

不同基质浓度下 SBR 进水方式对厌氧氨氧化的影响

曹天昊,王淑莹*,苗 蕾,李忠明,彭永臻 (北京工业大学,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

摘要:采用厌氧 SBR 反应器,分别以配水培养和以实际晚期垃圾渗滤液培养的厌氧氨氧化菌为研究对象,考察了不同基质浓度下,SBR 改进式连续进水方式与一次性进水方式对厌氧氨氧化工艺运行性能的影响.结果表明,当处理人工配水时,在中低进水浓度下($\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 400 \text{ mg/L}$),与改进式连续进水方式相比,宜采用一次性进水方式运行;在高进水浓度下($\text{NO}_2^- - \text{N} \geq 400 \text{ mg/L}$)改进式连续进水方式比一次性进水方式优势明显,特别是在 5h 改进式连续进水方式下,平均比污泥脱氮速率增加至 $39.11 \text{ mgN}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,相比一次进水方式效率提高 40%.当处理进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为 $(300 \pm 20) \text{ mg/L}$ 的实际晚期垃圾渗滤液时,5h 改进式连续进水的 SBR 比污泥脱氮速率最高.由于晚期渗滤液较配水成分复杂,使得厌氧氨氧化菌面临有机物和有害物质的影响,其厌氧氨氧化的反应速率低于同等基质浓度配水条件下的厌氧氨氧化反应速率.

关键词: 厌氧氨氧化; 进水方式; SBR; 基质浓度; 垃圾渗滤液

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2015)08-2334-08

Influence of feeding modes on anammox under different influent substrate concentration in SBR. CAO Tian-hao, WANG Shu-ying*, Miao Lei, Li Zhong-ming, PENG Yong-zhen (Key laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2015,35(8): 2334~2341

Abstract: Different feeding modes with different influent substrate concentration were investigated using anaerobic SBR, with the conditions of synthetic wastewater and real mature landfill leachate, respectively. The results showed that when treating low concentration of synthetic wastewater ($\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 400 \text{ mg/L}$), the feeding mode of 5min was a better choice for Anammox. When treating high concentration of synthetic wastewater ($\text{NO}_2^- - \text{N} \geq 400 \text{ mg/L}$), the continuous feeding mode of 5h was the best choice for Anammox. Under the continuous feeding mode of 5h, the average nitrogen removal rate (ANRR) increased to $39.11 \text{ mgN}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ and enhanced by 40% comparing with the feeding mode of 5min. When treating the real mature landfill leachate with nitrite concentration of $300 \pm 20 \text{ mg/L}$, ANRR of 5h was maximum comparing with other feeding modes. Because of the mature landfill leachate contained a little of biodegradable organics and lots of hazardous substances, the ANRR of treating mature landfill leachate was lower than that of treating synthetic wastewater.

Key words: anammox; feeding modes; SBR; substrate concentration; landfill leachate

随着水体富营养化的日益严重,脱氮已经成为污水处理的重点.目前最常用的脱氮处理方法是传统的硝化反硝化工艺^[1-2].传统的硝化反硝化工艺在反硝化阶段需要外加碳源,否则难以实现总氮去除达标^[3-5],因此处理成本较高.采用前置硝化反硝化工艺虽然能减少外碳源的添加量,但仍需外加碳源且脱氮效果不理想.此外,对于处理碳氮比较低的高氨氮废水如垃圾渗滤液等,传统的硝化反硝化工艺并不适用^[6].

近年来,厌氧氨氧化工艺由于其成本效益高、无需外加碳源等优点^[7],已经逐渐应用于处理

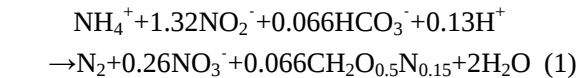
高氨氮废水^[8-9].厌氧氨氧化反应是在厌氧条件下,以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为电子供体,厌氧氨氧化菌将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化为氮气和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[10].反应见式(1)^[11].然而,厌氧氨氧化菌会受到许多因素的影响使其活性降低,如温度、溶解氧、pH 值、基质浓度、游离氨、亚硝酸盐抑制作用、盐度、磷酸盐、 Fe^{2+} 以及有机物等

