

不同 HRT 下生物自养脱氮工艺对低浓度生活污水处理效果的性能研究

林丹¹, 于成志²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;

2. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350108)

摘要 传统工艺处理生活污水在节能减排方面均存在较大的提升空间。本文以 SNAD 工艺处理低浓度生活污水, 分别在 18h、16.5h、15h、13.5h 四个 HRT 工况下运行, 比较各种污染物去除性能, 探究采用 SNAD 工艺处理低浓度生活污水的处理效果和最佳 HRT。试验结果表明, SNAD 工艺可以稳定处理低浓度生活污水, 但随着 HRT 缩短, 污染物去除效果总体呈现下降趋势, HRT 15–18h 条件下出水可稳定达标, HRT 缩短至 13.5h 后, 出水无法达标。

关键词 SNAD; 低浓度城市生活污水; HRT

中图分类号: X799

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)04-0060-04

目前, 我国大部分城市污水处理厂仍采用传统活性污泥法为主的工艺, 存在一系列问题, 如需大量曝气能耗, 需大量有机碳源加入低碳源污水, 处理处置剩余污泥费用较高等, 因而在节能减排方面传统城市污水处理工艺尚存在较大提升空间。采用自养菌脱氮工艺, 可节约供氧量, 脱氮途径短, 无需外加碳源, 温室气体产量少, 是一项前景广阔的污水脱氮工艺, 新型生物脱氮技术的发展为节能减排提供了更多可能^[1]。

近年来自养生物脱氮技术不断演变, 从亚硝化、厌氧氨氧化(Sharon-Anammox)两段工艺, 短程硝化和厌氧氨氧化分别在两个独立的反应器中进行^[2]; 到全程自养脱氮(CANON)工艺, 部分亚硝化与厌氧氨氧化过程整合在同一个反应装置内, 解决了两段式反应占地面积大、运行调控量大、运行管理成本高的问题^[3]; 再到同步短程硝化、厌氧氨氧化、反硝化(SNAD)工艺, 同一反应器中同时发生短程硝化、厌氧氨氧化和反硝化反应, 反应器对有机物的冲击具有更强的耐受力、反硝化菌的存在增加了氮元素和有机物的去除、对水质接受能力更强^[4]。但 SNAD 工艺目前多应用于养猪废水、垃圾渗滤液等一些污染物浓度较高的废水中, 在浓度较低的污水中运用较少。

鉴于此, 本研究采用 SNAD 工艺对低浓度城市生活污水进行处理, 探讨了 HRT 对污染物去除效果的影响, 为 SNAD 在低浓度城市生活污水处理中的应用提供了理论参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

SNAD 中试装置由不锈钢制成, 配套设置包括进水泵、搅拌器、加热棒、曝气装置、电磁式空气泵、平板膜架、平板膜、加药泵、出水泵、水银压差计等。进水槽长、宽、高均为 20cm。反应器单个廊道长 × 宽 × 高为 1.25m × 0.4m × 0.95m (水深 0.75m), 共 2 廊道。装置总体积 950L, 有效体积 750L。污水由进水泵抽吸进入进水槽, 经由单向阀进入主体反应器中进行反应, 后经由平板膜利用出水泵抽吸出水。

1.2 试验设计

试验采用福州洋里污水厂一二期进水作为试验用水, 接种培养完成的 SNAD 污泥进行处理。由于污水厂进水水质波动较大, 后期采用将进水先在蓄水池中静置后再引入试验装置的方法稳定进水水质。试验进水 COD 为 110 ± 50 mg/L, TP 为 1.08 ± 0.98 mg/L, TN 为 36.6 ± 7.9 mg/L, NH_4^+-N 为 31.9 ± 6.4 mg/L。

进水经由 SNAD 中试装置进行处理, 初始处理量为 1t/d, HRT 为 18h, 泥龄为 60d。反应器内保持整体区域 DO 不高于 0.2mg/L, 曝气装置正上方区域 DO 不高于 0.4mg/L。反应器内 pH 控制在 7.6–8.0 范围内, 水温控制在 25–32℃, 根据实际运行情况可做调整。每完成一个工况试验, 保持泥龄 60d 不变, DO、pH 等相关运行参数相对稳定, 逐步缩减 HRT (每个工况依次减

少 1.5h), 测试处理效果, 探究最佳 HRT 及不同 HRT 下的运行情况差异。

1.3 分析方法

实验中 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的测定参照国标方法测定: COD 采用重铬酸钾法测定, TP 采用钼锑抗分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法。

