

好氧颗粒污泥处理高盐氨氮废水的工艺优化研究

申 昊^{1,2}, 崔理慧^{1,2}, 康鹏飞^{2,3}, 万俊锋^{1,2}

(1. 郑州大学生态与环境学院, 河南郑州 450001; 2. 河南省环境与资源国际联合实验室, 河南郑州 450001; 3. 郑州大学化工学院, 河南郑州 450001)

[摘要] 工业领域产生的高盐氨氮废水对生物脱氮有较大的抑制作用。采用好氧颗粒污泥技术可有效处理此类废水。但常见的序批式反应器大都为一次进水、单段曝气工艺, 运行后期碳源和厌氧时长不足, 使得脱氮性能受到限制。通过改变运行工艺, 探讨分段进水、间歇曝气条件下, 好氧颗粒污泥系统对高盐氨氮废水的强化脱氮效果, 评价系统耐盐性能, 以及该工艺对污泥生物量和颗粒稳定性的影响, 同时对短程硝化现象进行机理解释。结果表明, 当进水盐度为 1%、氨氮质量浓度分别为 100、200 mg/L 时, 分段进水、间歇曝气工艺对总氮的去除率分别为 (82.51±5.66)%、(76.25±2.42)%, 短程硝化率分别达到 (89.62±11.26)%、(92.40±3.88)%。周期实验结果表明, 补充碳源、增设厌氧段及短程硝化反应发生是总氮去除率提升的重要原因。在整个实验过程中, 系统保持较高的生物量和良好的颗粒沉降性能。间歇曝气及分段进水条件下饥饿-丰盛期的设定促进了污泥颗粒化, 颗粒外观更加饱满圆润, 平均密度、沉速和粒径均增大, 有利于微生物应对盐度胁迫, 从而提升脱氮性能。硝化反应动力学实验表明, 间歇曝气条件下曝气时长的设置可能是系统出现短程硝化现象的主要原因。

[关键词] 好氧颗粒污泥; 高盐氨氮废水; 间歇曝气; 短程硝化

[中图分类号] X703; TU992.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0087-08

Optimization of aerobic granular sludge treatment of high salinity ammonia nitrogen wastewater

SHEN Hao^{1,2}, CUI Lihui^{1,2}, KANG Pengfei^{2,3}, WAN Junfeng^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment of Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Environment and Resources, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Chemical Engineering Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: High salinity ammonia nitrogen wastewater generated in industry has a greater inhibitory effect on biological denitrification. Aerobic granular sludge technology can be used to effectively treat the wastewater. However, most of SBR are one-feeding and single-aeration processes, which have insufficient carbon source and anaerobic time in the subsequent operation, making nitrogen removal performance limited. The enhanced denitrification effect of aerobic granular sludge system for high salinity ammonia nitrogen wastewater was investigated by varying operating process with step-feeding and intermittent aeration conditions. The salinity tolerance performance of the system and effect of the process on sludge biomass and particle stability were evaluated, along with a mechanistic explanation of partial nitrification. The results showed that when influent salinity was 1% and mass concentration of ammonia nitrogen was 100 mg/L and 200 mg/L, the removal rates of total nitrogen by step-feeding and intermittent aeration processes were (82.51±5.66)% and (76.25±2.42)%, respectively, and the partial nitrification rates reached (89.62±11.26)% and (92.40±3.88)%, respectively. The results of cycle experiments showed that the supplemental carbon source, additional anaerobic process and occurrence of partial nitrification were important reasons for the increase of total nitrogen removal rate. Throughout the experiment, the system maintained high biomass and good particle settling performance. The setting of amine feast period under step-feeding and intermittent aeration conditions

[基金项目] 国家自然科学基金项目(21107100); 河南省科技攻关项目(212102110030)

promoted the granulation of sludge with plump and rounder particle appearance, and increased average density, settling velocity and particle size, which was beneficial for microorganisms to cope with salinity stress, thus enhancing denitrification performance. Nitrification kinetics experiments showed that the setting of aeration duration under intermittent aeration conditions may be the main reason for the partial nitrification.

