2 实际进、出水水质

Fig.2 Actual influent and effluent quality

出水水质为每天采集的出水混合水样,经人工检测得出的数据。由图 2(b)可知,出水 COD 和 BOD₅ 可以稳定达到国家一级 A 排放标准,个别天数出水氨氮较高,分析可能是冬季气温较低、硝化反应不完全所致,通过增大曝气、调整水量后出水氨氮可维持在 1 mg/L 以下。出水总氮平均值为 9.75 mg/L,但是前 10 天基本都超过 10 mg/L,个别天数接近一级 A 排放标准(15 mg/L),分析主要是碳源投加泵流量过小、个别时段曝气不足所致。通过更换大流量碳源投加泵并提升溶解氧后,出水总氮基本维持在 10 mg/L 以下。

3.2 各池末端硝态氮、氨氮含量

3.2.1 南 AAO 池缺氧区和好氧区末端

南 AAO 池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量变化见图 3。由图 3 可知,缺氧区氨氮、硝态氮含量平均为 10.06、1.32 mg/L,好氧区氨氮、硝态氮含量平均为 1.46、9.42 mg/L,即缺氧区氨氮与硝态

氮之和接近好氧区氨氮、硝态氮含量之和(经长期检测,好氧池末端氨氮和硝态氮之和接近总氮,说明碳源不足的情况下好氧池同步硝化反硝化作用可以忽略)。而在工艺调控中,若后端水质恶化后再去调控工艺会造成反应滞后,影响生化池的出水水质。因此,在实际工艺控制中可以将缺氧池末端氨氮和硝态氮之和控制在安全范围,更有利于好氧池出水溶解性总氮的控制(如果内控 TN 指标为 10 mg/L,则缺氧区氨氮和硝态氮之和不应超过 10 mg/L)。

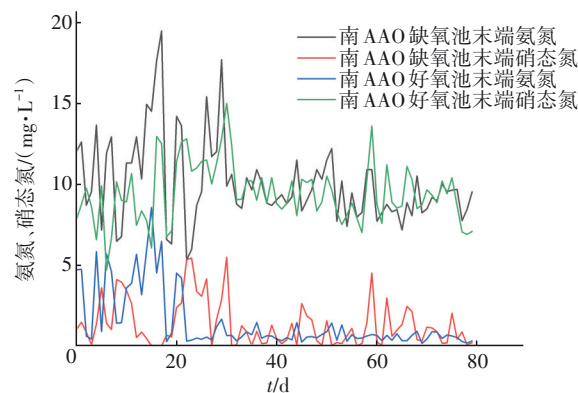


图3 南 AAO 池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量
Fig.3 Ammonia nitrogen and nitrate contents at the end of anoxic and aerobic zone in south AAO process

观察好氧池末端氨氮含量可知,在氨氮较高(如超过 2 mg/L)的情况下,容易造成好氧区氨氮偏高,进而导致总氮偏高甚至超标,因此要控制总氮首先需要确保硝化反应充分。缺氧区末端硝态氮在碳源充足且反应时间充分的情况下,应该接近零。如果缺氧区末端硝态氮偏高,说明碳源不足,此时应减少回流或者增加碳源投加量(为了节能降耗优先减少回流)。整理其中的数据关系可知,缺氧区硝态氮超过 1.5 mg/L 时,好氧区出口溶解性总氮均值超过 11 mg/L;缺氧区硝态氮为 0~1 mg/L 时,好氧区出水溶解性总氮相对更低,其中 0.5~1 mg/L 区间既能确保良好的脱氮效果,又可节省碳源投加量。

综上所述,为了确保好氧池出口溶解性总氮满足 10 mg/L 以下的内控指标,需要将缺氧区末端氨氮与硝态氮之和控制在 10 mg/L 之内,且硝氮控制在 1 mg/L 以下,氨氮控制在 9 mg/L 以下水质更稳定,也可以节能降耗。由于进水中的氨氮在厌氧和缺氧区基本不能被去除,则进水氨氮较高时应该适

当增大回流比,一般来说,增大内回流和外回流均可以稀释氨氮,增大外回流容易造成二沉池沉淀时间缩短、泥层上涨,而增大内回流也可能导致缺氧环境的破坏,所以需要根据实际情况进行调节。

3.2.2 北AAO池缺氧区和好氧区末端

北AAO池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量变化如图4所示。由图4可知,缺氧池末端氨氮、硝态氮平均分别为10.91、0.69 mg/L,好氧池末端氨氮、硝态氮平均分别为2.27、8.33 mg/L。缺氧池末端氨氮与硝态氮之和与好氧池末端氨氮、硝态氮之和也比较接近。

