

关永年, 刘洪波, 秦松, 等. 污水处理厂总氮提标多模式切换运行[J]. 净水技术, 2022, 41(3):73-78.

GUAN Y N, LIU H B, QIN S, et al. Multi-mode switching operation of upgrading standard for total nitrogen removal in WWTP[J].

Water Purification Technology, 2022, 41(3): 73-78.



扫码试试?

污水处理厂总氮提标多模式切换运行

关永年¹, 刘洪波^{1,2,*}, 秦松², 徐超¹, 陈勇¹

(1. 苏州工业园区清源华衍水务有限公司, 江苏苏州 215021; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要 针对苏州工业园区第二污水处理厂总氮(TN)指标不能稳定达到新标准的问题,设计开发出多模式切换的AAO工艺运行方式。通过多点分配进水、倒置内回流、延长缺氧区水力停留时间(HRT)以及正置、倒置等不同模式切换相结合的方式,根据季节变化对厌氧-缺氧-好氧工艺系统进行调整,优化碳源分配,寻找便于操作的高效脱氮工艺运行模式,提高脱氮效果,从而实现TN含量<10 mg/L的控制目标。试验结果表明,采取部分进水超越初沉池、延长缺氧区HRT、优化碳源分配相结合策略能较好提高工艺的脱氮效果。

关键词 污水处理厂 AAO工艺运行模式 脱氮 碳源 分点进水 提标改造

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)03-0073-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.011

Multi-Mode Switching Operation of Upgrading Standard for Total Nitrogen Removal in WWTP

GUAN Yongnian¹, LIU Hongbo^{1,2,*}, QIN Song², XU Chao¹, CHEN Yong¹

(1. Suzhou Industrial Park Qingyuan Huayan Water Services Co., Ltd., Suzhou 215021, China;

2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract To address the problem that Suzhou Industrial Park's total nitrogen(TN) index for the Second Sewage Treatment is not consistently up to new standard, and multi-mode switching AAO process is adopted. Through the combination of different modes, such as multi-point distribution of influent, inverted internal reflux, extension of hydraulic retention time(HRT) in anoxic section, positive and inverted, the anaerobic anoxic aerobic process system was adjusted according to the seasonal changes. In order to optimize carbon source distribution and achieve the control target of TN concentration < 10 mg/L, a convenient and efficient denitrification process operation mode was found to improve denitrification effect. Experimental results showed that the combination of influent exceeding primary sedimentation tank, prolonging HRT in anoxic section and optimizing carbon source distribution could better improve the nitrogen removal effect of process.

Keywords wastewater treatment plant(WWTP) AAO process operation mode denitrification carbon source multi-point upgrading and reconstruction

江苏省2018年5月18日发布的《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限

值》(DB 32/1072—2018)中COD_{Cr}、氨氮、TP、TN限值与《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准相比均有一定提升^[1-2]。2018年8月,苏州市委发布了《关于高质量推进城乡生活污水治理三年行动计划的实施意见》,其中明确要求自2021年1月1日起,苏州市城镇污水处理厂执行地表“准IV类”水标准,该标准要求污水处理厂出水TN标准含量为10 mg/L^[3]。

[收稿日期] 2021-06-26

[基金项目] 上海市曙光计划(18SG45)

[作者简介] 关永年(1969—),男,主要从事城市供水排水和有机废物处理的技术研究,E-mail:guanyn@heisino.com。

[通信作者] 刘洪波(1979—),男,研究方向为水污染控制,E-mail:Liuhb@usst.edu.cn。

本文以苏州工业园区第二污水处理厂为研究对象,对照从 2015 年以来 5 年运行的出水水质数据, COD_{Cr} 、氨氮、TP 均能稳定达到新标准,但 TN 指标不能稳定达到要求。本试验主要是优化多模式 AAO 的运行方式,针对不同季节,探讨 TN 的高效去除方案,为减少改造投资、优化运行提供科学依据。

