

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.002

SBR/RO 工艺源分离尿液处理特性研究

马跃龙¹, 徐瑶瑶¹, 刘 宁², 李彤彤¹, 石 烜¹, 金 鑫¹, 金鹏康¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国石油长庆油田
分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

摘 要: 针对源分离生态厕所中尿液处理后难以回用的问题,设计开发了 SBR/RO 尿液处理系统,研究了 SBR 耦合 RO 工艺的最优工况及其对尿液中污染物的去除特性。结果表明,SBR 的硝化性能随污泥浓度的升高而增强,pH 值是影响系统硝化性能的主要因素,将其污泥浓度提升至 12 g/L,pH 值维持在 7.0~8.0,可避免反应体系内因尿液中尿素分解产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 积累对系统出水水质的不利影响。为减少反硝化反应时间,分析了进水碳源种类及比例对尿液中污染物去除速率的影响,结果表明,采用葡萄糖/乙酸钠混合碳源(质量比为 0.73:1)时,系统对污染物的去除速率最高,反应所需时间最短,因此将外加碳源优化为此混合碳源,同时将缺氧段与曝气段时间调整为 1 h 和 5 h。在最优条件下连续运行 SBR/RO 系统,其中 SBR 系统对尿素和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率大于 99%,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别稳定在 18~33、85~110 mg/L。SBR/RO 工艺对尿液中的污染物去除效果明显,出水水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中的冲厕用水水质标准。

关键词: 尿液; 源分离; 反渗透; 序批式活性污泥法; 碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0007-08

Treatment Characteristics of Source-separated Urine by SBR/RO Process

MA Yue-long¹, XU Yao-yao¹, LIU Ning², LI Tong-tong¹, SHI Xuan¹, JIN Xin¹,
JIN Peng-kang¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Petroleum Technology Research Institute of Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficulty in reusing urine in source-separated ecological toilets, a combined urine treatment system of sequencing batch reactor (SBR) and reverse osmosis (RO) was designed and developed, and the optimal operating conditions of the coupling SBR/RO process and its removal characteristics of urine pollutants were studied. The nitrification performance of the SBR increased with the increase of the sludge concentration, and pH was the main factor affecting the nitrification performance. Therefore, influence of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ accumulation generated by the decomposition of urea in SBR on the effluent quality could be avoided by increasing the sludge concentration to 12 g/L and maintaining the pH between 7.0 and 8.0. In order to reduce the reaction time of the denitrification

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西高校新型智库; 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-S-19-3); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

通信作者: 金鹏康 E-mail: pkjin@hotmail.com

stage, influence of the type and proportion of influent carbon source on removal efficiency of pollutants in urine was analyzed. When mixed carbon source of glucose/sodium acetate (mass ratio 0.73 : 1) was used, the system had the highest pollutants removal efficiency and the shortest reaction time. Therefore, the influent carbon source was optimized to be a mixed carbon source, and the anoxic and aeration reaction time were adjusted to 1 h and 5 h. The SBR/RO system was continuously operated under the optimal conditions. The removal efficiencies of urea and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the SBR system were more than 99%, and the effluent $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations were stably maintained at 18–33 mg/L and 85–110 mg/L, respectively. The SBR/RO system had a significant effect on the removal of pollutants in urine, and the effluent quality of the system met the flushing water quality standard specified in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Water Consumption* (GB/T 18920–2002).

Key words: urine; source-separation; reverse osmosis; sequencing batch reactor; carbon source

传统冲厕模式将冲厕水与粪尿混合直接排入污水管网系统,不但耗费了大量的水资源,而且增加了污水厂的处理负荷。为了克服传统冲厕模式带来的弊端,研究者们提出了源分离技术^[1],即将尿液与粪便从源头上分离并且单独处理,以实现污染物去除的高效化。然而,对于粪尿分离后所收集尿液的处理和利用成为目前源分离厕所推广所面临的重大难题^[2]。

