

CANON 工艺处理老龄垃圾渗滤液的研究

耿忠轩¹, 张立秋¹, 吕 玮¹, 李淑更²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学 环境工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 以老龄垃圾渗滤液为处理对象,采用 SBR 反应器探究 CANON 工艺的脱氮性能。通过接种短程硝化反应器和厌氧氨氧化反应器中的污泥,采用间歇曝气-持续搅拌的运行方式经过 58 d 成功启动反应器。在启动期进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 146、153 mg/L 的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别可以达到 96.80% 和 85.88%。为优化 CANON 工艺的脱氮效率,根据反应器中 pH 值的变化调控曝气和厌氧搅拌时间,在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 190、203 mg/L 的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别可达到 98.18% 和 86.45%,提高了 TN 去除量,并减少了能耗。

关键词: 老龄垃圾渗滤液; CANON 工艺; pH 值; 脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0019-07

Treatment of Aged Landfill Leachate by CANON Process

GENG Zhong-xuan¹, ZHANG Li-qiu¹, LÜ Wei¹, LI Shu-geng²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The aged landfill leachate was treated by a SBR based on CANON process, and the denitrification performance was explored. The system was inoculated with mixed sludge from a partial nitrification reactor and an anaerobic ammonium oxidation reactor in the laboratory. The reactor was successfully started after 58 days by adopting intermittent aeration and continuous stirring operation. The results showed that the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN could reach 96.80% and 85.88% when the influent concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were 146 mg/L and 153 mg/L respectively. In order to optimize the denitrification efficiency of the CANON process, aeration time and anaerobic stirring time were controlled according to pH change. When the influent concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were 190 mg/L and 203 mg/L respectively, the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN could reach 98.18% and 86.45% respectively. This operational mode could increase total nitrogen removal capacity and reduce energy consumption.

Key words: aged landfill leachate; CANON process; pH; denitrification

垃圾渗滤液是一种成分复杂,含有高浓度氨氮、盐度、重金属离子以及大量难生物降解有机物的废水。目前,国内对垃圾渗滤液的生物脱氮处理大多

采用传统的硝化-反硝化技术,然而老龄垃圾渗滤液中的低 C/N 值不满足反硝化过程所需要的碳源,往往需要提供足够的外加碳源才能进行反硝

化,且在消耗大量能源的条件下仍然无法达到良好的脱氮效果,因此寻求一种高效低耗的生物脱氮技术迫在眉睫。

20 世纪 90 年代,随着厌氧氨氧化的发现,以其为核心的短程硝化-厌氧氨氧化组合工艺进入人们的视野,该工艺通过氨氧化菌(AOB)的亚硝化作用将进水中一半的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,随后反应器中的厌氧氨氧化菌(AnAOB)以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为电子供体、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体,将其转化为 N_2 和少部分的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。与传统脱氮工艺相比,全程自养脱氮(CANON)工艺具有污泥产量低、可节约 60% 的耗氧量、无需外加碳源、工艺流程短、占地面积小等优点,具有广阔的应用前景^[1]。目前对于 CANON 工艺的研究报道很多,但大多处于在实验室采用模拟废水的小试研究阶段^[2-3],在实际工程应用方面也多用于处理高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的工业废水^[4]和污泥消化液^[5]以及低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的养殖废水^[6]等,在处理老龄垃圾渗滤液方面的研究报道较少^[7]。CANON 工艺的运行方式是反应器成功启动的关键,而目前通过在线监测 pH 值优化 CANON 工艺运行的研究报道甚少。基于此,笔者采用序批式活性污泥反应器(SBR),以实际老龄垃圾渗滤液为处理对象,研究 CANON 工艺的启动和运行过程,并通过实时监测 pH 值的方式来优化 CANON 工艺对老龄垃圾渗滤液的脱氮性能。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,反应器内径为 184 mm,外径为 200 mm,高为 460 mm,有效容积为 10 L,材质为有机玻璃。反应器通过隔膜泵与定时器组合自动进水,外壁垂直方向设有出水口,通过电磁阀与定时器组合自动出水;底部设有曝气头,与空气压缩机相连接,并根据转子流量计调控曝气量;另设有电动

搅拌装置,电动机转速设为 50 ~ 60 r/min;反应器内部设有加热装置,内部温度保持在 $(33 \pm 1)^\circ\text{C}$;反应器内部填充约 10% 的纤维球填料,中间设有塑胶格网,防止填料上浮;此外,反应器顶部设有盖板,外部裹有保温棉使反应器避光保温。