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51478013); 科研基地建设—科技创新平台

* 责任作者, 教授, wsy@bjut.edu.cn

等^[12-19]。



目前大多采用连续流反应器(如 UASB)来研究厌氧氨氧化反应^[8,13-14]。但连续流反应器容易造成厌氧氨氧化菌的流失,而 SBR 反应器具有构造简单、操作灵活、抗冲击负荷等优势^[20]。由于其间歇排水的运行方式,更对污泥有良好的截留能力,可以避免厌氧氨氧化菌的流失。然而较高的进水 NO_2^- -N 浓度会对厌氧氨氧化菌产生抑制作用,有研究表明,当反应器内 NO_2^- -N 的浓度达到 100mg/L 时,即会对厌氧氨氧化菌产生抑制作用^[21],也有研究表明当厌氧氨氧化菌形成颗粒污泥后,半抑制常数能达到 400mg/L^[22]。Carvajal-Arroyo 等^[23]认为当 NO_2^- -N 浓度超过 210mg/L 时就会全部抑制厌氧氨氧化菌的活性。由此可见,当进水 NO_2^- -N 浓度较高时,一次性进水方式会抑制厌氧氨氧化反应,从而降低厌氧氨氧化的反应速率。如何解决高浓度 NO_2^- -N 对厌氧氨氧化的抑制,从而提高反应负荷是研究的难点。

本试验采用厌氧 SBR 反应器,分别以配水培养和处理实际晚期垃圾渗滤液的厌氧氨氧化菌为研究对象,考察了不同基质浓度下进水方式对厌氧氨氧化的影响。

1 材料与方法

1.1 污泥和进水水质特征

以处理配水效果良好的厌氧氨氧化菌研究人工模拟废水,形状为絮体污泥。污泥浓度约为 (3000±100)mg/L,SVI 值为 120mL/g。试验用水为模拟废水^[24],其组成为: KH_2PO_4 10mg/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5.6mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 300mg/L, KHCO_3 1250mg/L。 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 分别用 NH_4Cl 和 NaNO_2 提供,浓度按需配制。微量元素浓缩液的组成为(g/L): EDTA 5000mg/L, FeSO_4 5000mg/L。微量元素浓缩液的组成为: EDTA 1000mg/L, H_3BO_4 14mg/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 990mg/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 250mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 430mg/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 190mg/L, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 210mg/L, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 220mg/L。进水 pH 值控制在

7.3±0.2。

以处理实际晚期垃圾渗滤液良好的厌氧氨氧化菌研究实际晚期垃圾渗滤液,形状为絮体污泥加部分红色颗粒污泥。污泥浓度为(3000±100)mg/L。所用的晚期垃圾渗滤液取自北京六里屯垃圾填埋场。晚期渗滤液的综合水质特征见表 1。

表 1 晚期渗滤液水质特征

Table 1 Characteristics of mature landfill leachate

组成	最大值	最小值	平均值
COD(mg/L)	2400	1900	2200
BOD ₅ (mg/L)	150	50	100
NH_4^+ -N(mg/L)	2300	1800	2000
NO_3^- -N(mg/L)	0.8	0.11	0.5
NO_2^- -N(mg/L)	1.1	0.1	0.4
碱度(mg/L)	9320	6210	7200
pH 值	8.2	7.8	8.0

1.2 试验设备

厌氧 SBR 由有机玻璃制成,有效容积为 10L。内设搅拌装置、温控装置和进水蠕动泵,搅拌速率为 60r/min,温度控制在 30 ±1,排水比控制在 50%,其 HRT 为 20h。进水分别采用一次性进水和改进式连续进水两种方式,其中改进式连续进水的时间根据浓度的不同分别设定。采用一次性进水方式时,SBR 按照反应期间一次性进水-搅拌-沉淀-排水-闲置的操作模式运行。采用改进式连续进水方式时,SBR 按照反应期间连续进水(同时搅拌)-搅拌-沉淀-排水-闲置的操作模式运行。此外,为避免光照对厌氧氨氧化菌的抑制作用,SBR 外覆黑色保温材料,可以起到保温和避光的作用。

1.3 检测分析方法

水样分析项目中的 COD 浓度采用国家标准方法测定^[26];氨氮质量浓度采用纳氏试剂分光光度法;硝酸盐质量浓度采用麝香草酚分光光度法;亚硝酸盐质量浓度采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;pH 值及温度采用德国 WTW 公司生产的 pH 计。

1.4 计算公式

反应器理论的比污泥脱氮速率(NRR)可以

用方程(2)计算:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} + \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{inf}}}{t \cdot \text{MLVSS}} - \frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}} + \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{eff}}}{t \cdot \text{MLVSS}} \quad (2)$$

其中: NRR 为比污泥脱氮速率,mgN/(gVSS · h); NH₄⁺-N_{inf} 为进水 NH₄⁺-N 浓度,mg/L; NO₂⁻-N_{inf} 为进水 NO₂⁻-N 浓度,mg/L; NH₄⁺-N_{eff} 为出水 NH₄⁺-N 浓度,mg/L; NO₂⁻-N_{eff} 为出水 NO₂⁻-N 浓度,mg/L; MLVSS: 混合液挥发性悬浮固体浓度,g/L.