1 污水处理厂概况

苏州园区第二污水处理厂设计能力为 15 万

m^3/d ,处理对象包括服务范围内的生活污水和工业废水,其中,生活污水约占总水量的 55%。工业废水经企业自建的预处理设施处理达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)要求后,排入市政管道进入污水处理厂。污水处理厂设计进、出水水质指标如表 1 所示。

查阅该厂历史运行数据,在 2020 年 6 月—2021 年 5 月,平均处理污水量约为 14 万 m^3/d ,运行参数

表 1 设计进水、出水水质指标
Tab. 1 Designed Water Quality Indices of Influent and Effluent

项目	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
进水	450	200	200	35	45	6.5
出水	30	6	10	1.5(3)	10	0.3

注:括号外数值为水温 $>12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控制指标,括号内数值为水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控制指标

具体如下:MLSS 含量为 2.5~3.5 g/L;污泥沉降比(SV_{30})为 28%~40%;污泥泥龄为 25~28 d。平均

进、出水水质指标如表 2 所示。

该污水处理厂采用进水、回流多点进水的 AAO

表 2 平均进水、出水水质指标
Tab. 2 Average Water Quality Indices of Influent and Effluent

项目	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
平均进水	356	150	185	31	42	4.5
平均出水	21	3.5	6	0.7	8.9	0.17

工艺。设计 2 座生物反应池,每座各分 2 组反应池。每组反应池厌氧区有效容积为 2 700 m^3 ,HRT 为 1.73 h;缺氧区有效容积为 8 100 m^3 ,HRT 为 5.18 h;交替区(安装搅拌器和曝气器,可根据需要调整为缺氧区或好氧区)有效容积为 1 620 m^3 ,HRT 为 1.04 h;好氧区有效容积为 17 820 m^3 ,HRT 为 11.4 h。污水处理厂实际进水 COD_{Cr} 、氨氮、TN 和 TP 平均含量分别为 356、31、42 mg/L 和 4.5 mg/L ,平均处理污水量约为 14 万 t/d ,生物反应池污泥含量为 2 500~3 500 mg/L 。该厂运行状况良好, COD_{Cr} 、TN、氨氮和 TP 的年均去除率分别为 95%、78%、98%和 96%。查阅 2020 年苏州地方标准,对应出厂水水质情况,发现仅 TN 指标有少数天数不能稳定达到新标准,其他指标均能够满足新标准的要求。工艺流程如图 1 所示。

工艺设计时对进水、内回流设计了不同的配水渠道调节闸门,通过闸门的调节可以实现进水的多点分配以及正置、倒置 AAO 工艺(图 2)。

2 试验方法

AAO 工艺脱氮效率主要取决于反硝化过程是否充分^[4],而缺氧区碳源不足和水力停留时间(HRT)过短是造成反硝化反应不充分的重要原因^[5]。因此,增加缺氧区进水中有机物浓度和延长 HRT 成为提高污水处理厂脱氮效果的关键思路。本试验通过分点进水、倒置内回流、延长缺氧区 HRT 及不同模式相结合的方式,调整缺氧区的有机物浓度及反硝化反应时间,探究利用现有工艺实现最佳脱氮效果的运行模式以满足污水处理厂新标准的要求。为保证工艺运行试验结果的可比性,试验过程中工艺的主要运行参数控制基本保持一致。具体运行参数:MLSS 含量为 2 500~3 500 mg/L ; SV_{30} 为 25%~40%;内回流比(r)为 220%;外回流比(R)为 50%~70%。经分析发现,该厂出水 TN 的主要成分为 NO_3^- 、 NO_2^- 和氨氮,其中, NO_3^- 占比超过 80%(表 3)。因此,本研究可通过提高反硝化效率来进一步提高 TN 的去除率,从而稳定达标。