Key words: aerobic granular sludge; high salinity ammonium nitrogen wastewater; intermittent aeration; partial nitrification

制革、制药加工、海鲜加工等行业均会产生高盐氨氮废水^[1-3],一些特殊废水如污泥沼液、垃圾渗滤液等^[4-5]也含有大量氮素和盐。废水中的高盐度会形成高渗透压环境,抑制细胞酶活,不利于氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO_B)、反硝化菌等脱氮菌的生长,导致传统生物方法对这类废水的脱氮效果不佳^[6]。

好氧颗粒污泥(AGS)具有较特殊的颗粒结构和更高的胞外聚合物(EPS)分泌量,因此盐度耐受性强、抗冲击负荷能力强、生物量保留率高^[7],同时其分层结构对氧传递的限制有利于同步硝化反硝化(SND)^[8],被认为是一种较有效的高盐氨氮废水处理技术。反硝化碳源是否充足是影响脱氮效果的因素之一。常见的序批式反应器(SBR)大多采用一次进水单段曝气的工艺^[9-11],由于微生物种群间存在竞争,水中的碳源优先被异养菌利用,碳源及厌氧环境的缺失使反硝化菌难以生存,导致系统反硝化反应不足,总氮(TN)去除受到限制。分段进水间歇曝气工艺具有降低冲击负荷,不断补充外加碳源和增设厌氧段的优势,同时其运行条件形成的饥饿-丰盛期会促进污泥颗粒化,使微生物分泌更多EPS抵御盐度的冲击,对高盐氨氮废水有更好的脱氮效果。笔者在传统SBR工艺处理高盐氨氮废水的基础上,通过改变工艺条件促进反硝化菌的生长及污泥颗粒化,强化系统的耐盐和脱氮性能,并进一步提升氨氮浓度进行验证,测定实验期间污泥生物量和

颗粒稳定性,并探究改变工艺后短程硝化现象的机理。

1 材料与方法

1.1 污泥来源

反应器接种污泥为河南新乡某淀粉厂UASB工艺内部成熟的厌氧颗粒污泥,接种后初始MLSS为7.11 g/L、SVI₃₀为26.72 mL/g,经耐盐性驯化后转变为好氧颗粒污泥,MLSS为10.21 g/L、MLVSS为5.36 g/L、MLVSS/MLSS为0.52、SVI₃₀为24.49 mL/g。

1.2 实验装置与运行条件

实验采用柱状SBR反应器,工作体积为1.178 L,内径和有效高度分别为5、60 cm,运行温度为室温,通过蠕动泵从底部进水,底部曝气,曝气量为0.8 L/min,体积交换比为50%。整个反应器由时控装置控制运行,运行4个周期/d,每个周期6 h。在一次进水单段曝气工艺下,整个周期分为进水30 min、厌氧90 min、好氧230 min、沉降5 min、排水5 min;改为分段进水间歇曝气工艺后,整个运行周期被分为3个小周期,每个小周期时长2 h,包括进水10 min、厌氧30 min、好氧80 min(最后1个小周期为好氧70 min、沉降5 min、排水5 min)。

实验采用合成废水,主要组成为乙酸钠、硫酸铵、磷酸二氢钾、氯化钠,为模拟高盐环境向进水添加NaCl维持盐度在1%。不同工艺流程及反应器运行条件见图1、表1。



图1 工艺流程

Fig. 1 Technological process

表 1 反应器运行条件						
Table 1 Operating conditions of SBR						
阶段	时间/d	工艺条件	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ -P/ (mg·L ⁻¹)
I	0~35	一次进水 单段曝气	1 000	100	100	10
II	36~70	分段进水 间歇曝气	1 000	100	100	10
III	71~100	分段进水 间歇曝气	1 000	200	200	10

1.3 分析方法

水样在 5 000 r/min 转速下离心 5 min,随后经 0.45 μm 滤膜过滤后进行测定。COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS、MLVSS 和 SVI₃₀ 均按标准方

法测定^[12],NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 浓度之和为 TN^[13]。DO、pH 由 WTW Multi 3410 仪器在线监测。颗粒污泥形态用数码相机拍照观察。将单个颗粒放入已知密度的蔗糖溶液中测定密度。将单个颗粒放入一定高度的装有进水的量筒中,通过沉降时间计算沉速,多次测定减小误差。粒径采用 Nano Measurer 软件标记获得。