近年来,反渗透(RO)工艺在高纯水制备、海水淡化、工业废水处理等领域广泛应用,RO工艺具有出水水质好、脱盐率高、占地面积小等特点,符合源分离厕所中对尿液的处理要求。对于一些人口密度大、水资源短缺、市政供水设施缺乏的地区,如西部农村地区和旅游景区,将尿液经RO工艺处理后产出的清水回用冲厕,有助于缓解当地用水紧张的现状,实现水资源的循环利用。但是新鲜尿液中含有大量尿素,膜反应器处理尿液时易产生有机物污染和微生物污染,这将不利于RO系统长期稳定运行。由于微生物水解法可处理尿素废水^[3],因此可采用SBR对尿液中的尿素进行降解,同时SBR法具有占地面积小、运行维护方便等优点,因此可将SBR工艺用于源分离厕所内RO系统处理尿液的前置工艺,以减小RO系统进水有机负荷,降低RO膜污堵风险。笔者采用SBR/RO工艺对源分离尿液进行处理,研究了SBR工艺对尿液中尿素的去除特性,通过改变进水碳源种类优化SBR工艺的运行参数,分析了尿液经SBR/RO工艺处理后的出水水质,并评价其回用冲厕的可能性。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验包含2套装置,SBR装置如图1所示,反应器采用有机玻璃制成,总容积为12.5 L,有效容积为9 L;内设搅拌装置,通过底部气石充氧曝气,利用PLC(可编程逻辑控制器)系统控制搅拌、曝气、进水和出水过程。RO膜分离系统由4部分组成,见图2,RO膜为汇通SW11–2521海水淡化膜。

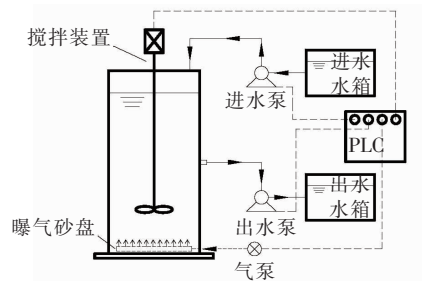


图1 SBR装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR

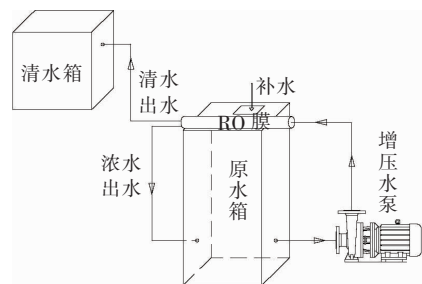


图2 RO膜分离系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of RO membrane separation system

1.2 实验用水

连续3日收集5名健康男性的尿液,及时测定

尿液中 TDS 以及 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 COD 、 TP 和部分金属离子浓度,根据测定结果中重复率较高的浓度范围确定模拟尿液中各组分浓度。由于生态厕所收集尿液时采用少量回用水冲厕,对尿液有一定的稀释作用,因此实验用水采用人工配制的 50% 浓度模拟尿液,具体成分: NaCl 为 1.6 g/L, KCl 为 2.0 g/L, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 0.2 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 0.3 g/L, Na_2SO_4 为 1.75 g/L, NH_4Cl 为 1.0 g/L, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为 5.0 g/L, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 为 1.5 g/L, NaH_2PO_4 为 0.4 g/L。

1.3 分析项目及方法

由于实验进水中氯离子浓度较高,直接利用消解法测定 COD 会产生较大误差,同时在实验中发现 SBR 出水中亚硝态氮浓度较高,亚硝态氮可被重铬酸钾氧化,也会影响 COD 测定结果,因此在测定 COD 前需对水样进行预处理。向水样中添加少量高浓度硝酸银溶液与氯离子反应生成氯化银沉淀,再通过 0.45 μm 滤膜从而去除水样中的大量氯离子。在消解前先测定水样中的亚硝态氮浓度,并推算亚硝酸根浓度,向待测水样中加入适量氨基磺酸作为掩蔽剂以消除亚硝态氮对 COD 测定的干扰,具体加入量为氨基磺酸: $\text{NO}_2^- = 10:1$ (质量比),再利用消解法测定滤后水样的溶解性 COD 浓度。采用二乙酰一肟分光光度法测定尿素浓度,其他常规指标均按照国家标准方法测定。