反应器理论的氮负荷(NLR)可以用方程(3)计算:

$$\text{MLR} = \frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} + \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{inf}} \times 10^6}{V \cdot t} \quad (3)$$

其中: NLR:氮负荷,kg/(m³·d); NH₄⁺-N_{inf} 为进水 NH₄⁺-N 浓度,mg/L; NO₂⁻-N_{inf} 为进水 NO₂⁻-N 浓度,mg/L.

1.5 试验方案

表 2 人工配水条件不同基质浓度下进水方式对厌氧氨氧化反应影响的试验方案

Table 2 Experimental procedure under the condition of synthetic wastewater

序号	NH ₄ ⁺ 浓度 (mg/L)	NO ₂ ⁻ 浓度 (mg/L)	进水方式	进水时间 (min)
1	152	200	一次性进水	5
	152	200	改进式连续进水	180
	152	200	改进式连续进水	90
2	304	400	一次性进水	5
	304	400	改进式连续进水	360
	304	400	改进式连续进水	420
3	456	600	一次性进水	5
	456	600	改进式连续进水	240
	456	600	改进式连续进水	300
	456	600	改进式连续进水	360
	456	600	改进式连续进水	420

首先采用人工配水,在进水 NO₂⁻-N 浓度为 200mg/L、400mg/L 以及 600mg/L 条件下,分别采用一次性进水方式(进水时间为 5min)和改进式连续进水方式(进水时间见表 2),通过对比反应时

化反应的影响.

随后,针对实际晚期垃圾渗滤液,分别采用一次性进水(5min)和改进式连续进水(进水时间分别为 4h、5h 和 6h)方式,通过对比反应时长来探讨进水方式对厌氧氨氧化反应的影响.处理实际晚期垃圾渗滤液的厌氧氨氧化系统已经稳定运行了 200d,进水 NO₂⁻-N 浓度维持在 300mg/L 左右.因此,在本试验中,进水浓度依旧维持在 300mg/L 左右.

2 结果与讨论

2.1 配水条件下不同进水方式对厌氧氨氧化的影响

2.1.1 中低基质浓度条件下不同进水方式对厌氧氨氧化的影响 为了探讨中低基质浓度条件下,进水方式对厌氧氨氧化的影响,从而确定其最优进水方式,采用表 2 中序号 1 的实验方案.实验结果如图 1(a)所示.在一次性进水方式下,厌氧氨氧化反应时间最短,仅需 180min.1.5h 连续进水和 3h 连续进水方式下,厌氧氨氧化反应时间均为 210min,这是因为进水浓度尚未对厌氧氨氧化污泥产生抑制作用,其反应时间受进水基质浓度影响.其中时间,一次性进水氮负荷(NLR)为 1.408kg/(m³·d),平均比污泥脱氮速率(NRR)为 39.11mgN/(gVSS·h);1.5h 和 3h 改进式连续进水的 NLR 均为 1.206kg/(m³·d),平均 NRR 均为 23.47mgN/(gVSS·h).由于一次性进水混合后的 NO₂⁻-N 浓度仅为 100mg/L,且试验所取的厌氧氨氧化污泥已适应 200mg/L 的 NO₂⁻-N 浓度,故此时 NO₂⁻-N 的浓度对厌氧氨氧化菌产生抑制作用较小.而一次性进水方式可以在反应器里产生较大的反应推动力,加快了反应速率,从而使得反应在最短的时间里结束.因此,在基质浓度为 200mg/L 时,选用一次性进水方式可以使反应的效率最高.

之后采用“表 2 中序号 2 的实验方案.实验结果如图 1(b)所示.当采用一次性进水方式时,厌氧氨氧化的反应时间最短,为 420min;采用 6h 和 7h 改进式连续进水方式时,厌氧氨氧化的反应时间均为 480min.其中,一次性进水方式的 NLR 为 1.2kg/(m³·d),平均 NRR 为 33.52mgN/(gVSS·h);6h

和 7h 改进式连续进水的 NLR 均为 1.05kg/(m³·d), 平均 NRR 均为 29.33mgN/(gVSS·h).