2 结果与讨论

2.1 AGS 系统对污染物的去除性能

2.1.1 反应器长期运行性能

整个实验过程中定期测定反应器内各污染物含量,结果如图 2 所示。

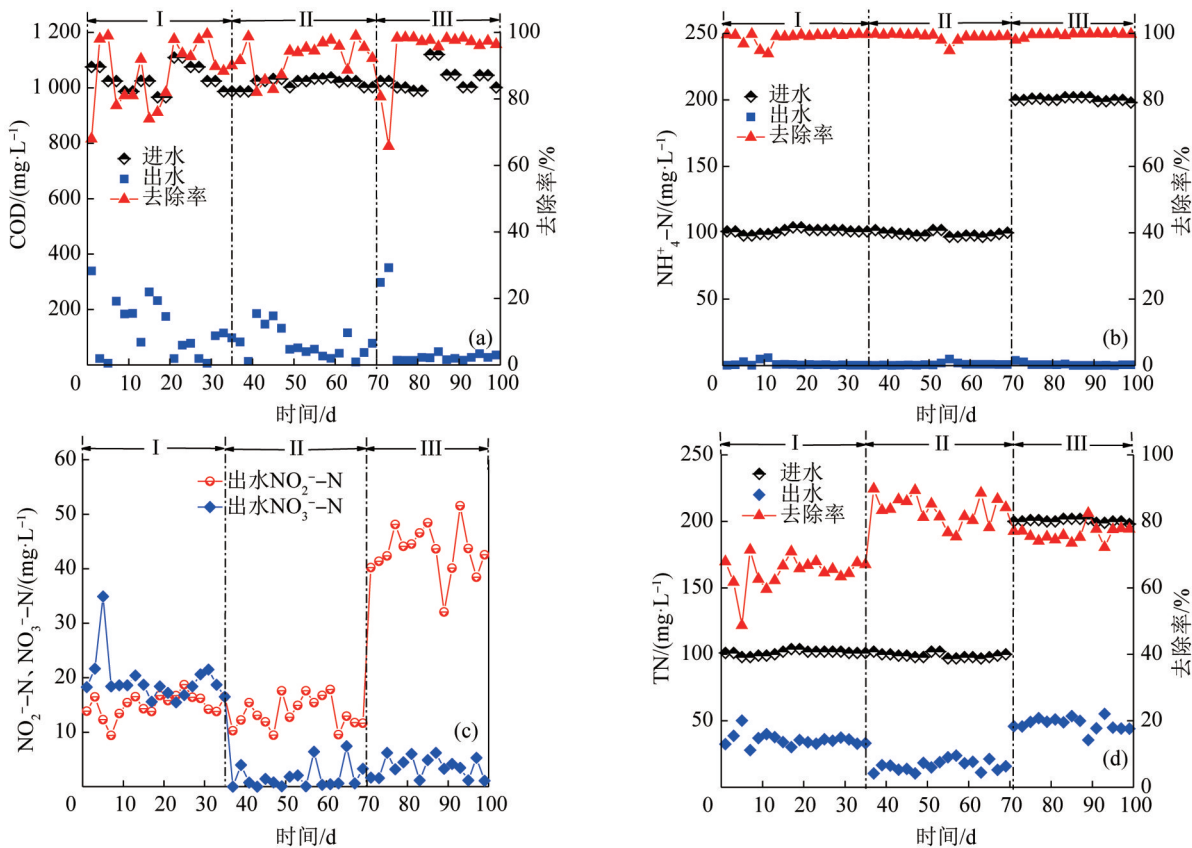


图 2 AGS 系统运行性能
Fig. 2 Operational performance of AGS system

由图 2 可知,阶段 I 系统采用一次进水单段曝气工艺,由于盐度冲击破坏了细胞膜的渗透交换^[14],系统内的微生物活性受到抑制,COD 去除率波动较大,最低时仅为 74%,平均去除率为(87.70±9.70)%;系统内 AOB 经耐盐性驯化后生长良好,NH₄⁺-N 去除率接

近 100%,但由于盐度对反硝化菌有抑制作用^[15],以及一段进水单段曝气条件下异养菌对 COD 的竞争优势,反硝化碳源不足,因此出水 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 较高,分别维持在 15、20 mg/L 左右,TN 平均去除率仅为(64.72±5.03)%。

阶段Ⅱ系统改为分段进水间歇曝气工艺,间歇曝气条件可促进污泥颗粒化并产生更多EPS^[16],从而抵御盐度的冲击,同时分段进水带来的饥饿-丰盛期使微生物更易捕获COD,整个阶段COD去除率升高并保持稳定,平均为 $(92.46 \pm 5.35)\%$ 。此工艺条件下碳源的不断补充以及交替的好氧厌氧环境有利于反硝化菌的生长^[17],同时更好的颗粒形态可有效保护颗粒内部的反硝化菌免受盐度胁迫,TN去除率明显上升,整个周期TN去除率平均为 $(82.51 \pm 5.66)\%$ 。出水 NO_3^- -N降至极低水平,总体维持在2 mg/L以下,系统呈现明显的短程硝化现象,而短程硝化状态下的反硝化过程所需碳源更少,可缓解反硝化碳源的不足,更有利于TN的去除。

阶段Ⅲ,由于进水氨氮提升,反硝化所需碳源量增加,COD平均去除率进一步升至 $(94.23 \pm 9.04)\%$, NH_4^+ -N去除率仍保持近100%,平均出水 NO_2^- -N和 NO_3^- -N分别为 (43.17 ± 4.67) 、 (3.59 ± 1.91) mg/L,整个系统仍呈现明显的短程硝化现象,但此时进水碳氮比由10降为5,碳源的缺失使得TN去除率有所下降,平均去除率降为 $(76.25 \pm 2.42)\%$ 。