2 试验结果与分析

2.1 工况一处理性能研究: HRT=18h

SNAD 反应器在 HRT 为 18h, 泥龄为 60d 工况下共运行 34d 控制反应器内总曝气量为 3L/min, 采用间歇曝气 (曝气 30min/停曝 30min) 方式, 污泥浓度 3800-4300mg/L, 控制 pH7.6-8.0, 水温 25-30℃。运行期间出水稳定, 从第 3d 开始均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 标准。该工况运行期间进水 COD、TP 浓度波动较大, 但去除率较高, 出水 COD、TP 浓度稳定, 均可稳定达标 (COD \leq 50mg/L、TP \leq 0.5mg/L); TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果明显, TN 均可稳定达标 (TN \leq 15mg/L), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 自第 3d 开始达标 ($\text{NH}_4^+\text{-N}\leq$ 5(8)mg/L)。试验结果表明 SNAD 工艺对低浓度生活污水具有较稳定的处理能力, 18h 这一初始 HRT 的设置满足合理运行参数范围。

2.2 工况二处理性能研究: HRT=16.5h

保持泥龄 60d 不变, 调整 SNAD 反应器进出水, 将 HRT 由 18h 缩短至 16.5h, 其余控制参数未做调整。切换工况后出水 TN 上升至 20.9-26.9mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 上升至 17.8-22.5mg/L, 分析由于 HRT 缩短, 反应器内微生物与污水接触时间变短, 引起出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 升高, 出水 TN 同步升高。该工况共计运行 163d, 1-18d 通过调整曝气量、曝停比、水温, 出水水质在第 19d 第一次达到排放标准。19-67d 控制反应器内总曝气量为 4L/min, 采用间歇曝气 (曝气 30min/停曝 35min) 方式, 控制 pH7.8-8.0, 水温 28-32℃, 运行效果稳定, 出水水质达标, 但 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水稳定性不佳, 时常处于超标临界状态。

第 68d 出水 TN 出现超标情况, 随后第 73d 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也出现超标状态, 调高曝气量至 4.5L/min, 调整曝停比为曝气 30min/停曝 30min, 但 TN 依然持续处于超标状态, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 短期降低后又持续攀升。分析原因, 由于进水 COD 波动较大, 在高 COD 状态下反硝化反应强化促使硝化反应占据优势, 亚硝酸菌不能保持生长, 系统中曝气条件也不能供应传统硝化反硝化反应持续

进行, 最终系统失去平衡, 对出水水质产生影响^[5]。

基于此, 从第 86d 开始, 试验增加前置蓄水池以减小进水 COD 波动, 将试验进水先在蓄水池中静置 12h 以上后再引入 SNAD 反应器, 进水 COD 得到有效稳定, 降低至 140mg/L 以下。同时调整曝气量至 3L/min, 调整曝停比为曝气 30min/停曝 40min, 强化短程硝化反应, 抑制硝化反应。考虑到反应器系统内亚硝酸菌和 AnAOB 已无法满足该工况下的反应需求, 于第 118d 重新接种亚硝酸菌和 AnAOB, 接种后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 去除率缓慢上升。运行至第 123d, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 稳定在 10.6mg/L, 出水 TN 下降至 11.3mg/L, 随后通过曝停比和曝气量的调整 (曝气 30min/停曝 30min, 曝气量 3.5L/min), 试验出水于第 131 第二次达到排放标准, 并稳定运行至第 163d, 稳定达标运行 33d。

该工况运行前期进水 COD 浓度波动较大, 但出水 COD 稳定达标, 说明 SNAD 工艺对低浓度城市生活污水中 COD 的去除效果良好。运行前期进水总磷浓度波动较大的问题在后期采取前置蓄水池稳定进水水质措施后得到有效缓解。SNAD 反应系统内的脱氮效果受 C/N 影响较大, 高浓度有机物会导致异养微生物大量繁殖, 影响 AnAOB 的主导地位; 低 C/N 条件有利于促进短程硝化反应, 从而同步促进 Anammox 和反硝化反应进行。同时充分利用曝气量和曝气方式的调节控制 DO, 抑制硝酸菌的繁殖, 促进亚硝酸菌和 AnAOB 的生长。试验结果表明 HRT 缩短至 16.5h 后, 出水水质仍能稳定达标, 依然满足合理运行参数范围。

2.3 工况三处理性能研究: HRT=15h

保持泥龄 60d 不变, 调整 SNAD 反应器进出水, 将 HRT 由 16.5h 缩短至 15h, 其余控制参数未做调整。切换工况后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 升高, 出水 TN 同步升高。于第 4d 加大曝气量至 4L/min, 随后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下降至 4.0-6.0mg/L, 出水 TN 未见明显变化。于第 8d 将曝停比调整为曝气 30min/停曝 35min, 强化亚硝化反应, 抑制硝化反应, 随后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 继续下降至 5.0mg/L 以下。该工况共计运行 61d, 出水水质在第 10d 达到排放标准, 稳定达标运行 52d。