这表明,在一次性进水的条件下,尽管进水混合后 NO₂⁻-N 的浓度为 200mg/L,但仍不足以完全抑制厌氧氨氧化菌的活性,同时相对于 6h、7h 改进式连续进水,一次性进水的反应推动力大,故反应时间最短.但反应时间仅缩短 1h,由此可见,随着进水 NO₂⁻-N 浓度的逐步提高,NO₂⁻-N 的抑制作用逐渐增强,改进式连续进水方式逐渐体现出优势.

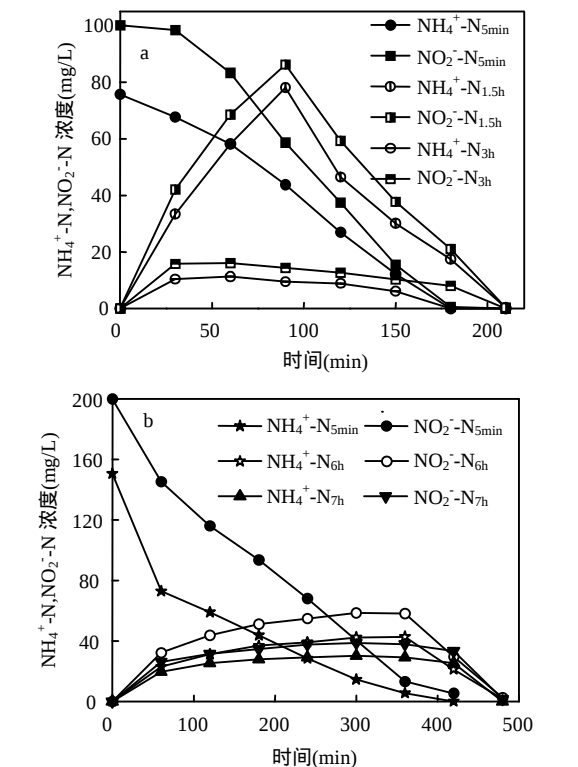


图 1 中低基质浓度下不同进水方式厌氧氨氧化反应效果对比

Fig.1 Performance of anammox under the low and medium substrate concentrations

2.1.2 高基质浓度条件下不同进水方式对厌氧氨氧化的影响 由中低基质浓度试验可知,随着进水 NO₂⁻-N 浓度的逐渐提高,连续进水已经逐渐体现出其优势.为了提高反应器的处理负荷,探讨高基质浓度下进水方式对厌氧氨氧化反应的影响,试验采取“材料与方法”部分的

表 2 中序号 3 的实验方案.实验结果如图 2 和图 3 所示.

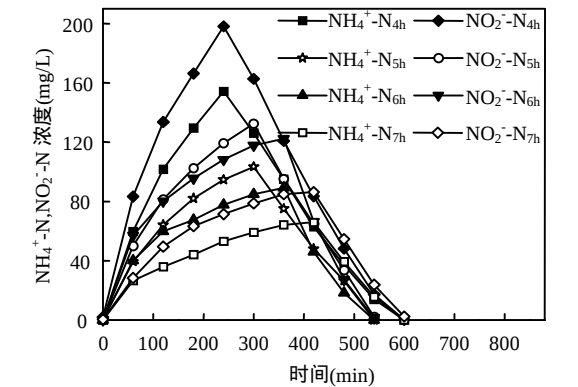


图 2 高基质浓度下不同改进式连续进水时间厌氧氨氧化反应效果的对比

Fig.2 Performance of anammox under the high substrate concentrations

从图可知,改进式连续进水的时间为 4h 和 7h 时,厌氧氨氧化反应时长均为 600min,改进式连续进水的时间为 5h 和 6h 时,厌氧氨氧化的反应时长仅为 540min.在 4h 改进式连续进水方式时,由于进水混合后的 NO₂⁻-N 浓度较高,在第 240min 时达到了最高值 198mg/L,对厌氧氨氧化菌产生了一定的抑制作用,使得厌氧氨氧化反应的时间较长.而 7h 改进式连续进水方式时,由于进水混合后的 NO₂⁻-N 浓度相对于 4h、5h、6h 改进式连续进水时的较低,混合后的 NO₂⁻-N 浓度仅为 86mg/L,不足以对厌氧氨氧化菌产生抑制作用,并且较低的 NO₂⁻-N 浓度使得反应推动力减小,从而造成了厌氧氨氧化反应时间较长.5h 和 6h 改进式连续进水的反应时长没有很大的差别,可能是因为反应推动力和 NO₂⁻-N 的抑制作用的综合影响.当采用 5h 和 6h 改进式连续进水时,进水混合后的 NO₂⁻-N 浓度分别在第 300min 和第 360min 达到了最高的 132mg/L 和 122mg/L.对比发现,6h 改进式连续进水对厌氧氨氧化菌的抑制作用较小,然而反应推动力同样较小.考虑到节省能耗,5h 为最优的连续进水时间.