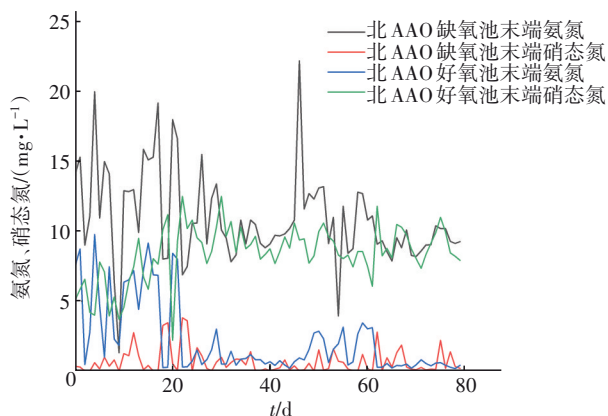


图4 北AAO池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量

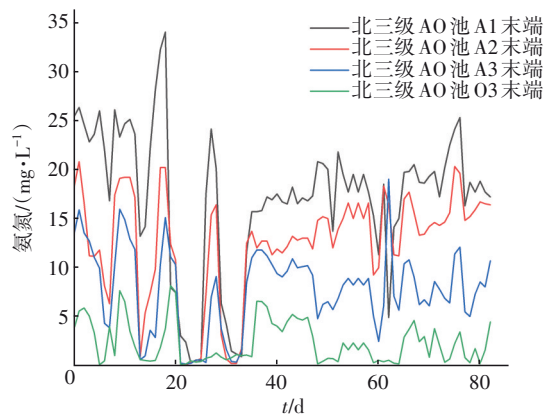
Fig.4 Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen at the end of anoxic and aerobic zone in north AAO process

由北AAO缺氧区出口硝态氮和好氧区出口溶解性总氮关系可知,缺氧区出口硝态氮超过1.5 mg/L时,好氧区出口溶解性总氮超过11 mg/L,缺氧区硝态氮在0~1 mg/L区间时好氧区出口溶解性总氮相对较低。

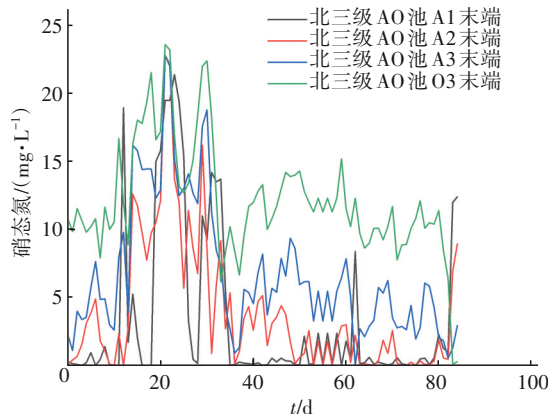
3.2.3 北三级AO池三个缺氧区和好氧区末端

北三级AO池在三个缺氧池均布有进水管和阀门,内回流进入第二道缺氧池进口端,外回流进入第一道缺氧池进口端(后三个缺氧池依次用A1、A2、A3表示,最后一个好氧池用O3表示),其氨氮和硝态氮变化见图5。由图5可知,A1、A2、A3、O3平均氨氮分别为15.54、8.67、5.86、0.82 mg/L,硝态氮分别为0.67、1.94、4.46、9.02 mg/L,其中A3氨氮、硝态氮之和为10.32 mg/L,O3氨氮、硝态氮之和为9.84 mg/L,两者非常接近,说明欲将好氧区末端溶解性总氮控制在10 mg/L以下,同样需要将A3末端氨氮、硝态氮之和控制在10 mg/L以下。而在A3氨

氮超过6 mg/L的情况下,O3末端的氨氮存在升高甚至超标的风险,说明在O3好氧停留时间不足的情况下,需要控制好A3末端的氨氮。



a. 北三级AO池缺氧区和好氧区氨氮



b. 北三级AO池缺氧区和好氧区硝态氮

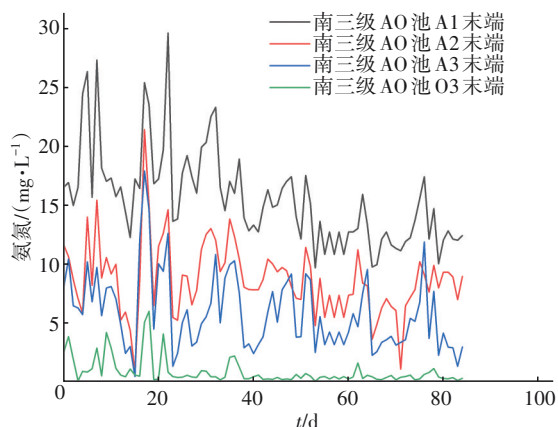
图5 北三级AO池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量
Fig.5 Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen at the end of anoxic and aerobic zone in north tertiary AO process