1.4 实验方法

1.4.1 SBR 运行参数的确定

取西安市某污水处理厂生物池回流污泥,闷曝 24 h 后稀释并转移至 4 个 SBR 反应器中,各反应器污泥浓度分别为 3、6、9 和 12 g/L,加入少量 NH_4Cl 溶液使各反应器中初始 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 145 mg/L (约为 500 mL 模拟尿液进入反应器后尿素完全分解产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度),加入 10% 的 NaOH 溶液调节初始 pH 值=8.0,调节曝气量使各反应体系内 DO 维持在 3~5 mg/L,每小时取样测定各反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,探究污泥浓度和曝气时间对高氨氮废水硝化作用的影响。反应结束后排空其中 2 个 SBR 中的污泥,重新加入闷曝后的污泥 ($\text{MLSS} = 12$ g/L),反应条件和取样方式同上,每次取样后将其中 1 个反应器内 pH 值调回 8.0,另一个不调,探究 pH 值对高氨氮废水硝化作用的影响。

1.4.2 SBR 运行周期内尿素转化规律

将闷曝后的活性污泥接种至 SBR 反应器中,以

葡萄糖作为碳源,调节进水 COD 满足 C/N 值=6,曝气阶段控制 DO 浓度在 3~5 mg/L,通过投加 10% 的 HCl 或 NaOH 溶液使反应器内 pH 值维持在 7.0~8.0。每天运行过程为:进水 500 mL (10 min)、缺氧搅拌 5 h、曝气 10 h、沉淀 3 h、排水 500 mL (10 min)、闲置。稳定运行 5 d,以第 5 天运行阶段作为一个典型周期,每小时取样测定出水含氮物质浓度,分析一个运行周期内的尿素转化规律。

1.4.3 不同碳源对 SBR 处理尿液的影响

向 3 个 SBR 反应器内接种污泥,依据 1.4.2 节的实验结果调整运行工况如下:进水 500 mL (10 min)、缺氧搅拌 4 h、曝气 8 h、沉淀 3 h、排水 500 mL (10 min)、闲置。3 个反应器进水中分别投加质量比为 1.46:1、0.73:1、0.37:1 (对应的 COD 当量比为 2:1、1:1、1:2) 的葡萄糖和乙酸钠混合碳源 A、B、C,满足 C/N 值=6,其余控制条件同 1.4.2 节。连续运行 10 d,每天测定各反应器出水含氮物质浓度,以第 10 天运行阶段作为典型周期,测定相同反应时间下 3 个反应器对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和尿素的去除效果,确定最佳投加碳源, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率的计算方法如下:

$$R = \left(1 - \frac{0.467C_3 + C_4}{0.467C_1 + C_2}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为某时刻 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率,%; C_1 为进水后反应器内尿素浓度,mg/L; C_2 为进水后反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,mg/L; C_3 为某时刻反应器内尿素浓度,mg/L; C_4 为某时刻反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,mg/L;0.467 为尿素转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的折算系数。

1.4.4 SBR 连续运行实验

采用葡萄糖/乙酸钠碳源 (质量比为 0.73:1) 调节进水 C/N 值=6,最终优化运行工况为:进水 500 mL (10 min)、缺氧搅拌 1 h、曝气 5 h、沉淀 3 h、排水 500 mL (10 min)、闲置,SBR 连续运行 45 d,每天运行 2 个周期,取第 2 个周期出水测定各物质浓度变化情况。定期排泥,维持 SBR 反应器内污泥浓度在 12~13 g/L。

1.4.5 SBR 耦合 RO 的运行效果分析

将 2 L 的 SBR 出水加入 RO 膜分离系统原水箱中,启动高压泵,控制进水压力为 5.5 MPa,尿液经 RO 膜处理后进入清水箱,浓水返回原水箱循环处理,直至清水箱内清水体积达到 1 L,即尿液达到 50% 的回收率,关闭高压水泵,从清水箱内取样并测