从图 3 可知,一次性进水方式下厌氧氨氧化反应所需反应时间最长,为 900min,而 5h 改进式

连续进水方式下仅需要 540min.其中,一次性进水方式和 5h 改进式连续进水的 NLR 分别为 0.84kg/(m³·d)和 1.41kg/(m³·d),平均 NRR 分别为 23.47mgN/(gVSS·h)和 39.11mgN/(gVSS·h).这是由于进水 NO₂⁻-N 的浓度较高,一次性进水使得混合后的 NO₂⁻-N 浓度达到了 288mg/L,对厌氧氨氧化菌产生了较强的抑制作用,厌氧氨氧化菌的活性受到很大抑制,抑制作用大于推动力作用,从而大大降低了反应速率.由此可知,当进水基质浓度较高时,综合考虑 NO₂⁻-N 对厌氧氨氧化菌的抑制作用以及反应推动力,改进式连续进水具有优势.

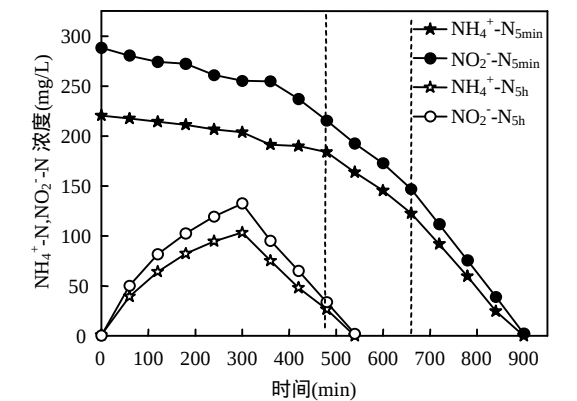


图3 高基质浓度下一次性进水和5h连续进水厌氧氨氧化反应效果的对比

Fig.3 Comparison of anammox performance between feeding in 5min and continuous feeding in 5h under the high substrate concentration

此外,由图3可见,当采用一次性进水方式时,前 480min 的平均 NRR 比较低,仅为 4.71mgN/(gVSS·h),此时 NO₂⁻-N 对厌氧氨氧化菌的抑制作用较大.从第 480min 到第 660min,平均 NRR 大幅增加至 14.11mgN/(gVSS·h),且第 480min 时反应器内混合的 NO₂⁻-N 浓度为 215mg/L,表明随着厌氧氨氧化菌的抑制作用逐渐减小,平均 NRR 随之增大.从第 660min 直至反应结束的第 900min 内,平均 NRR 仍在增加,达到了 26.25mgN/(gVSS·h),且第 660min 时反应器内混合的 NO₂⁻-N 浓度为 147mg/L,表明 NO₂⁻-N 浓度是影响厌氧氨氧化菌活性的主导因素.由此可知,当反应器内混合

NO₂⁻-N 浓度超过 200mg/L 时, NO₂⁻-N 对厌氧氨氧化菌的抑制作用较大,使得反应器内的平均 NRR 较低;随着 NO₂⁻-N 浓度的降低,抑制作用逐渐减小,当反应器混合 NO₂⁻-N 浓度降低到 150mg/L 左右时,其对应的平均 NRR 最高,能够达到 26.25mgN/(gVSS·h).

2.2 处理晚期渗滤液时不同进水方式对厌氧氨氧化的影响

2.2.1 不同连续进水时间对厌氧氨氧化的影响

由于 SBR 一直采用的是 5h 改进式连续进水方式运行,因此,首先对这种进水方式进行了全周期的试验研究.其对厌氧氨氧化反应的影响如图 4 所示.反应过程中,SBR 反应器中的 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 最高浓度为进水后的 66,81mg/L.此时, NO₂⁻-N 浓度在整个周期中达到最高值(81mg/L),低于文献报道的 100mg/L^[21],因此并没有对厌氧氨氧化菌产生明显的抑制作用.进水期间,由于 SBR 内 NO₂⁻-N 浓度尚不足以对厌氧氨氧化菌产生抑制,因此伴随着连续进水,SBR 内也同步进行着厌氧氨氧化反应.完成进水后,NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度开始逐渐降低,直至第 19h 时反应结束.其 NLR 为 0.28kg/(m³·d),平均 NRR 为 8.93mgN/(gVSS·h).