2.1.2 周期内污染物浓度的变化

为探究不同工艺下污染物的变化规律,测定各周期内污染物浓度的变化情况,结果见图3。

图3中,在阶段Ⅰ(一次进水单段曝气),30~90 min的厌氧段内AOB利用进水中残留DO进行氨氧化反应,同时反硝化菌利用COD进行明显的反硝化,系统COD、TN迅速下降。进入好氧段后,120~150 min时COD、 NH_4^+ -N和TN迅速下降,系统发生SND过程,这也体现出AGS的优势;150 min后,由于COD降至极低水平碳源缺失,反硝化动力不足,TN无明显下降趋势, NO_2^- -N、 NO_3^- -N开始逐渐累积, NO_2^- -N累积速度大于 NO_3^- -N,220 min左右时两者的浓度差达到峰值,此后 NO_2^- -N开始逐步转化为 NO_3^- -N,至周期末两者浓度基本相同。

在改变工艺条件后的阶段Ⅱ、Ⅲ,各厌氧段因进水碳源得到补充,反硝化进行充分,COD、 NO_2^- -N和TN明显下降,单段进水工艺中因后期碳源不足而导致的反硝化效率低问题得到解决。好氧段COD、 NH_4^+ -N和TN同时下降, NO_3^- -N始终维持在极低水平,说明此时发生同步短程硝化反硝化过程。这是由于该工艺下污泥颗粒化良好,颗粒结构可有效抵