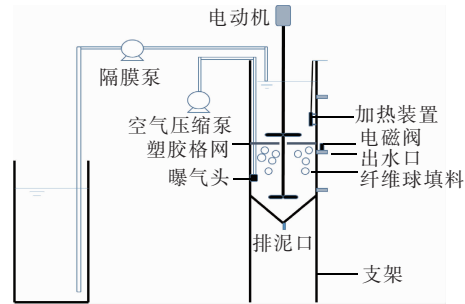


图 1 一体化自养脱氮装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of integrated autotrophic nitrogen removal device

1.2 试验水质和接种污泥

试验用水取自深圳某垃圾渗滤液处理站调节池,垃圾渗滤液呈浅黄色,无明显异味, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、COD、Cu、Fe、盐度分别为 50 ~ 350、0 ~ 2、1 ~ 7、100 ~ 400、7.58 ~ 16.65、26.29 ~ 78.92、500 ~ 2 000 mg/L。

接种污泥取自实验室的短程硝化反应器和厌氧氨氧化反应器。将短程硝化污泥和厌氧氨氧化污泥以 3 : 2 的比例混合,接种后反应器内混合污泥浓度为 $(3\ 100 \pm 100)$ mg/L。

1.3 工艺运行方式及控制条件

试验中反应器的排水比为 50%,每周期进水时间为 3 min、反应时间为 16 ~ 26 h(根据进水氮负荷而变)、沉淀时间为 0.5 h、出水时间为 3 min。试验中采用稀释实际垃圾渗滤液的方式调节 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,每周期取出水水样进行检测,并监测反应过程中 pH 值和 DO 浓度的变化。启动及运行过程中工艺运行方式及控制条件如表 1 所示。

表 1 工艺运行方式和控制条件

Tab. 1 Process operation mode and control condition

项 目	运行时间/d	运行方式	周期时间/h	DO/(mg · L ⁻¹)	pH 值
短程硝化污泥活性恢复期	1 ~ 8	曝气 + 厌氧搅拌	4	0.8 ~ 1.5	8.0 ± 0.2
CANON 工艺启动期	9 ~ 33	曝气 + 厌氧搅拌	16	0.3 ~ 1.0	7.7 ~ 8.3
	34 ~ 58	间歇曝气 - 持续搅拌	18.5	0.3 ~ 0.8	7.9 ~ 8.2
CANON 工艺运行期	59 ~ 103	间歇曝气 - 持续搅拌	18.5 ~ 23	0.3 ~ 0.8	7.8 ~ 8.2
CANON 工艺优化运行期	104 ~ 153	根据 pH 值的变化调控曝气和厌氧搅拌时间	20 ~ 26	0.25 ~ 0.9	8.0 ~ 8.3

1.4 检测指标和方法

COD:标准重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂比色法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$:麝香草酚分光光度法;MLSS:滤纸重量法;DO、pH 值、温度:pH/Oxi 340i 便携式多功能测定仪(德国 WTW);SV:30 min 沉降法。TN 浓度取 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 三者浓度之和。

2 结果与讨论

2.1 CANON 工艺的启动及运行

第 1~8 天为短程硝化污泥活性恢复期,调节进水 pH 值在 8.0 左右,DO 控制在 0.8~1.5 mg/L, HRT 为 8 h,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 50~80 mg/L,随着反应器的运行,至第 8 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达到了 96.00%,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 71 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率达到了 90.00%,说明短程硝化污泥已经适应了老龄垃圾渗滤液的水质。第 9 天向反应器中投加厌氧氨氧化污泥,进行 CANON 的启动(第 9~58 天),氮素浓度的变化如图 2 所示。