而A1硝态氮基本都接近零,但实际A1未加碳源,说明外回流的硝态氮完全利用进水作为碳源进行反硝化。A2末端硝态氮也较低,除了利用进水作为碳源,也在A2投加了部分外碳源。当硝态氮接近零则可以减少碳源投加、增加内回流;硝态氮偏高如超过3 mg/L则可以减小内回流或者增大A2碳源投加。

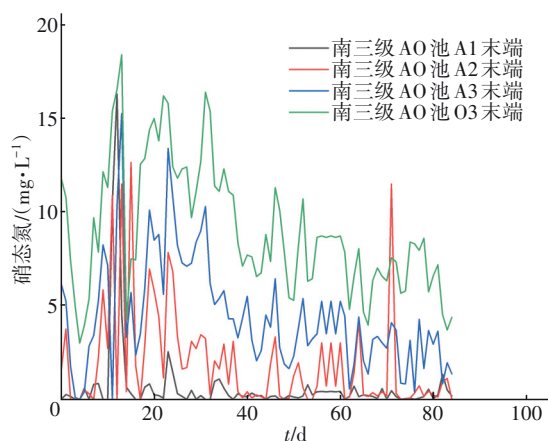
3.2.4 南三级AO池三个缺氧区和好氧区末端

南三级AO池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量变化如图6所示。由图6可知,A1、A2、A3、O3平均氨氮分别为17.12、12.44、7.82、2.38 mg/L,硝态氮分别为3.14、3.81、6.91、12.41 mg/L,其中A3氨氮、硝态氮之和为14.73 mg/L,O3氨氮、硝态氮之和为14.79 mg/L,数据也非常接近。总氮接近15

mg/L,说明工艺还没有调试到最佳状态,与北三级AO池相比,硝化和反硝化效果都偏差。



a. 南三级AO池缺氧区和好氧区末端氨氮



b. 南三级AO池缺氧区和好氧区末端硝态氮

图6 南三级AO池缺氧区和好氧区末端氨氮及硝态氮含量
Fig.6 Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen at the end of anoxic and aerobic zone in south tertiary AO process

经过仔细分析,O3出口氨氮2.38 mg/L偏高,结合A3末端氨氮为7.82 mg/L可知,A3末端氨氮过高会影响好氧出水氨氮指标。由于南池A1、A2、A3氨氮、硝态氮比北三级AO池均差一点,在进水浓度、碳源投加量、污泥浓度、曝气溶解氧、内外回流等过程参数均相差不多的情况下,分析原因可能是进水量分配不均。调整进水阀门及各点进水比例后,南池出水硝态氮和氨氮均有所下降,总氮降到10 mg/L以内。

3.3 其他影响脱氮的因素

从实际运行看,其他一些因素对生物脱氮也有不可忽视的影响,如污泥浓度、水力停留时间等。一般来说,AAO工艺污泥浓度控制在3 000~4 000 mg/L即可满足生物处理的需求^[3],过高容易造成污泥老化解体、二沉池跑泥,过低会导致脱氮效果差。

在冬季和进水浓度较高的情况下可以适当提高污泥浓度。另外,排泥要均匀,避免短时间大量排泥造成硝化菌流失。在实际运行中也发现了短期大量排泥后氨氮和总氮明显升高的现象。

停留时间同样对脱氮有明显的影响。有研究发现,在缺氧条件下乙酸钠、乙酸等小分子易降解碳源反硝化速率很快^[4],原水中的硝态氮在40 min内已有明显下降,3 h以后大部分已经反应完全;而葡萄糖等分子质量较大的碳源的反硝化速率较慢且投加量远大于投加小分子碳源。这说明应急投加碳源应尽量选择反应快的小分子碳源,并尽可能投加在缺氧区的前段以延长反硝化反应时间,方可提高碳源利用率。好氧停留时间同样关系到氨氮的去除率,如果停留时间不足,则需要加大曝气确保氨氮的去除,而增大曝气又会影响到回流混合液的溶解氧。当夏季进水浓度足够低时,进水中的氨氮很容易就被去除,这时可以提升水量超负荷运行,并降低回流比以节能。也有研究表明,停留时间对生物菌群的组成和处理效果也有一定影响^[5],因此将停留时间控制在合适的范围非常重要。