5h 改进式连续进水时,19h 后反应结束.随后将 SBR 的进水时间改为 6h,并进行全周期监测.其对厌氧氨氧化反应的影响如图 4 所示.从图 4 看出,随着反应器的不断进水,SBR 内的 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度逐渐增加,直至第 6h 进水完成后, NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的浓度分别达到最大值,为 68mg/L 和 76mg/L. SBR 中最高 NO₂⁻-N 浓度尚不足以对厌氧氨氧化菌产生明显的抑制作用,进完水后 SBR 中 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 出现下降,直至第 21h 反应结束.

采用 6h 改进式连续进水方式时,SBR 的反应周期延长至 21h, NLR 为 0.25kg/(m³·d),平均 NRR 为 7.76mgN/(gVSS·h),均低于 5h 连续进水方式.其反应时间比 5h 改进式连续进水延长了 2h.由于在此浓度下厌氧氨氧化菌不会受到明显抑制,因此反应推动力决定了反应时间.6h 改进式连续进水方式下,其反应推动力较小,平均脱氮速率较

低,使得反应时间较长.

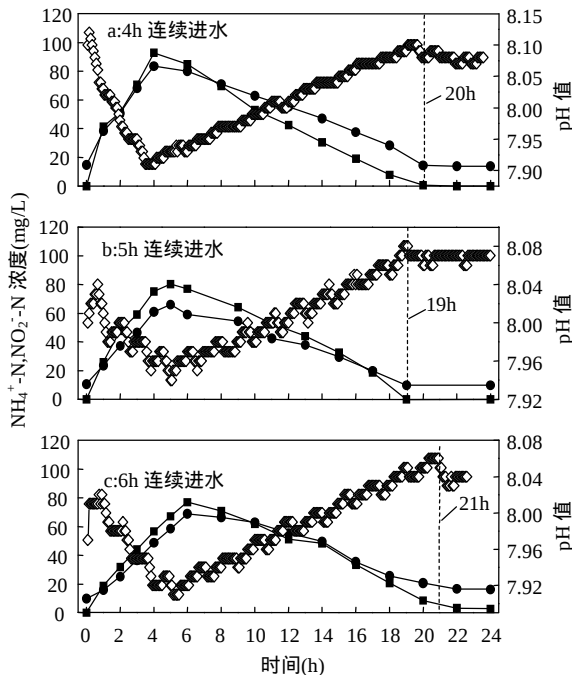


图 4 不同连续进水时间对厌氧氨氧化反应效果及 pH 值变化

Fig.4 pH variations of Anammox under different continuous feeding modes

●- NH_4^+-N ■- NO_2^--N ◇-pH 值

保持 SBR 的进水浓度不变,将进水时间缩短到 4h,对 SBR 进行全周期监测.其对厌氧氨氧化反应的影响如图 4 所示.由图 4 可知,进水后 SBR 内 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的浓度分别达到最高的 83 mg/L 和 92 mg/L ,反应时间为 20h,NLR 为 0.26 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,平均 NRR 为 8.08 $\text{mgN}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$,均低于 5h 改进式连续进水方式.相比于 5h 改进式连续进水方式,尽管 4h 改进式连续进水方式下的反应推动力较大,但随着反应器内 NO_2^--N 浓度的增加,厌氧氨氧化菌开始逐渐受到抑制,影响了脱氮速率.因此,在反应推动力和抑制作用的综合影响下,其反应时间相比 5h 时,延长了 1 个小时.然而相比于 6h 时,4h 下的反应时间又缩短了 1 小时,这表明,尽管厌氧氨氧化菌在反应器内基质浓度较高时开始受到抑制作用,但相对于 6h 改进式连续进水,反应推动力仍占主导作用.

通过对比 4h、5h 以及 6h 改进式连续进水方式下的反应时间,可以看出 5h 改进式连续进水方式下的反应时间最短,脱氮速率最高,这表明在 5h 连续进水方式下,厌氧氨氧化反应推动力和抑制作用达到了最均衡状态,从而使得反应时间最短.