定TDS和各组分含量。再取2 L模拟尿液加入RO膜分离系统原水箱中,系统运行及取样方法同上。

2 结果与讨论

2.1 SBR运行参数的确定

当采用SBR处理尿液时,污泥浓度为6 g/L,运行过程为:进水500 mL(10 min)、缺氧搅拌5 h、曝气12 h、沉淀3 h、排水500 mL(10 min)、闲置。运行几天后发现尿素完全降解,但出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐升高,与此同时出水变浑浊。经分析,尿素分解产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在曝气阶段未能通过硝化作用完全降解,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在反应器中逐渐积累,高浓度 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对微生物有毒害作用,导致部分微生物死亡、自溶,造成污泥解体^[4]。为此,设计实验考察了影响高氨氮废水硝化能力的主要因素,从而确定SBR的较优运行参数。结果表明,在相同反应时间内(8 h),随着污泥浓度的升高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率由15.78%升高到44.20%,如图3所示。反应开始一段时间后,延长曝气对提升硝化效果影响不大,以12 g/L的污泥浓度为例,曝气1 h后对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为26.23%,而曝气4 h后每小时去除率不足2%。

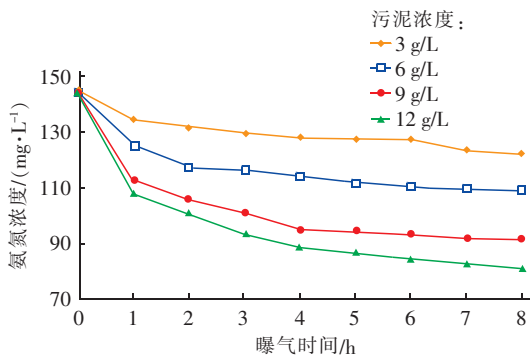


图3 污泥浓度和曝气时间对硝化作用的影响

Fig. 3 Effect of sludge concentration and aeration time on nitrification

pH值是影响高氨氮废水硝化性能的主要因素,如图4所示,当污泥浓度为12 g/L时,投加NaOH的反应体系与不投加相比,曝气10 h后 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为94.74%和50.94%。分析认为,污泥浓度越高,参与硝化作用的微生物数量越多^[5],反应体系的硝化能力就越强。但硝化作用使反应体系pH值下降,而氨氧化细菌(AOB)适宜生长的pH值范围在7.0~8.5^[6],当pH值<6.5时,AOB生长受到抑制;与此同时,硝化反应产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在酸

性条件下以游离亚硝酸(FNA)形式存在,FNA亦会抑制AOB活性^[7],因此导致氨氧化速率明显下降。通过投加NaOH调节反应器内pH值在7.0~8.0,可满足AOB生长环境条件,同时避免反应体系内FNA的积累,使硝化反应能够正常进行。综上,确定SBR的基本运行参数如下:污泥浓度为12 g/L,pH值维持在7.0~8.0。