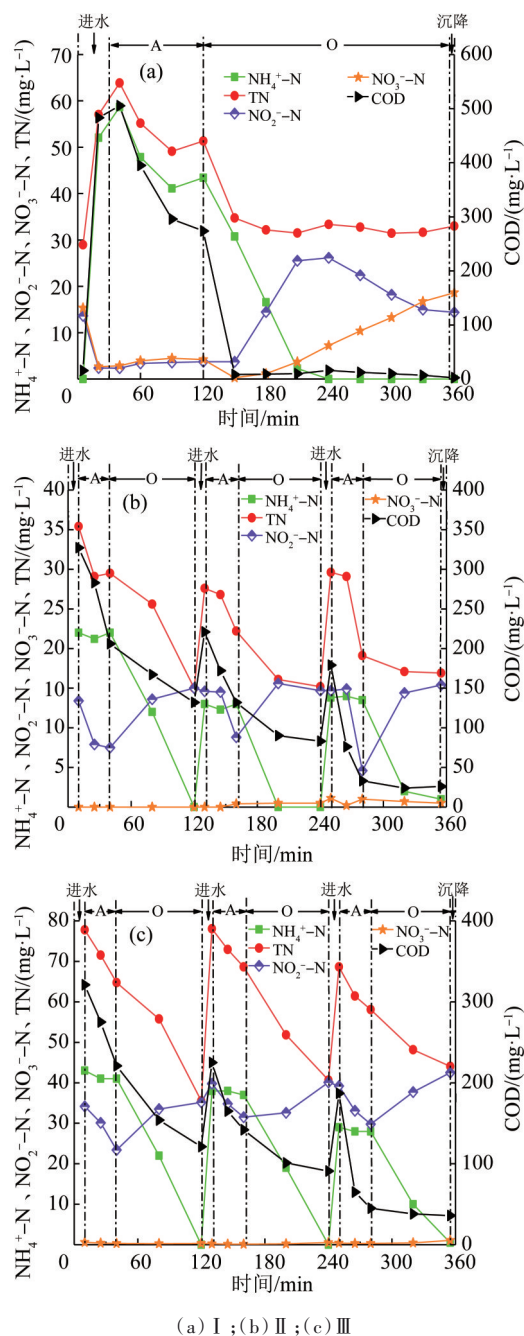


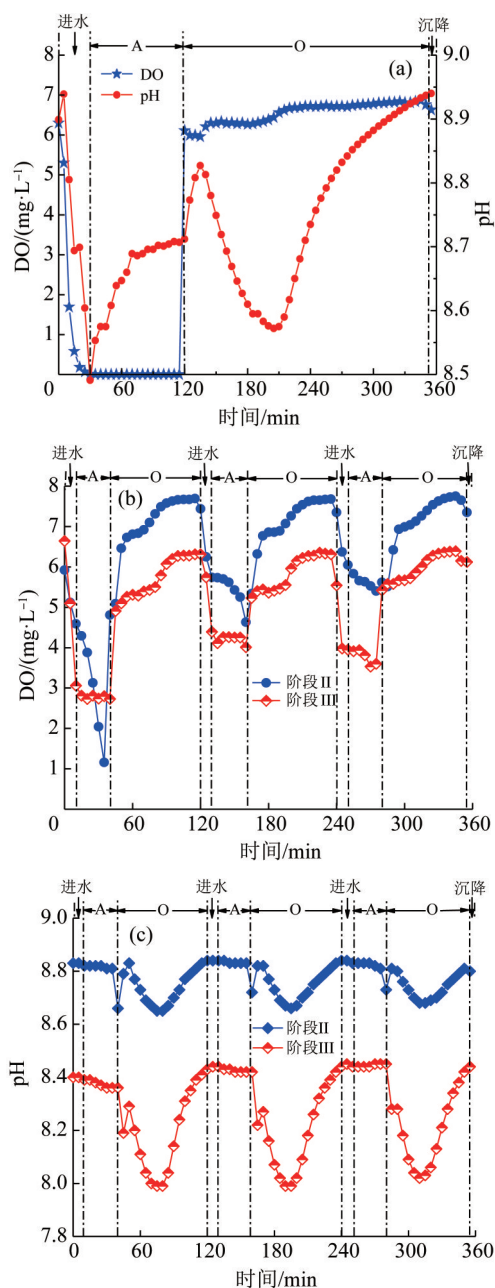
图3 不同阶段周期内污染物降解情况

Fig. 3 Degradation of pollutants during the cycle at different stages

御盐度的冲击,也可能是间歇曝气工艺抑制了NOB的生长^[18]以及曝气时长设置所致,在短程硝化状态下反硝化过程会消耗更少碳源,这也是TN去除率提升的原因。

2.1.3 周期内DO、pH的变化

监测不同阶段各周期内的DO、pH变化情况,以评价高盐度下不同工艺的脱氮性能,结果见图4。



(a) I ; (b) II、III阶段 DO 变化; (c) II、III阶段 pH 变化

图4 不同阶段各周期内的DO、pH变化情况

Fig. 4 Variation of DO and pH during the cycle at different stages

由图4可见,阶段I,DO在厌氧段迅速降至0 mg/L,pH因反硝化产生碱度而上升;好氧段初期系统供氧速率约等于异养菌耗氧速率,DO保持稳定,系统内CO₂吹脱出反应器使得pH上升,135 min后系统以氨氧化反应为主,碱度消耗,pH下降,此时DO稳定,表示系统供氧速率等于氨氧化耗氧速率与异养菌耗氧速率之和,210 min后氨氧化反应结束,

反硝化产生碱度使pH回升。在阶段II的分段进水条件下,碳源的补充及间歇曝气的设定使污泥颗粒化增强,EPS分泌量增加,有效抵御了盐度冲击,系统反硝化过程加强产生更多碱度,因此厌氧段pH及谷底pH比阶段I的更高;分段进水降低短期内系统氨氮负荷以及间歇曝气工艺,导致系统发生短程硝化,周期内DO水平比阶段I更高。阶段III的进水氨氮浓度较高,系统硝化反应程度更大,消耗更多氧气和碱度,因此DO、pH比阶段II的更低。

2.2 污泥性质

2.2.1 污泥浓度及沉降性能

测定AGS系统的污泥浓度与沉降性能,评价不同工艺对系统生物量的影响,结果见图5。

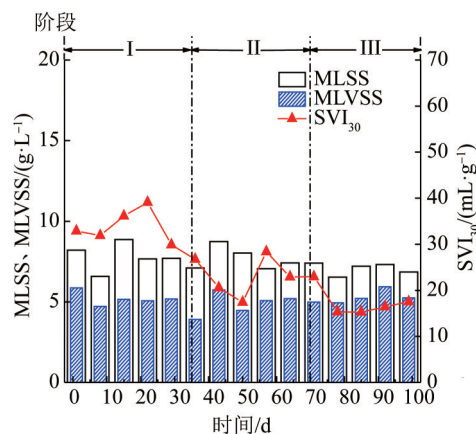


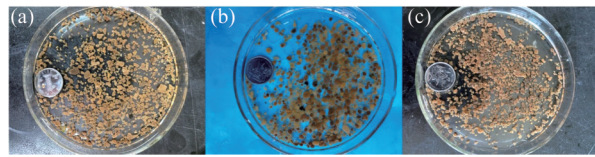
图5 污泥浓度及沉降性能的变化

Fig. 5 Changes in sludge concentration and settling performance

由图5可见,阶段I,盐度的冲击作用使污泥颗粒部分解体,MLSS和沉降性能有所波动,平均MLSS为(7.69±0.80) g/L,SVI₃₀最高达40 mL/g以上。阶段II,间歇曝气及分段进水形成的饥饿-丰盛期促进了耐盐微生物的生长,系统生物量增加,平均MLSS、MLVSS分别达到(7.73±0.67)、(5.10±0.46) g/L,同时微生物更易分泌EPS发生聚集,促进污泥颗粒化,沉降性能提升,平均SVI₃₀为(22.45±4.01) mL/g。阶段III污泥沉降性能进一步提升,SVI₃₀进一步下降,最低至15.26 mL/g,但在该阶段系统因长期运行而发生颗粒部分解体,生物量有所减小,MLSS、MLVSS降至平均(6.98±0.36)、(5.33±0.42) g/L。