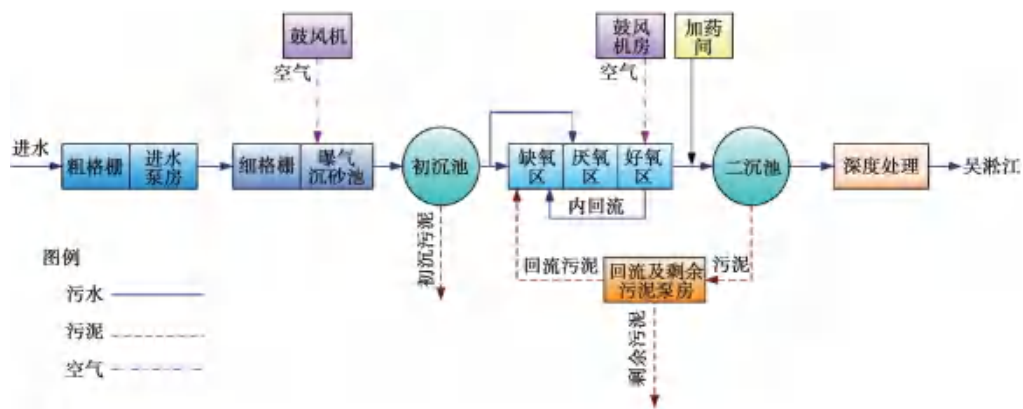
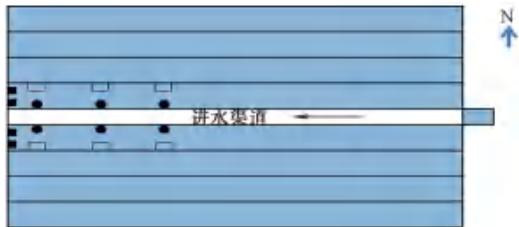


图 1 污水处理厂工艺流程图
Fig. 1 Flow Chart of WWTP Process



注: ●为进水配水闸门, □为内回流配水闸门, ■为外回流配水闸门
图 2 进水及回流闸门位置示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Influent and Internal Return Gate Position

表 3 出水 NO_3^- 在出水 TN 的占比
Tab. 3 Proportion of NO_3^- in Effluent TN

水质指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出水 $\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	11.5	12.9	10.6	10.2	9.9	11.7	10.5	11.1	10.9
出水 $\text{NO}_3^-/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	9.51	10.50	10.40	8.30	8.64	9.76	9.53	9.85	9.92
NO_3^- 占比	82.7%	81.40%	98.1%	81.4%	87.1%	83.4%	90.7%	88.7%	91.0%

注: 1~9 为取样样品编号

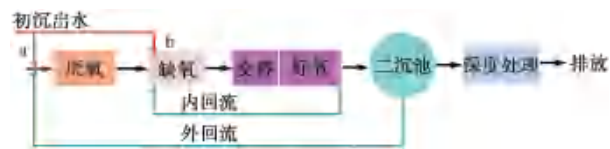


图 3 分点进水正置 AAO 工艺流程图

Fig. 3 Process Flow Chart of AAO with Multi-Point Influent in Upright Position

除率提升至 76% 左右, NO_3^- 平均值较未分点进水时降低 0.6 mg/L , TN、 NO_3^- 变化情况如图 4 所示, 分点进水有利于反硝化反应的进行, 这是由于分点进水增加了缺氧区的有机物浓度, 而反硝化反应是以有

3 结果与讨论

3.1 分点进水正置 AAO 工艺

分点进水正置 AAO 工艺是指将初沉池的出水由原来的 100% 转换成 70% 进入厌氧区, 剩余 30% 进入缺氧区, 其他条件不变, 如图 3 所示。在未进行分点进水时, 出厂水中 TN 平均质量浓度为 9.5 mg/L , 去除率约为 70%, NO_3^- 平均质量浓度为 8.2 mg/L 。同一气候条件(春季)下, 经过 11 d 的分点进水试验后, 出厂水中 TN 平均值降至 7.6 mg/L , 去

机物提供能源将 NO_3^- 还原成 N_2 , 分点进水为反硝化菌提供了碳源, 因此, 提高了反硝化效率^[6]。然而, 试验过程中发现, 对已设计好的污水处理厂进行分点进水较为困难, 且受污水进水量的影响较大^[7]。