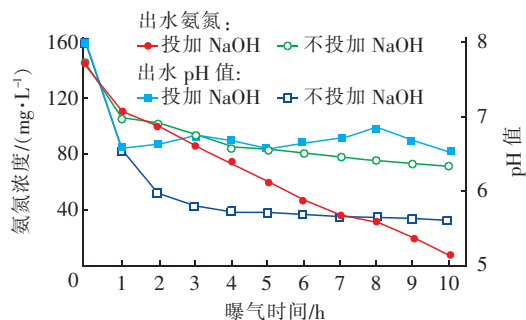


图4 pH值对硝化作用的影响

Fig. 4 Effect of pH on nitrification

2.2 SBR运行周期内尿素的转化规律

SBR反应器的污泥浓度调整为12 g/L,pH值维持在7.0~8.0,反应器运行稳定时一个典型周期内尿素的降解过程如图5所示。

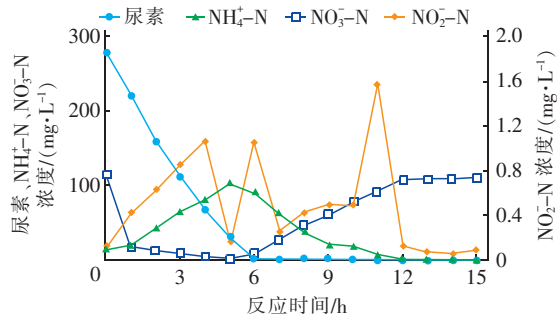


图5 典型周期内SBR反应器中尿素降解过程

Fig. 5 Urea degradation process in SBR during a typical cycle

由图5可以看出,反应6 h后尿素可完全去除,前2 h尿素的去除速率相差不大,随后逐渐减小,这是因为随着反应的进行底物浓度逐渐减小,脲酶数量稳定的情况下底物降解速率逐渐降低,是典型的酶促反应特征。前5 h为缺氧阶段,进水中投加葡萄糖调节C/N值=6, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 在4 h内可基本去除完全(去除率达到95.34%),缺氧段使硝化作用受到抑制,而尿素分解产生 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不受影响,结果导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 逐渐积累。第5小时开始曝气,硝化作用得以恢复, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 开始降解,曝气6 h后去除

率达到95.38%。整个阶段 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度均低于1.60 mg/L,未出现积累现象,说明 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 经硝化作用产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 可迅速被氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,SBR内亚硝酸盐氧化菌(NO_B)活性较高。

以上结果表明,SBR对尿素、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果良好,但反应时间较长,完全去除反应体系内的污染物需缺氧搅拌4 h、曝气6 h。反应周期长势必会带来更多消耗,增加处理成本,因此需采取措施优化反应条件,提升反应速率,降低能耗。

2.3 不同碳源对SBR处理尿液效果的影响

由于尿液的C/N值<1,为保证脱氮效果和微生物正常生长代谢,上述实验采用葡萄糖调节进水C/N值=6。有研究表明,碳源种类可影响反硝化速率^[8],缩短反应时间。葡萄糖和乙酸钠作为污水厂常用的外加碳源,安全性好,运输储存方便,适宜作为SBR处理尿液的外加碳源。乙酸钠具有很高的反硝化速率^[9],因此脱氮效果可能会更好,但乙酸钠价格较高,长期使用会大大增加处理成本。为了在加快反应速率的同时又减少成本投入,采用葡

萄糖和乙酸钠混合碳源。向不同SBR反应器进水中投加质量比为1.46:1、0.73:1、0.37:1(对应的COD当量比为2:1、1:1、1:2)的葡萄糖/乙酸钠混合碳源A、B、C,依据污染物去除速率和出水指标确定最优碳源,优化反应工况。

表1为不同碳源投加条件下SBR反应器内 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、尿素和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除情况。可知,改变碳源种类可显著减少反硝化所需时间。加入含有乙酸钠的3种碳源,缺氧搅拌1 h后 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率均在90%以上,其中采用碳源B和C时去除率达到95%以上,而以葡萄糖单独作为碳源时典型反应周期内1 h的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率仅为84.68%,且去除率达到95%以上需反应4 h。根据缺氧搅拌1 h的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率可知,碳源中乙酸钠质量占比越高,相同时间内的脱氮效果就越好,这是因为葡萄糖分子质量较大,反硝化阶段需要先被降解为小分子有机物再被异养微生物所利用,而乙酸钠分子质量比葡萄糖小,发生三羧酸循环更容易^[10],可直接被异养微生物利用,因此反硝化速率更快。