2.2.2 污泥形态及理化性质

观察不同阶段的污泥外观并测定其物理性质,评价其在高盐度下的颗粒稳定性,结果见图6、表2。



(a) I ; (b) II ; (c) III

图6 不同阶段的污泥颗粒外观

Fig. 6 Appearance of sludge particles at different stages

表2 不同阶段污泥颗粒的物理性质

Table 2 Physical properties of sludge particles at different stages

阶段	平均密度/(g·cm ⁻³)	平均沉速/(cm·s ⁻¹)	平均粒径/mm
I	1.020	1.48±0.13	2.10±0.68
II	1.029	1.89±0.25	2.71±0.74
III	1.060	2.09±0.19	1.54±0.65

由图6、表2可见,阶段 I 由于盐度的冲击,颗粒部分解体,外观呈淡黄色不规则形态,整体较为细碎,平均粒径为(2.10±0.68) mm,颗粒平均密度和沉速分别为 1.020 g/cm³、(1.48±0.13) cm/s。阶段 II 的污泥颗粒化现象更加明显,颗粒更圆润饱满,平均粒径增至(2.71±0.74) mm,颜色变为深黄,整体更加密实,密度和沉速均增大,可能是由于间歇曝气和饥饿-丰盛期的设置使微生物更易分泌 EPS 而团聚^[16],更多的 EPS 和更好的颗粒结构可有效抵御盐度的冲击^[19],使得系统在高盐度下的脱氮性能有所提升。阶段 III,进水 NH₄⁺-N 增加促进了脱氮微生物的生长,颗粒更加密实,密度和沉速增至 1.060 g/cm³、(2.09±0.19) cm/s;后期由于系统长期运行导致颗粒部分解体,平均粒径减至(1.54±0.65) mm。

总体来看,分段进水间歇曝气工艺能够有效维持 AGS 系统的稳定性,并进一步促进污泥颗粒化,起到抵御盐度胁迫的作用。

2.3 短程硝化

2.3.1 短程硝化效率

系统在短程硝化状态下的反硝化过程会消耗更少碳源,缓解碳源不足的情况。改变工艺后,进水 COD 不变时 TN 去除率明显提升,也可能与短程硝化有关。按式(1)对系统短程硝化率进行计算,结果如图7所示。

短程硝化率(PNE)=

$$\frac{\text{出水NO}_2^- - \text{N}}{\text{出水NO}_2^- - \text{N} + \text{出水NO}_3^- - \text{N}} \times 100\% \quad (1)$$

由图7可见,阶段 I 系统无明显短程硝化现象,出水 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 接近,PNE 为(44±6.29)%;改变

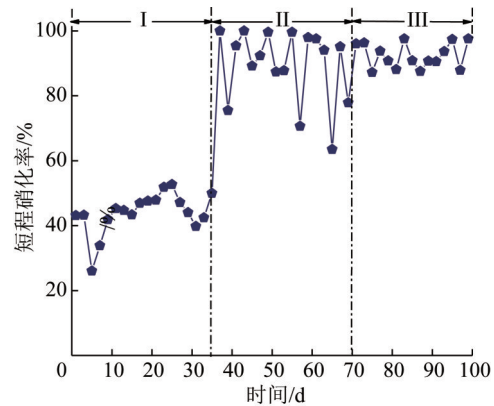


图7 不同阶段的系统短程硝化率

Fig. 7 Partial nitrification efficiency at different stages

工艺条件后,出水 NO₂⁻-N 基本保持不变,NO₃⁻-N 降至极低水平,PNE 提升至(89.62±11.26)%;阶段 III 进水 NH₄⁺-N 增加,PNE 进一步提升至(92.40±3.88)%。系统出现短程硝化现象的原因可能是交替的厌氧好氧环境抑制了 NOB 的生长,另外有研究证明,相比于 AOB,高盐度下 NOB 的活性更易受到抑制^[20]。

2.3.2 硝化反应动力学

在不同工艺条件下进行硝化反应动力学实验。实验前用自来水清洗反应器内污泥使系统内无残留 COD,在无外加碳源的情况下进水 NH₄⁺-N 为 100 mg/L,确保系统只发生硝化反应而不发生反硝化反应。周期内各离子浓度变化情况如图8所示。