3.2 倒置内回流 AAO 工艺

倒置内回流 AAO 工艺有常规倒置内回流 AAO 工艺[图 5(a) 进水]和倒置内回流分点进水 AAO 工艺[图 5(a)、(b) 进水]这 2 种。

3.2.1 常规倒置内回流 AAO 工艺

如图 5(a) 进水所示, 倒置内回流 AAO 工艺是指将缺氧区置于厌氧区之前, 其他条件不变^[6]。同

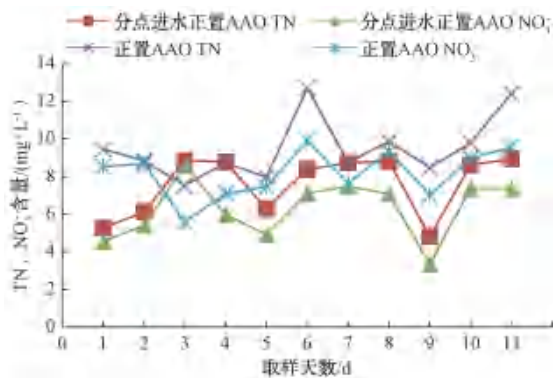


图4 分点进水正置 AAO 工艺 TN、NO₃⁻ 变化

Fig. 4 Changes of TN and NO₃⁻ in AAO Process with Multi-Point Influent

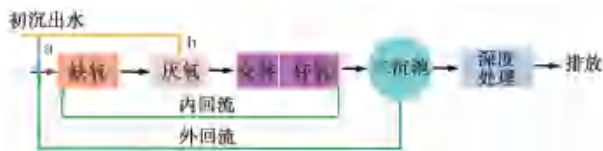


图5 倒置内回流 AAO 工艺流程图

Fig. 5 Flow Chart of Inverted Internal Reflux in AAO Process

一气候条件(夏季)下,与传统 AAO 工艺相比,采用倒置内回流 AAO 工艺后,出水中 TN 和 NO₃⁻ 浓度均有所降低。TN 含量从 6.7 mg/L 降至 5.9 mg/L, NO₃⁻ 含量从 4.8 mg/L 降至 4.0 mg/L,平均值均降低 0.8 mg/L, TN 去除率由 81% 升至 83%。倒置内回流的 TN、NO₃⁻ 变化如图 6 所示,这是由于初沉池出水中含有较多的有机物^[7],直接进入缺氧区为反硝化菌提供了充足的碳源,加强了反硝化效率^[8]。然而,相比分点进水正置 AAO 工艺,将缺氧区完全提至厌氧区之前^[9],缺氧区的反硝化效率并没有分点进水时高。这是由于内回流、外回流将大量的硝酸盐回流到缺氧区的同时,也带来了充足的溶解氧。将缺氧区置于厌氧区之前,使得缺氧池中的溶解氧无法准确控制在反硝化所需的缺氧环境下,因此,需要一定的消氧区,实际上是缩短了反硝化的停留时间,反硝化效率无法提高,同时夏季多雨水,有机物进水浓度较低,倒置内回流 AAO 工艺不适宜该污水处理厂夏季运行。分点进水增加了缺氧区的有机物浓度,消耗了内回流过来的溶解氧,保证了缺氧环境,因此,分点进水正置 AAO 工艺 TN 的去除效果更佳。

3.2.2 倒置内回流分点进水 AAO 工艺

倒置内回流分点进水 AAO 工艺[图 5(a)、(b)]