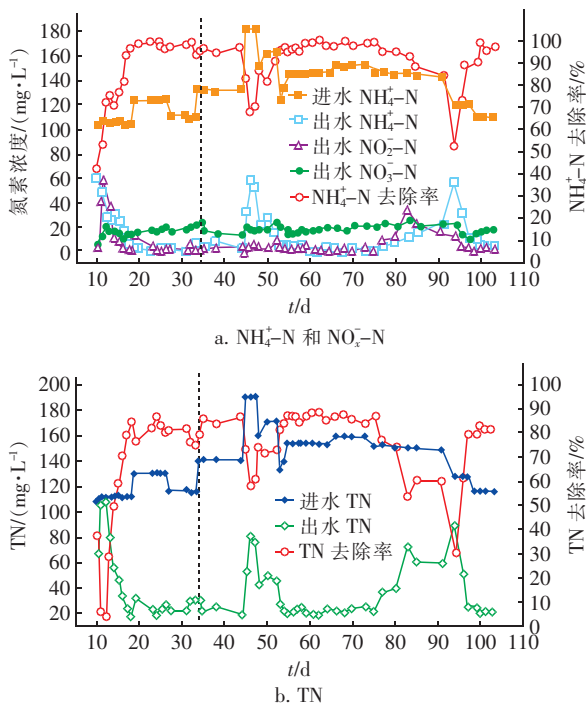


图 2 CANON 工艺启动和运行阶段氮素浓度的变化

Fig. 2 Change of nitrogen concentration during start-up and operation phases of CANON process

第 9~33 天采用曝气(4 h) + 搅拌(12 h)的方式运行反应器,由图 2 可知,随着反应器的运行,AnAOB 逐渐适应垃圾渗滤液的水质环境, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率逐渐上升。启动初期(第 9~18 天),

进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 105、110 mg/L,运行至第 18 天时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别达到了 96.78% 和 83.83%,随后逐渐提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 仍一直得到了良好去除。但是,从图 2(a)可以看出,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度呈上升趋势,至第 33 天出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高达 23.5 mg/L。为此,连续监测第 30~33 天反应器内 pH 值与氮素浓度的变化并作误差曲线,如图 3 所示。可以看出,虽然进出水 pH 值都在 8.1 左右,基本没有变化,但在反应过程中尤其是曝气 4 h 结束时,反应器内 pH 值最低可降至 7.7,而且该时刻前后 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度上升趋势较大,分析原因是低 pH 值环境为 NOB 的富集生长创造了条件,不利于亚硝化反应的进行。Tao 等人^[8]认为 pH 值为 7.6 时亚硝化效果弱于 pH 值为 8.11 时,与本试验结果一致。考虑到后期提高进水负荷后,需要增加曝气时长以提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率,反应器内的 pH 值变化幅度将会更大,不利于 AOB 和 AnAOB 的协同稳定生长,因此从第 34 天开始采用间歇曝气的方式运行。

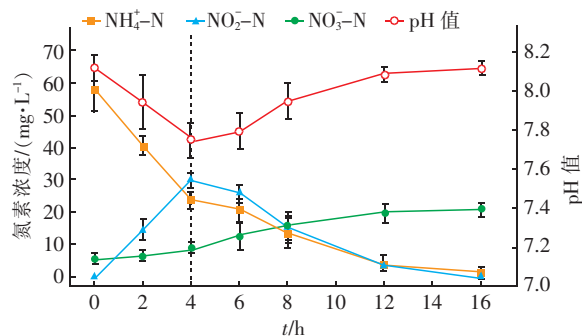


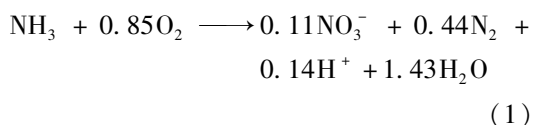
图 3 第 31~33 天反应器内氮素浓度与 pH 值的变化

Fig. 3 Change of nitrogen concentration and pH in the reactor during day 31 to 33

第 34~58 天采用间歇曝气 - 持续搅拌的运行方式,即曝气 2 h + 厌氧 3 h 循环交替运行,并结合出水氮素浓度变化情况确定每周期的运行时间。在该运行方式下,反应器的脱氮效果良好,在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 132 mg/L 的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别高达 96.95% 和 84.78%。第 44 天,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 132 mg/L 提高至 182 mg/L,相应地进水 TN 浓度由 140 mg/L 升高至 190 mg/L,从图 2 可以看出,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TN 浓度迅速上升,TN 去除率迅速下降,至第 48 天,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高至 65.09 mg/L、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 3.96 mg/L、TN