由图8(a)可见,在一次进水单段曝气工艺下,系统在 120 min 后进入好氧段,NH₄⁺-N 迅速下降,由于系统只发生硝化反应,NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 逐步累积,但二者累积速率明显不同。120~180 min,NO₂⁻-N 上升速率大于 NO₃⁻-N 上升速率,系统以短程硝化为主,第 180 min 二者浓度差值达到最大,此后 NO₂⁻-N 累积速率变缓,240 min 时质量浓度达到最大,NO₃⁻-N 累积速率开始上升,240 min 后 NO₂⁻-N 浓度开始下降并不断转化为 NO₃⁻-N,周期末几乎全部转化为 NO₃⁻-N。整个周期内 TN 无明显变化。从整个过程来看,NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的累积在时间上存在明显的先后顺序,可能是由于 NO₂⁻-N 作为 NOB 下一步硝化反应的底物,浓度低时无法被高效利用,只有累积到一定浓度时才能发生明显的亚硝酸盐氧化过程。

图8(b)中,在分段进水间歇曝气工艺下,每个好氧段时长设置为 80 min。在 40~120 min 的第 1 个好

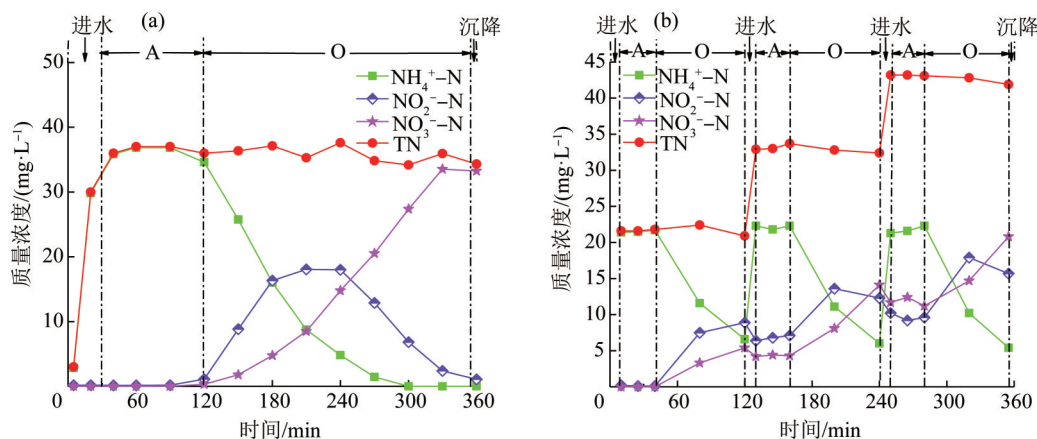


图8 不同工艺条件下硝化反应动力学

Fig. 8 Nitrification reaction kinetics under different process conditions

氧段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迅速下降,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积现象与单段进水时好氧段前 80 min 的累积规律十分类似,即 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的累积明显大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,系统以短程硝化为主。由于系统无法进行反硝化反应,后续 2 个好氧段中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 逐渐转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,周期末 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度分别为 15、20 mg/L 左右。整体来看,在 TN 基本不变,无反硝化反应发生的情况下,系统出水仍有较高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 累积,说明短程硝化现象仍然明显,但随着曝气时间的延长, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 发生明显累积,说明盐度及间歇曝气工艺并未明显抑制 NOB 的活性。从第 1 个好氧段的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积现象可以得出二者的累积在时间上存在先后顺序,而该工艺条件下好氧段时长的设置使系统的短程硝化现象维持在最大化时期,在正常进水条件下,系统在好氧段发生同步短程硝化反硝化。

3 结论

(1)分段进水间歇曝气工艺可有效解决传统 SBR 工艺处理高盐氨氮废水时因高盐度抑制、碳源不足和厌氧环境缺失而导致的脱氮效率低的问题。在盐度为 1%,进水氨氮分别为 100、200 mg/L 的条件下, TN 去除率由 $(64.72\pm 5.03)\%$ 分别提升至 $(82.51\pm 5.66)\%$ 、 $(76.25\pm 2.42)\%$ 。碳源的补充、厌氧段的增设及短程硝化的出现是提升 TN 去除率的重要原因。

(2)整个实验过程中系统生物量保持稳定,间歇曝气及分段进水造成的饥饿-丰盛期使微生物团聚现象更加明显,促进了污泥颗粒化。颗粒外观更加

饱满圆润,平均密度、沉速和粒径均增大,更好的颗粒形态有利于微生物抵御盐度胁迫,从而提升脱氮性能。

(3)在分段进水间歇曝气条件下系统出现短程硝化现象,进水氨氮为 100、200 mg/L 时系统短程硝化率分别达到 $(89.62\pm 11.26)\%$ 、 $(92.40\pm 3.88)\%$,这也是 TN 去除率提升的原因。硝化反应动力学实验表明,盐度和工艺条件并未显著抑制 NOB 的活性,间歇曝气条件下曝气时长的设置可能是系统出现短程硝化的主要因素。