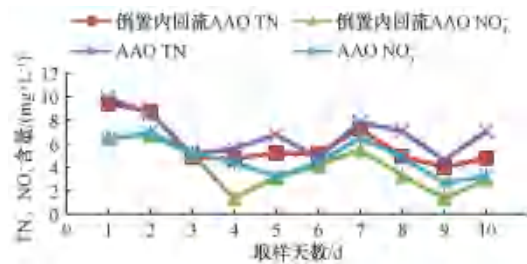


图6 倒置内回流 AAO 工艺 TN、NO₃⁻ 变化

Fig. 6 Changes of TN and NO₃⁻ in Inverted Internal Reflux of AAO Process

进水]是将缺氧区置于厌氧区之前,经初沉池沉淀后的出水,首先经过缺氧区,再进入厌氧区,最后到好氧区。进水方式则为 70% 流入缺氧区,30% 直接流入厌氧区,内回流方式为好氧区的出水回流进缺氧池。

由于采用倒置内回流分点进水 AAO 工艺时正处于夏季,与同季节的 AAO 工艺数据与相比, TN、NO₃⁻ 变化如图 7 所示。使用倒置内回流分点进水 AAO 工艺后,出水的 NO₃⁻ 含量与传统的 AAO 工艺较为接近,两者均值分别为 4.76、4.59 mg/L; TN 含量较传统 AAO 工艺略有增加,平均含量由 7.24 mg/L 增至 7.43 mg/L。由此说明,倒置内回流分点进水 AAO 工艺对反硝化效率的提高效果不明显,这是由于内回流将大量的硝酸盐回流到缺氧区同时,也带来了充足的溶解氧,将缺氧区置于厌氧区之前,使得缺氧池中的溶解氧无法准确控制在缺氧环境下,反硝化效率无法提高。夏季温度较高,适合微生物的生长^[10-11],反硝化速率快,出水中 TN 浓度较低,因此,出水 TN 含量已能满足 10 mg/L 的标准要求。

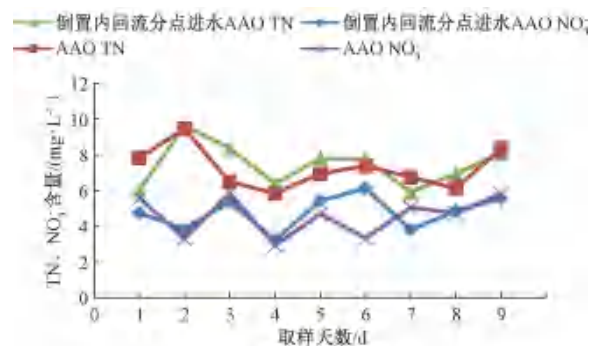


图7 倒置内回流分点进水 AAO 工艺 TN、NO₃⁻ 变化

Fig. 7 Changes of TN and NO₃⁻ in AAO Process with Inverted Internal Reflux and Multi-Point Influent

3.3 延长缺氧区工艺

延长缺氧区工艺包含仅延长缺氧区工艺运行模式[图 8(a) 进水]和进水超越初沉池+延长缺氧区的工艺运行模式[图 8(b) 进水]。

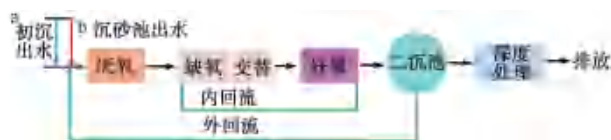


图 8 延长缺氧区工艺流程图

Fig. 8 Process Flow Chart of Extended Anoxic Process

3.3.1 仅延长缺氧区工艺

该污水处理厂在缺氧区和好氧区之间有一交替区,该区设置曝气及搅拌装置。若需要延长缺氧区的 HRT,则打开交替区的搅拌装置;若需要延长好氧区的 HRT,则关闭搅拌装置,打开曝气装置。如图 8(a) 进水所示,延长缺氧区时间即打开交替区的搅拌设备,使缺氧区的 HRT 由 5.18 h 增至 6.2 h。

如图 9 所示,通过延长缺氧区 HRT,大大提高了反硝化效率,TN 去除率约可提高 10%,含量由 12.4 mg/L 降低至 11.0 mg/L。 NO_3^- 含量由 10.8 mg/L 降至 9.7 mg/L。然而,试验在冬季进行,低温条件下反硝化效率较低^[12],因此,即使延长反硝化时间也无法满足 TN 含量 < 10 mg/L 的要求。