为 75 mg/L, TN 去除率下降至 60.31%。进水负荷的骤然大幅度提高导致脱氮性能恶化,即使适当延长反应时间亦不能有效改善,分析其原因,反应器内接种的污泥浓度较低,没有足够的生物量来处理 TN。本工艺中的污泥以絮状形式存在,相比于颗粒污泥以及生物膜工艺,絮状污泥对于外界条件的变化更为敏感,此外,相较于 AnAOB, AOB 的抗基质负荷冲击能力较弱,刘涛等人^[9]认为进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度对 AOB 群落结构影响较大,但是对 AnAOB 的影响较小,这与本试验结果一致。因此,为恢复反应器的脱氮性能,逐渐降低进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度至 146 mg/L,经过 5 d 的恢复培养,至第 53 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别达到 96.80% 和 79.01%,脱氮性能得以恢复。在第 54~58 天,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 146、153 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率保持在 95.32%~96.80%, TN 去除率保持在 82.92%~85.88%,脱氮效果良好。

对于 CANON 工艺,理论上进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 最终将完全转化为 N_2 和少量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,如下所示^[10]:



因此,可用出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 两者之和与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化量的比值即 $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 来判断 CANON 工艺是否启动成功^[11]。启动阶段 $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化如图 4 所示。

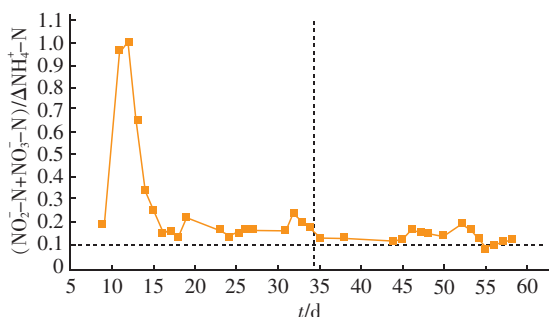


图4 启动阶段 $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化

Fig.4 Change of $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ during start-up stage

第 9~33 天, $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本在 0.20 以上,分析原因是该阶段部分周期出水有少量 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累且 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 生成量呈上升趋势,导致 $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 高于理

论值。运行 54 d 后,反应器的脱氮效果较好, TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别高达 82.92% 和 95.52%, $(\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 保持在 0.11 左右,而且该阶段反应器内 pH 值始终保持在 7.9~8.2 之间、变化幅度较小。Chung 等^[12]的研究结果表明,在短程硝化反应中,游离氨 (FA) 在 5~15 mg/L 时效果最佳。在本试验的第 54~58 天,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 146 mg/L, pH 值为 7.9~8.2,温度为 26 °C, FA 浓度可根据以下公式求得^[13]:

$$C_{\text{FA}} = \frac{17}{14} \times \frac{[\text{NH}_4^+ - \text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{K_b/K_w + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中: $K_b/K_w = e^{6.344/(273+T)}$ 。可以计算出反应器内 FA 浓度在 8.19~15.63 mg/L 之间,在 NOB 的抑制阈值(0.1~1.0 mg/L)之上,对 NOB 产生抑制作用,在 AOB 的抑制阈值(10~150 mg/L)^[14]最小值附近,可以忽略对 AOB 的影响。可以认为,经过 58 d 的启动培养, CANON 工艺启动成功。

反应器启动成功后,进入运行期,如图 2 所示,在第 59~75 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率一直保持在 95.00% 以上, TN 去除率保持在 85.00% 以上,脱氮效果良好。在第 76 天,由于季节性气候变化导致温度骤降,反应器的脱氮效果迅速下降,至第 94 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别降至 52.88% 和 29.89%。第 95 天,在反应器中安装加热装置,使反应器内温度保持在 $(34 \pm 1)^\circ\text{C}$,经过 6 d 的恢复培养,至第 101 天,反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率分别达到了 96.36% 和 81.72%,反应器的脱氮性能恢复。

2.2 CANON 工艺的优化运行

2.2.1 优化运行方式

CANON 工艺启动成功后,随着反应器的运行,发现间歇曝气-持续搅拌的运行方式存在 TN 去除量提升困难、工作效率低等问题。因此,自第 104 天开始,根据反应器内 pH 值的变化来调控曝气和厌氧搅拌时间,即利用 NaHCO_3 调节进水 pH 值为 8.30,当 pH 值下降至设定值时停止曝气,短程硝化阶段结束,开始厌氧运行,由于厌氧氨氧化作用, pH 值呈上升趋势,当 pH 值上升趋势趋于平缓时,再度开始曝气进行短程硝化反应,如此根据 pH 值的变化往复循环调控曝气时间。

不同进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度下曝气和厌氧搅拌的最佳时间分配比例不同,以第 112~134 天为例,进