2.2.2 一次性进水方式对厌氧氨氧化的影响

采用连续进水方式是为了最大程度的避免一次性进水后,反应器内过高浓度的 NO_2^--N 对厌氧氨氧化菌产生的抑制作用.通过以上的试验表明,5h 改进式连续进水方式对厌氧氨氧化反应更有利.为了探究一次性进水方式下,厌氧氨氧化反应的运行效果,试验继续保持进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 浓度不变,采取一次性进水方式进水(即 5min 内进完水),对 SBR 进行全周期监测.由图 5 可知,由于采用一次性进水方式进水,进完水后 SBR 内 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的浓度达到最大,分别为 87 mg/L 和 103 mg/L .而 SBR 内的 pH 值也出现较大幅度的下降,从最初的 8.03 迅速下降到 7.75 左右,进完水后 pH 值仍出现小幅度下降,随后才缓慢上升.pH 值的较大幅度变化,使得厌氧氨氧化菌的活性受到了一定的抑制,这对于厌氧氨氧化反应较为不利,同时 SBR 内的 NO_2^--N 已经对厌氧氨氧化产生抑制作用.反应进行到第 20h 时,厌氧氨氧化反应结束.一次性进水方式下,NLR 为 0.26 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,平均 NRR 为 8.35 $\text{mgN}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$,同样低于 5h 改进式连续进水方式.

相比于 5h 改进式连续进水,一次性进水方式下的反应时间多了 1h.这表明,在进水基质浓度较高时,采用连续进水可以降低 NO_2^--N 对厌氧氨氧化菌产生的抑制作用.同时由于连续进水能够使 SBR 反应器内的 pH 值波动较小,维持在合适的范围,对厌氧氨氧化反应比较有利.同时由反应时间仅多一个小时可以看出,在该基质浓度下,厌氧氨氧化菌尚未受到强烈的抑制作用,反应推动力仍然起着主导作用.因此,在避免厌氧氨氧化菌受到明显抑制的前提下,最大程度地提高反应器内的反应推动力,是提高厌氧氨氧化反应效率的最佳途径.当处理实际晚期垃圾渗滤液时,随着进水基质浓度不断提高,连续进水方式将逐渐体现出优势.

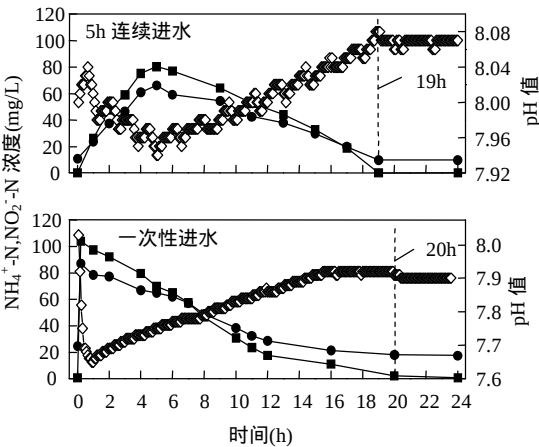


图5 实际晚期渗滤液5h改进式连续进水和一次性进水方式厌氧氨氧化反应效果的对比

Fig.5 Comparison of Anammox performance between feeding in 5min and continuous feeding in 5h when treating mature landfill leachate
● $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ■ $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ◇ pH 值

3 结论

3.1 本试验采用厌氧 SBR 反应器,分别以配水培养和以处理实际晚期垃圾渗滤液的厌氧氨氧化菌为研究对象,考察了不同基质浓度下,不同进水方式对厌氧氨氧化反应的影响.当处理人工配水时,在中低进水浓度下($\text{NO}_2^-\text{-N} \leq 400\text{mg/L}$),一次进水方式由于反应推动力大,同时 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 对厌氧氨氧化菌抑制作用较小,宜采用一次性进水方式运行;在高进水浓度下($\text{NO}_2^-\text{-N} \geq 400\text{mg/L}$),由于较高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 抑制了系统中厌氧氨氧化菌的活性,改进式连续进水方式优势明显,在连续进水 5 小时的条件下,平均比污泥脱氮速率增加至 $39.11\text{mgN}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$,相比一次进水效率提高 40%.

3.2 当处理进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 $300 \pm 20\text{mg/L}$ 的实际晚期垃圾渗滤液时,相比于一次性进水、4h 和 6h 改进式连续进水方式,宜采用 5h 改进式连续进水方式运行,不仅可以减少 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 对厌氧氨氧化菌的抑制作用,同时提高了反应推动力.使得 SBR 中的比污泥脱氮速率最高.

3.3 将配水条件下和处理实际晚期垃圾渗滤液条件下的两组试验进行对比发现,在处理实际晚

期垃圾渗滤液时,厌氧氨氧化的反应速率低于同等基质浓度配水条件下的厌氧氨氧化反应速率.

参考文献 :

[1] Yang S, Yang F. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,195(0):318-323.

[2] Ruiz G, Jeison D, Rubilar O, et al. Nitrification-denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewaters [J]. Bioresource Technology, 2006,97(2):330-335.

[3] Liang Z, Liu J. Landfill leachate treatment with a novel process: Anaerobic ammonium oxidation (Anammox) combined with soil infiltration system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1):202-212.