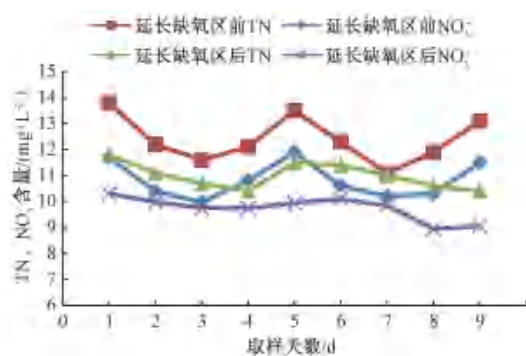


图 9 延长缺氧区工艺 TN、 NO_3^- 变化

Fig. 9 Changes of TN and NO_3^- in Extended Anoxic Process

3.3.2 进水超越初沉池+延长缺氧区的运行模式

污水经初沉池沉淀后,大约可去除 20% 的 BOD_5 。若污水超越初沉池直接进入厌氧区会给生物反应池增加约 20% 的碳源,有利于反硝化反应。在冬季里,反硝化速率慢^[7,12],因此,生化池控制

的 MLSS 相对较高。在延长反硝化反应时间(由 5.12 h 延长至 6.2 h)的同时,补充充足的碳源,从而有利于提高脱氮效率,工艺流程如图 8(b) 进水所示。

进水超越初沉池及延长缺氧区 HRT 的试验在冬季进行。如图 10 所示,在冬季试验时,常规 AAO 工艺的脱氮效果明显下降,出水 TN 平均含量为 12.4 mg/L, NO_3^- 平均含量为 10.7 mg/L。将工艺进行调整,即采用进水超越初沉池和延长缺氧区 HRT 后,即使在冬季也能很好地提高脱氮效果。TN 平均含量降至 8.4 mg/L, NO_3^- 平均含量降至 7.0 mg/L,出水 TN 含量能够达到 10 mg/L 的标准。需要注意的是,进水超越初沉池后,为保证进水中漂浮垃圾能有效去除,需确保预处理设备设施运行正常。

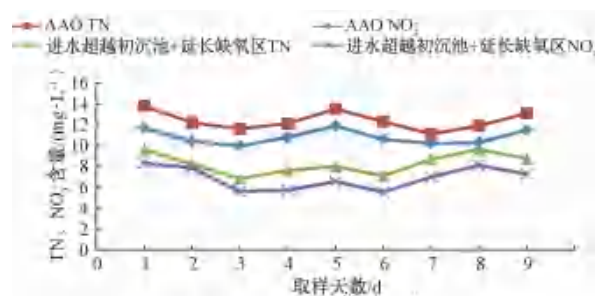


图 10 进水超越初沉池+延长缺氧区工艺 TN、 NO_3^- 变化

Fig. 10 Changes of TN and NO_3^- in Influent Exceeding Primary Sedimentation Tank + Extended Anoxic Process

以上不同工艺的试验比较,实际运行参数控制基本一致,从 TN 去除效果上各有差异。运行成本的差异主要在电耗和碳源消耗上,其中分点进水正置和初沉超越及延长缺氧区长度组合的工艺,利用内部碳源对提高 TN 去除效果明显,需辅助投加的碳源量较少,因此成本较低。其他几种工艺组合视外加碳源量的不同,成本有差异。5 种工艺试验效果比较如表 4 所示。

4 结论

排放标准的提高,对污水处理厂的运行带来新的挑战。通过对污水处理厂工艺运行模式调整研究,正置 AAO 工艺采取分点进水,为反硝化菌提供了碳源,提高了反硝化效率,去除效果较佳;倒置内回流分点进水 AAO 工艺对提高反硝化效率并不明显;在碳源不足情况下,延长反硝化时间对 TN 去除