水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 161、168 mg/L, 监测第 112、116、121、134 天反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度以及 TN 去除率随 pH 值的变化情况, 并作各指标的平均值变化曲线, 如图 5 所示。

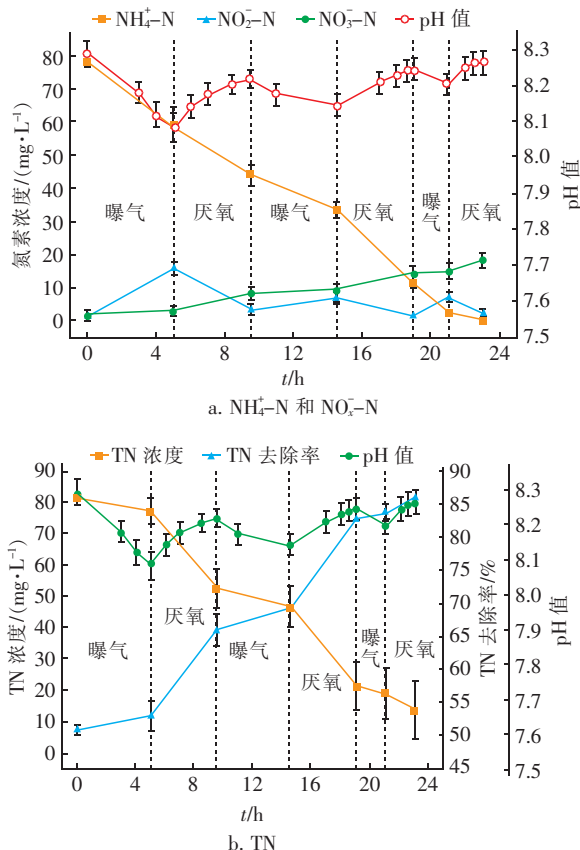


图 5 反应器内氮素浓度随 pH 值调控的变化情况

Fig. 5 Change of nitrogen concentration with pH regulation in the reactor

由图 5 可以看出, 第 0 ~ 5 小时为曝气阶段, DO 浓度保持在 0.60 ~ 0.90 mg/L 之间, 该阶段主要进行短程硝化反应, pH 值呈下降趋势, 部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 因此反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度下降、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度上升, TN 去除率增长缓慢; 至第 5 小时, 反应器内 pH 值下降至 8.1, 停止曝气进入厌氧搅拌阶段, DO 保持在 0.25 ~ 0.40 mg/L, 厌氧氨氧化是 CANON 工艺的主要脱氮途径, 此时反应器内的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 同时得到去除, TN 去除率和 pH 值均快速升高, 当 pH 值升至 8.23 时, 增长趋势变平缓, 反应器内底物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被消耗完毕, 此时再次开始曝气进行短程硝化反应, 为厌氧氨氧化提供反应基质 $\text{NO}_2^- - \text{N}$; 至第 14.5 小时, pH 值降至 8.15, 停止曝气进行厌氧反应; 至第 19 小时, 反

应器内 pH 值的增长趋势再度趋于平缓, 因此再度开始曝气。如此往复循环, 最终出水 pH 值为 8.29, 接近进水 pH 值, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为零、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为 3.60 mg/L。

杨洋等^[15]认为厌氧氨氧化污泥的最适 pH 值范围为 7.5 ~ 8.3, 高大文等^[16]通过控制 pH 值在 7.8 ~ 8.7 成功实现了短程硝化反硝化脱氮工艺, 郭劲松等^[17]认为 CANON 工艺的最适 pH 值为 7.5 ~ 8.5, 本研究反应器内的 pH 值始终保持在 8.1 ~ 8.3 的设定范围内, 与曝气 + 搅拌的运行方式相比, pH 值变化幅度小、反应器运行稳定, 同时节省了因短程硝化反应结束时 pH 值过低而向反应器中补充碱度的药剂费用。与间歇曝气 - 持续搅拌的运行方式相比, 根据 pH 值的变化调控曝气和厌氧搅拌时间的运行方式, 可以合理分配好氧和厌氧时间, 不仅避免了在进入厌氧阶段时由于厌氧时间过短或过长导致的基质 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 剩余或缺乏问题, 而且缓解了由于频繁曝气而导致的在好氧至厌氧这一过渡期内反应器运行效率低的问题, 提高了总氮去除量。