该工况运行下进水 COD、TP 浓度波动较大, 但出水 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均可稳定达标。试验结果表明 HRT 缩短至 15h 后, 出水水质仍能稳定达标, 依然满足合理运行参数范围。

2.4 工况四处理性能研究: HRT=13.5h

保持泥龄 60d 不变, 调整 SNAD 反应器进出水,

表1 四种HRT下稳定运行后的工况参数比较

HRT	18h	16.5h	15h	13.5h
处理量	1t/d	1.09t/d	1.2t/d	1.33t/d
泥龄	60d	60d	60d	60d
曝气量	3L/min	3.5L/min	4L/min	4~4.5L/min
曝停比	30min/30min	30min/30min	30min/35min	30min/35min 30min/30min 25min/30min
pH 条件	7.6~8.0	7.8~8.0	7.8~8.0	7.8~8.0
温度控制	25~30℃	28~32℃	28~32℃	28~32℃
MLSS	3800~4300mg/L	5000~5500mg/L	5000~5500mg/L	5000~5500mg/L

将HRT由15h缩短至13.5h,其余控制参数未做调整。切换工况后出水 NH_4^+-N 与出水TN同步升高。于第7d将调高曝气量至4.5L/min,随后第13d出水 NH_4^+-N 下降至8.0mg/L,出水TN下降至19.6mg/L。于第13d将曝停比由曝气30min/停曝35min调整为曝气30min/停曝30min,随后出水 NH_4^+-N 持续下降,于第19d下降至1.8mg/L,出水TN下降至16.5mg/L。第19d将曝气量降低至4.2L/min,随后出水 NH_4^+-N 与TN持续攀升,于第27d出水 NH_4^+-N 升至13.5mg/L,出水TN升至22.7mg/L。第27d将曝停比由曝气30min/停曝30min调整为曝气25min/停曝30min,随后运行至第35d出水 NH_4^+-N 下降至5.8mg/L,出水TN未见明显变化。在该工况的运行调整过程中,出水 NH_4^+-N 随曝气量与曝停比的变化明显,但硝氮变化不大,平均为 $12.2 \pm 2.1\text{mg/L}$,受 NH_4^+-N 控制不理想且硝氮数值较高的影响,出水TN居高不下,无法达到排放标准。

该工况运行期间COD进水浓度波动较大,但出水可稳定达标;出水 NH_4^+-N 、TN、TP去除率偏低,均无法满足城镇污水处理厂污染物一级A排放标准。不同的HRT直接影响到微生物与基质底物的接触时间,也直接影响到传质过程,而传质过程又会对污水的处理效率产生影响。HRT过短,反应器内微生物与污水接触时间短,部分活性污泥随水流溢流反应器,使系统中脱氮、除磷反应不完全,从而引起 NH_4^+-N 、TN、TP出水浓度升高。

2.5 不同HRT稳定运行条件及运行效果比较

表1对四种HRT下运行稳定后的工况参数进行了统计,从表1中可以看出,随着HRT缩短,单位时间

内污染物处理量上升,微生物对氧气的需求量增加,在控制总体区域DO不高于0.2mg/L,曝气装置正上方区域DO不高于0.4mg/L的前提下,曝气强度总体呈现增加趋势。

有研究表明^[6-7],用于废水处理的AnAOB的生长最佳pH值在6.7~8.3之间,最适宜亚硝酸菌生长的pH值在7.9~8.2,最适合硝酸菌生长的pH值在7.2~7.6,本试验SNAD反应器pH控制在7.6~8.0,在试验后期,将pH控制范围调整为7.8~8.0,以加强亚硝酸菌,抑制硝酸菌。

表2对四种HRT下稳定运行后污染物的去除效果进行了统计。随着HRT缩短,污染物去除效果总体呈现下降趋势,在HRT缩短至13.5h后,出水无法稳定达标。比较发现,16.5h HRT下的污染物去除效果较15h HRT下更差,这是因为16.5h HRT下进水C/N更高。COD的存在一方面会与AOB竞争DO,影响其活性,另一方面则会抑制AnAOB的活性。所以引入COD会对反应器的处理效果造成影响,出水水质也会受到影响。同时,COD的存在会引入异养菌和反硝酸菌,有研究认为^[8-11],在0~2的碳氮比条件下,COD的增加并不会对AOB和AnAOB产生抑制作用,反而会通过反硝化作用提高氮去除负荷;碳氮比为3~4时,大量COD的存在会使得好氧异养菌不断增殖生长。16.5h HRT工况运行时,进水C/N处于碳氮比影响条件的临界值附近,对出水效果略有影响,但不影响达标排放。