3.4 出水总氮控制策略

通过对上述分析,笔者认为可以通过以下方法对出水总氮进行调控。

① 对于改良型AAO工艺,可将缺氧区末端硝态氮控制在1 mg/L以下,氨氮控制在9 mg/L以下,基本可以确保好氧池出水溶解性总氮在10 mg/L以下。其中,硝态氮可以通过内回流和碳源投加进行控制,氨氮通过调节内外回流比进行控制。

② 对于三级AO工艺,要确保出水总氮稳定在10 mg/L以下,可以将A3池末端氨氮控制在6 mg/L以下,硝态氮控制在4 mg/L以下。硝态氮主要通过调节回流比和碳源控制,氨氮主要靠调节回流比和配水控制。

③ 在硝态氮控制策略中,优先调节回流比,尽量减少碳源投加。

④ 为了提升脱氮效率,可以在冬季适当提升污泥浓度;应急投加应优先选用易降解的小分子碳源如乙酸、乙酸钠等;夏季进水浓度低时可以降低污泥浓度和回流比并提升进水量。

⑤ 可在生物池缺氧区末端安装硝态氮及氨氮检测仪表指导工艺调控^[6]。将缺氧末端的硝态氮和氨氮数据通过自动化程序与回流泵、碳源投加泵

联动,可以大大提高工作效率,稳定出水水质、节省碳源、降低能耗。

试验结束后,笔者采用上述策略指导实际运行1年时间,出水总氮基本稳定控制在10 mg/L以内,即使偶有升高也可以很快恢复;碳源单耗相比往年同期下降了12%,说明该控制策略是成功的。

4 结论

① 通过控制缺氧区末端硝态氮和氨氮来控制好氧池出水溶解性总氮的方法是有效的,既可以提升水质的稳定性,也减少了碳源的浪费和回流泵的开启。

② 不论是AAO工艺还是多级AO工艺,欲将出水总氮控制在10 mg/L以下,需将其缺氧区末端(多级AO工艺指最后一级缺氧区)硝态氮和氨氮之和控制于10 mg/L以下。

③ 可通过调节回流比、投加碳源等方法控制缺氧区硝态氮和氨氮,优先调节回流比。同时应考虑污泥浓度、外加碳源类型对脱氮的影响。

参考文献:

- [1] 孙月娣. Bardenpho工艺内回流与碳源投加耦合控制动态模拟[J]. 中国给水排水, 2017, 33(23): 66-70.
SUN Yuedi. Dynamic simulation of coupled control between internal reflux and carbon source dosing in Bardenpho process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(23): 66-70 (in Chinese).
- [2] 刘伟岩, 李军, 宋玮华, 等. 碳源对缺氧/厌氧/好氧工艺脱氮除磷效果的影响[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 55-57.
LIU Weiyan, LI Jun, SONG Weihua, *et al.* Influence of carbon source on nitrogen and phosphorus removal by anoxic/anaerobic/aerobic process [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 55-57 (in Chinese).
- [3] 住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂运行、维护及安全规程: CJJ 60—2011[S]. 北京: 中国建筑工业

出版社, 2011: 14-15.

Ministry of Housing and Urban Rural Development. Technical Specification for Operation, Maintenance and Safety of Municipal Wastewater Treatment Plant [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 14-15 (in Chinese).

- [4] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125-128.

YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 125-128 (in Chinese).

- [5] 李远威, 郝凯越, 宗永臣, 等. 高原生境不同水力停留时间下A²O工艺活性污泥微生物代谢机制研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1): 20-26.

LI Yuanwei, HAO Kaiyue, ZONG Yongchen, *et al.* Study on microbial metabolic mechanism of A²O process activated sludge with different hydraulic retention time in plateau environment [J]. Environmental Pollution & Prevention, 2022, 44(1): 20-26 (in Chinese).

- [6] 周志明, 路瑞, 叶长兵, 等. PLC在D-A²O组合技术处理橡胶废水中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 75-79.

ZHOU Zhiming, LU Rui, YE Changbing, *et al.* Application of PLC control in treatment of rubber wastewater by D-A²O combination technology [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 75-79 (in Chinese).

作者简介: 李溯(1984—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士, 中级工程师, 总工程师, 主要从事污水处理厂运行管理及课题研究工作。

E-mail: 691201803@qq.com

收稿日期: 2023-07-21

修回日期: 2023-08-14

(编辑: 衣春敏)