2.2.2 优化运行阶段的脱氮效果

CANON 工艺在优化运行阶段的氮素浓度变化如图 6 所示。可以看出, 在第 104 ~ 111 天, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 132、139 mg/L, 根据 pH 值的变化调控曝气和厌氧搅拌时间后, 反应器的运行周期为 20 h, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率高达 99.30%, TN 去除率为 86.01%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 TN 去除效果良好。为提高系统的 TN 去除量, 逐渐提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度至 161 mg/L、再至 190 mg/L, TN 浓度增至 203 mg/L, 运行过程中通过 pH 值的变化调控曝气和厌氧搅拌时间, 结果表明, 随着进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的升高, 反应器的运行周期相应延长, 至第 139 天, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别为 4.60、0.07、23.31 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达到 98.18%, TN 去除率达到 86.45%, 反应器脱氮效果良好。与间歇曝气 - 持续搅拌运行方式相比, 优化运行方式的 TN 去除负荷更高, 从 0.074 kgN/(m³ · d) 提高到了 0.080 kgN/(m³ · d)。

另外, 从图 6(a) 可以看出, 每次进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度提高以后, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 迅速上升, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率下降, 例如第 112 天进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度提升至 161 mg/L、第 135 天提升至 190 mg/L 以后, 出水

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均上升至 30 mg/L 以上。分析认为, AOB 抗基质负荷冲击能力较差, 进水浓度的提高使 AOB 受到短暂的可逆性抑制, 导致出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度上升, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率较低, AnAOB 没有足够的底物进行厌氧氨氧化作用, 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度亦下降。但经过几个周期的适应性调节后, 反应器的脱氮效果得以恢复。

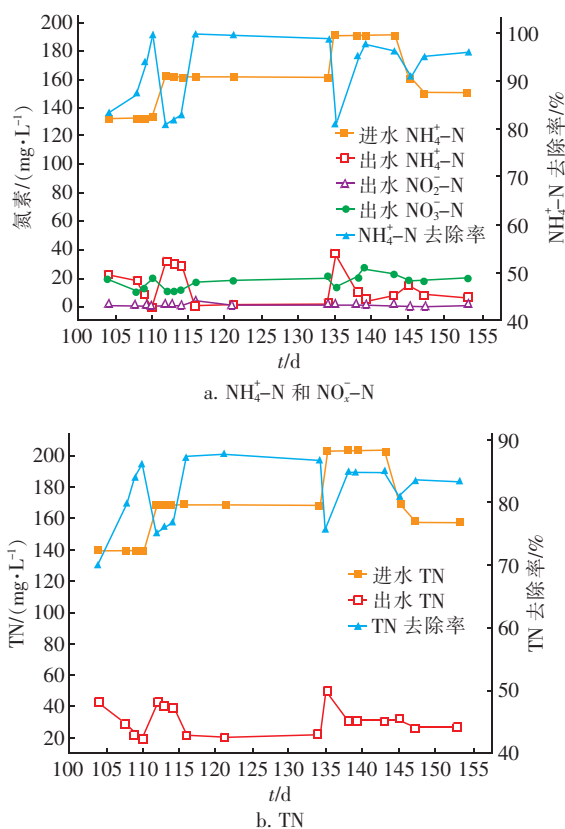


图6 CANON 工艺在优化运行阶段的氮素浓度变化

Fig.6 Change of nitrogen concentration during optimizing operation phase in CANON process

3 结论

① 试验针对老龄垃圾渗滤液进行 CANON 工艺的启动研究。在污泥浓度为 $(3100 \pm 100) \text{ mg/L}$ 的条件下, 采用间歇曝气-持续搅拌的运行方式, 经过 58 d 成功启动反应器, 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度分别为 146 、 153 mg/L 的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别高达 96.80% 和 85.88% 。

② 根据反应过程中 pH 值的变化调控好氧和厌氧时间, 以此优化 CANON 工艺, 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度分别为 190 、 203 mg/L 的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别高达 98.18% 、 86.45% 。该运行方式可以提高系统总氮去除量并减少能耗。

③ 反应过程中 pH 值变化幅度过大会影响反应器的运行稳定性, 导致 NOB 生长, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率降低, 脱氮效果变差。本研究中 CANON 工艺严格控制 pH 值在 $8.1 \sim 8.3$ 之间, 工艺运行稳定。