参考文献

- [1] DU Zhaoyang, TIAN Weijun, QIAO Kaili, et al. Improved chlorine and chromium ion removal from leather processing wastewater by biocharcoal-based capacitive deionization [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 233: 116024.
- [2] GUO Ning, WANG Yunkun, TONG Tiezheng, et al. The fate of antibiotic resistance genes and their potential hosts during bio-electrochemical treatment of high-salinity pharmaceutical wastewater [J]. Water Research, 2018, 133: 79-86.
- [3] ALOUI F, KHOUI S, LOUKIL S, et al. Performances of an activated sludge process for the treatment of fish processing saline wastewater [J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3): 389-396.
- [4] KUMAR BISWAL B, HUANG Hao, DAI Ji, et al. Impact of low-thermal pretreatment on physicochemical properties of saline waste activated sludge, hydrolysis of organics and methane yield in anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2020, 297: 122423.
- [5] ZHOU Yingru, HUANG Manhong, DENG Qian, et al. Combination and performance of forward osmosis and membrane distillation (FO-MD) for treatment of high salinity landfill leachate [J]. Desalination, 2017, 420: 99-105.

- [6] KIM H, AHN D. The effects of high salinity on nitrogen removal and the formation characteristics of aerobic granular sludge[J]. Environmental Engineering Research, 2020, 25(5): 659-667.
- [7] ZHAO Yuanyuan, PARK H D, PARK J H, et al. Effect of different salinity adaptation on the performance and microbial community in a sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 808-816.
- [8] 郑焕焕, 李海松. 同步硝化反硝化好氧颗粒污泥的快速培养[J]. 工业水处理, 2021, 41(5): 114-118.
- ZHENG Huanhuan, LI Haisong. Rapid cultivation of aerobic granular sludge with simultaneous nitrification and denitrification[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(5): 114-118.
- [9] CORSINO S F, CAMPO R, DI BELLA G, et al. Cultivation of granular sludge with hypersaline oily wastewater[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 105: 192-202.
- [10] MOUSSAVI G, BARIKBIN B, MAHMOUDI M. The removal of high concentrations of phenol from saline wastewater using aerobic granular SBR[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(3): 498-504.
- [11] 李黔花, 李志华, 岳秀, 等. 好氧颗粒污泥处理印染废水的效能及其微生物特征[J]. 工业水处理, 2020, 40(3): 43-48.
- LI Qianhua, LI Zhihua, YUE Xiu, et al. Efficiency and microbial characteristics of aerobic granular sludge for textile dyeing wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(3): 43-48.
- [12] APHA. Standards methods for the examination of water and wastewater[M]. 20th ed. Washington: American Public Health Association, 1998: 10.
- [13] YAN Lilong, ZHANG Mingyue, LIU Yue, et al. Enhanced nitrogen removal in an aerobic granular sequencing batch reactor under low DO concentration: Role of extracellular polymeric substances and microbial community structure[J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121651.
- [14] TAN Xu, ACQUAH I, LIU Hanzhe, et al. A critical review on saline wastewater treatment by membrane bioreactor (MBR) from a microbial perspective[J]. Chemosphere, 2019, 220: 1150-1162.
- [15] WANG Ru, ZHENG Ping, DING Aqiang, et al. Effects of inorganic salts on denitrifying granular sludge: The acute toxicity and working mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2016, 204: 65-70.
- [16] CUI Lihui, SHEN Hao, KANG Pengfei, et al. Stability and nutrients removal performance of a *Phanerochaete chrysosporium*-based aerobic granular sludge process by step-feeding and multi A/O conditions[J]. Bioresource Technology, 2021, 341: 125839.
- [17] CHEN Han, LI Ang, WANG Qiao, et al. Nitrogen removal performance and microbial community of an enhanced multistage A/O biofilm reactor treating low-strength domestic wastewater[J]. Biodegradation, 2018, 29(3): 285-299.
- [18] HOU Jie, XIA Ling, MA Tao, et al. Achieving short-cut nitrification and denitrification in modified intermittently aerated constructed wetland[J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 10-17.
- [19] CAMPO R, CORSINO S F, TORREGROSSA M, et al. The role of extracellular polymeric substances on aerobic granulation with stepwise increase of salinity[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 195: 12-20.
- [20] CORTÉS-LORENZO C, RODRÍGUEZ-DÍAZ M, SIPKEMA D, et al. Effect of salinity on nitrification efficiency and structure of ammonia-oxidizing bacterial communities in a submerged fixed bed bioreactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 266: 233-240.
-
- [作者简介] 申昊(1996—), 硕士研究生, E-mail: m13525645152@163.com。 通讯作者: 万俊锋, 副教授, 博士, E-mail: wanjunfeng@zzu.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-07-05(修改稿)