[4] Wang K, Wang S, Zhu R, et al. Advanced nitrogen removal from landfill leachate without addition of external carbon using a novel system coupling ASBR and modified SBR [J]. Bioresource Technology, 2013,134(0):212-218.

[5] Kulikowska D, Bernat K. Nitrification-denitrification in landfill leachate with glycerine as a carbon source [J]. Bioresource Technology, 2013,142(0):297-303.

[6] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. Bioresource Technology, 2008,99(9):3331-3336.

[7] Ni S Q, Lee P, Fessehaie A, et al. Enrichment and biofilm formation of Anammox bacteria in a non-woven membrane reactor [J]. Bioresource Technology, 2010,101(6):1792-1799.

[8] Liu J, Zuo J, Yang Y, et al. An autotrophic nitrogen removal process: Short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010,22(5):777-783.

[9] Sri Shalini S, Joseph K. Nitrogen management in landfill leachate: Application of SHARON, ANAMMOX and combined SHARON-ANAMMOX process [J]. Waste Management, 2012,32(12):2385-2400.

[10] Strous M, Van Gerven E, Zheng P, et al. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations [J]. Water Research, 1997,31(8):1955-1962.

[11] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998,50:589-596.

[12] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, et al. Impact of free

ammonia on anammox rates (anoxic ammonium oxidation) in a moving bed biofilm reactor [J]. Chemosphere, 2012,88(2): 188-195.

[13] Tang C, Zheng P, Hu B, et al. Influence of substrates on nitrogen removal performance and microbiology of anaerobic ammonium oxidation by operating two UASB reactors fed with different substrate levels [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3):19-26.

[14] 李泽兵,刘常敬,赵白航,等.多基质时厌氧氨氧化菌、异养反硝化污泥活性及抑制特征 [J]. 中国环境科学, 2013,33(4):648-654.

[15] Tao W, He Y, Wang Z, et al. Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater [J]. Ecological Engineering, 2012,47(0):76-82.

[16] Dapena-Mora A,Fernandez I,Campos J L,et al. Evaluation of activity and inhibition effects on Anammox process by batch tests based on the nitrogen gas production [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007,40(4):859-865.

[17] Kimura Y, Isaka K, Kazama F, et al. Effects of nitrite inhibition on anaerobic ammonium oxidation [J]. Appl. Microbiol. Biotechnol, 2010,86(1):359-365.

[18] 金仁村,郑平,胡安辉.盐度对厌氧氨氧化反应器运行性能的影响 [J]. 环境科学学报, 2009,29(1):81-87.

[19] 操沈彬,王淑莹,吴程程,等.有机物对厌氧氨氧化系统的冲击影响 [J]. 中国环境科学, 2013,33(12):2164-2169.

[20] Asadi A, Zinatizadeh A A L, Sumathi S. Simultaneous removal of carbon and nutrients from an industrial estate wastewater in a single up-flow aerobic/anoxic sludge bed (UAASB) bioreactor [J]. Water Research, 2012,46(15):4587-4598.

[21] Strous M, Kuenen J G, Jetten M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999,65(7):3248-3250.

[22] Lotti T, van der Star W R L, Kleerebezem R, et al. The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. Water Research, 2012,46(8):2559-2569.

[23] Carvajal-Arroyo J M, Sun W, Sierra-Alvarez R, et al. Inhibition of anaerobic ammonium oxidizing (anammox) enrichment cultures by substrates, metabolites and common wastewater constituents [J]. Chemosphere, 2013,91(1):22-27.

[24] Sliekers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. Water Res, 2002,36:2475-2482.

[25] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法 [M]. 2 版.北京:中国环境科学出版社, 2002:1-50.

作者简介：曹天昊(1991-),男,天津人,北京工业大学硕士研究生,主要从事污水生物处理理论与应用研究.

《中国环境科学》再次获评“ RCCSE 中国权威学术期刊(A+) ”,位列学科榜首

《中国环境科学》在武汉大学中国科学评价研究中心发布的第四届中国学术期刊评价中获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”.中国学术期刊评价按照各期刊的期刊学术质量和影响力指标综合得分排名,将排序期刊分为 A+、A、A-、B+、B、C 6 个等级,评价的 6201 种中文学术期刊中有 316 种学术期刊获评权威期刊(A+),A+为得分排名前 5%的期刊.此次获得“ RCCSE 中国权威学术期刊(A+) ”称号的环境类期刊有 3 种,《中国环境科学》在环境科学技术与资源科学技术学科内荣登榜首.