④ 在 CANON 工艺中, AOB 相较于 AnAOB 的抗基质负荷冲击能力较弱, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷的提高, 会抑制 AOB 活性, 造成系统脱氮效果变差, 但根据 pH 值变化调控好氧和厌氧时间的运行方式可有效缓解基质负荷冲击对系统的影响。

参考文献:

- [1] Bagchi S, Biswas R, Nandy T. Autotrophic ammonia removal processes: Ecology to technology [J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2012, 42(13): 1353-1418.
- [2] 王子凌, 信欣, 王铎, 等. CANON 工艺处理猪场沼液的启动及微生物种群结构分析 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3945-3953.
Wang Ziling, Xin Xin, Wang Luo, et al. Start-up and microbial communities analysis of CANON process for the treatment of anaerobic digester liquor of swine wastewater (ADLSW) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 38(10): 3945-3953 (in Chinese).
- [3] 张倩, 王淑莹, 苗圆圆, 等. 间歇低氧曝气下 CANON 工艺处理生活污水的启动 [J]. 化工学报, 2017, 68(1): 289-296.
Zhang Qian, Wang Shuying, Miao Yuanyuan, et al. Start-up of CANON process on domestic wastewater using intermittent aeration with low DO [J]. CIESC Journal, 2017, 68(1): 289-296 (in Chinese).
- [4] Dacerey A, Su S H, Huang Y T, et al. Partial nitrification and anammox process: A method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment [J]. Water Res, 2013, 47(9): 2929-2937.
- [5] Cho S, Fujii N, Lee T, et al. Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(2): 652-659.
- [6] Figueroa M, Vazquez-Padin J R, Mosquera-Corral A, et al. Is the CANON reactor an alternative for nitrogen removal from pre-treated swine slurry? [J]. Biochem Eng J, 2012, 65(6): 23-29.
- [7] 张方斋, 王淑莹, 彭永臻, 等. CANON 工艺处理实际晚期垃圾渗滤液的启动实验 [J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3910-3918.

- Zhang Fangzhai, Wang Shuying, Peng Yongzhen, *et al.* Start-up and characterization of nitrogen and COD removal from mature landfill leachate via CANON process[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3910 – 3918 (in Chinese).
- [8] Tao W, He Y, Wang Z, *et al.* Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater[J]. Ecol Eng, 2012, 47(5): 76 – 82.
- [9] 刘涛, 李冬, 曾辉平, 等. 氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 773 – 780.
- Liu Tao, Li Dong, Zeng Huiping, *et al.* Assessment of the effect of influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration on the abundance and community structure of functional bacteria in CANON process[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 773 – 780 (in Chinese).
- [10] Slikers A O, Derwort N, Gomez J L, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Res, 2002, 36(10): 2475 – 2482.
- [11] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al.* Nitrogen removal from opto-electronic wastewater using the simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) process in sequencing batch reactor[J]. Bioresour Technol, 2012, 113: 225 – 231.
- [12] Chung J, Shim H, Park S J, *et al.* Optimization of free ammonia concentration for nitrite accumulation in shortcut biological nitrogen removal process [J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2006, 28(4): 275 – 282.
- [13] 唐光临, 孙国新, 徐楚韶. 亚硝化反硝化生物脱氮[J]. 工业水处理, 2001, 21(11): 11 – 13.
- Tang Guanglin, Sun Guoxin, Xu Chushao. Biological denitrification via nitrite [J]. Industrial Water Treatment, 2001, 21(11): 11 – 13 (in Chinese).
- [14] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. J Water Pollut Control Fed, 1976, 48(5): 835 – 852.
- [15] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 691 – 695.
- Yang Yang, Zuo Jian'e, Shen Ping, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 691 – 695 (in Chinese).
- [16] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 控制 pH 实现短程硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1664 – 1666.
- Gao Dawen, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Nitrogen removal from wastewater via shortcut nitrification-denitrification achieved by controlling pH[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1664 – 1666 (in Chinese).
- [17] 郭劲松, 杨国红, 方芳, 等. 温度和 pH 值对 CANON 工艺的影响试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 22 – 26.
- Guo Jinsong, Yang Guohong, Fang Fang, *et al.* Study of the influence of temperature and pH value on CANON process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 22 – 26 (in Chinese).



作者简介:耿忠轩(1993 –),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,研究方向为自养生物脱氮技术。

E-mail: 18819480584@163.com

收稿日期: 2019 – 05 – 14