3 结论

本文针对不同HRT下SNAD工艺处理低浓度生活污水的工况和处理效果进行了分析,得到的主要结论如下:

表 2 四种 HRT 下稳定运行后污染物去除效果比较

HRT		18h	16.5h	15h	13.5h
COD	进水浓度 (mg/L)	123 ± 28	76 ± 29	86 ± 24	70 ± 11
	出水浓度 (mg/L)	18 ± 4	19 ± 5	16 ± 5	20 ± 6
	平均去除率 (%)	84.4	71.6%	79.6%	71.9%
TP	进水浓度 (mg/L)	4.07 ± 0.78	0.51 ± 0.10	0.68 ± 0.21	0.65 ± 0.09
	出水浓度 (mg/L)	0.32 ± 0.13	0.38 ± 0.06	0.31 ± 0.06	0.46 ± 0.09
	平均去除率 (%)	91.7%	23.4%	51.1%	29.0%
TN	进水浓度 (mg/L)	46.8 ± 4.1	25.5 ± 2.7	35.6 ± 3.9	36.4 ± 3.5
	出水浓度 (mg/L)	8.9 ± 1.2	8.2 ± 1.9	8.6 ± 1.8	20.9 ± 2.5
	平均去除率 (%)	80.7%	67.56%	75.5%	42.3%
NH ₄ ⁺ -N	进水浓度 (mg/L)	39.1 ± 3.7	23.1 ± 2.3	30.4 ± 4.0	30.7 ± 3.4
	出水浓度 (mg/L)	3.1 ± 1.1	3.6 ± 0.6	3.2 ± 0.6	7.8 ± 3.1
	平均去除率 (%)	92.0%	84.4%	89.4%	74.8%
C/N		2.7 ± 0.7	3.1 ± 1.3	2.4 ± 0.7	2.0 ± 0.4

1. 随着 HRT 缩短, 污染物去除效果总体呈现下降趋势, 15–18h HRT 下出水可以稳定达标, HRT 缩短至 13.5h 后, 出水无法稳定达标。

2. 随着 HRT 缩短, 反应器中整体曝气强度在控制 DO 不超过设定值的前提下, 需适度加强, 从而维持反应正常进行。

3. SNAD 反应对 pH、水温等相关条件的要求比较严格, 需严格控制反应条件, 控制 pH 在 7.6–8.0 范围, 温度在 25–32℃ 范围才能达到更好处理效果。

4. C/N 的高低对出水效果存在影响, C/N 超过 3 时影响较为显著, 不利于 SNAD 反应的进行。

参考文献:

- [1] 郑照明, 李军, 侯爱月, 等. 城市生活污水 SNAD 生物膜脱氮特性 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(04):1322–1330.
- [2] 齐凯, 马晨曦. SHARON–ANAMMOX 组合工艺在废水脱氮领域的应用进展 [J]. 辽宁化工, 2014, 43(02):158–161, 163.
- [3] 马士琪. 基于 SNAD 的新型工艺用于城市污水脱氮除磷的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [4] Shuzhe Ding, Peng Bao, Bo Wang, et al. Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage

using suspended activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2018(339):180–188.

[5] 李冬, 何永平, 张肖静, 等. 有机碳源对 SNAD 工艺脱氮性能及微生物种群结构的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(02):68–75.

[6] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. Appl Environ Microbiol, 1999, 65(07):3248–3250.

[7] Alleman J E. Elevated nitrite occurrence in biological wastewater treatment systems [J]. Water Science and Technology, 1985, 2–3(17):409–419.

[8] Wang C C, Lee P H, Kumar M, et al. Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(1a3):622–628.

[9] 徐楠, 赵静, 孙治富, 等. 高浓度啤酒废水作为污水脱氮除磷工艺补充碳源的应用研究及其经济性分析 [J/OL]. 净水技术, 2023–02–24:1–8. <https://doi.org/10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04>.

[10] 朱晓超, 冯亚兵, 陶辉, 等. 某污水厂 CAST 工艺强化脱氮除磷升级改造工程设计 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(02):58–62.

[11] 付进南, 任燕飞, 陈春生, 等. 低温下 MBR 工艺在微污染水体中的强化脱氮研究 [J]. 现代化工, 2023, 43(01):250–253, 258.