表 4 不同工艺运行参数、成本及处理效果对比
Tab. 4 Comparison of Operating Parameters, Costs and Treatment Effect of Different Processes

项目	MLSS/(mg·L ⁻¹)	<i>r</i>	<i>R</i>	SV ₃₀	运行成本	对 TN 去除效果
分点进水正置 AAO	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	低	有效
倒置内回流 AAO	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	较高	不明显
倒置 AAO 分点进水	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~35%	高	不明显
延长缺氧区 AAO 工艺	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	低	不明显
进水超越初沉池+延长缺氧区	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	较低	有效

效率无明显提升;采用“进水超越初沉池+分点进水+延长缺氧区”运行模式,即使在冬季也可以明显提高污水处理厂对氮的去除效果。通过挖掘污水处理厂潜在碳源,优化运行方式,在不进行设备实施改造的基础上,可实现污水处理厂 TN 含量稳定小于 10 mg/L 的要求。该工艺运行模式也为污水处理厂提标改造后工艺运行优化提供依据,实现节能降耗;同时,外加碳源可以作为常备药剂,用于 TN 异常时的应急投加。

参考文献

- [1] 江苏省环境保护厅,江苏省质量技术监督局.太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值:DB 32/1072—2018[S]. 2018.
- [2] 国家质检总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [3] 杨晨宵,盛铭军,黄继会,等.“准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J].工业水处理,2020,40(11):15-21.
- [4] HUANG W, GONG B Z, WANG Y M, et al. Metagenomic analysis reveals enhanced nutrients removal from low C/N municipal wastewater in a pilot-scale modified AAO system coupling electrolysis[J]. Water Research, 2020, 173: 115530-115530. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115530.
- [5] TORNO J, NAAS C, SCHROEDER J P, et al. Impact of hydraulic retention time, backflushing intervals, and C/N ratio on the SID-reactor denitrification performance in marine RAS [J]. Aquaculture, 2018, 496: 112-122. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.07.004.
- [6] 张硕,邹伟国.多点进水的倒置 AAO 工艺处理低碳源城市合流污水[J].环境科技,2014,27(1):11-14.
- [7] WILÉN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, et al. Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant [J]. Water Research, 2008, 42(16): 4404-4418.
- [8] GAO C D, WANG W X, FAN S X, et al. Effect on denitrification efficiency in alternating process at different C/N ratio[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030-1032: 442-445. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.442.
- [9] YIN Y, HUI Y Q, XU G Y, et al. Enhanced nutrients removal resulting from energy metabolism improvement in the anoxic-anaerobic-oxic process (reversed AAO) [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 217: 286-293. DOI: 10.5004/dwt.2021.26887.
- [10] 袁砚,朱亮.中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响[J].环境科学,2016,37(11):4289-4295.
- [11] 王骞,袁林江,陈希,等.不同碳源下缺氧/好氧连续流系统生物除磷效果及其机理[J].环境工程学报,2021,15(3):954-961.
- [12] LIU J Y, HUANG J G, SHI B F, et al. Riboflavin enhanced denitrification of artificial wastewater under low C/N condition in cold season[J]. Bioresources, 2021, 16(1): 1949-1957.

(上接第 67 页)

- [11] 聂中林,马赫,梁鹏,等.不同填料曝气生物滤池处理微污染河水的效果[J].中国给水排水,2020,36(17):41-48.
- [12] 贺君,张腾达,裴宪,等.一种新型曝气生物滤池填料的研究[J].非金属矿,2020,43(3):14-16.
- [13] 李新凯,郑春华.双层填料反硝化深床滤池脱氮的研究[J].中国给水排水,2017,33(7):94-96.
- [14] 陈昱璇,赵光,邓建民,等.生态因子对改性聚氨酯生物膜系统运行效能的影响[J].黑龙江农业科学,2015(1):44-48.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [16] 李露,张怀宇,镇祥华,等.陶粒 BAF 在某小城镇污水处理中抗冲击负荷研究[J].中国给水排水,2017,33(17):93-97.