表1 不同碳源投加条件下SBR对污染物的去除效果

Tab.1 Removal effect of pollutants in SBR with adding different carbon sources

%

项 目	$\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率			尿素去除率			$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
缺氧搅拌 1 h	90.40	95.98	98.46	22.87	19.47	16.11	—	—	—
缺氧搅拌 2 h	99.53	99.57	99.41	40.69	39.33	42.16	—	—	—
曝气 1 h	—	—	—	95.28	94.12	95.76	42.10	45.99	50.19
曝气 2 h	—	—	—	98.09	98.06	98.50	67.14	70.83	72.79
曝气 3 h	—	—	—	—	—	—	77.10	83.55	87.42
曝气 4 h	—	—	—	—	—	—	88.41	94.91	95.86
曝气 5 h	—	—	—	—	—	—	93.13	99.48	98.89

从表1还可以看出,曝气2 h(反应6 h)SBR在投加3种碳源条件下对体系内的尿素去除率均可达到98%以上;曝气4 h,3组反应体系中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均达到88%以上,高于以葡萄糖作为碳源时典型周期内的85.82%,采用碳源B和C时SBR的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均达到94%以上。虽然硝化细菌多为自养型微生物,硝化过程不消耗有机碳源,但是通过本实验结果可以看出,碳源中乙酸钠质量占比越高,硝化效果越好。这可能是因为乙酸钠分子质量比葡萄糖小,合成微生物时所需克服的能差较大^[11],因此微生物细胞合成速率不如大分子有机物高,葡萄糖更适合用于异养微生物生长。在好氧阶段,异养好氧型微生物与自养好氧型微生物对溶解

氧的利用存在竞争关系,碳源中乙酸钠质量占比越高,异养型微生物数量越少,因此作为自养好氧型微生物的硝化细菌对氧的竞争力较强,相同反应时间内的硝化效果较好。

图6为投加3种碳源条件下SBR连续运行10 d时的出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度。可知,在投加3种碳源条件下SBR出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的总量基本相同,碳源中乙酸钠质量占比越高,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率就越高。采用碳源C时SBR出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度维持在70~85 mg/L,显著高于其余两组。由于乙酸钠分解产生的 CO_3^{2-} 消耗水中的 H^+ ,反硝化过程中 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 被还原时产生碱度^[12],两者共同作用引起缺氧搅拌阶段pH值急剧升高。

与此同时,尿液中尿素分解产生大量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,在碱性条件下转化为 FA,FA 对 NOB 的起始抑制浓度比 AOB 小^[13],当 FA 浓度合适时,NOB 生长受到抑制而 AOB 生长不受抑制,将会导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率升高。由于碳源 C 中乙酸钠质量占比最高,采用碳源 C 为外加碳源时,在反硝化阶段可能没有及时将 pH 值调低,导致 FA 浓度升高。而碳源 A 和 B 中葡萄糖质量占比较高,葡萄糖分解产生的 CO_2 溶于水发生电离,产生的 H^+ 一定程度上缓冲了反硝化过程中 pH 值的升高,从而缓解了 FA 浓度的升高。高浓度 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在反应器内积累容易形成 FNA,FNA 对微生物有严重毒害作用,因此采用碳源 C 不利于 SBR 长期稳定运行。在实验中也发现,硝化阶段 3 个 SBR 内 pH 值较稳定,NaOH 和 HCl 投加量很少,在反硝化阶段,碳源中乙酸钠比例越高,就需要投加更多的酸调节 pH 值,增加了运行成本。

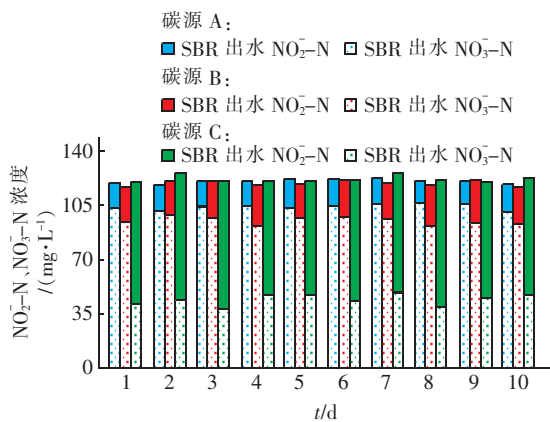


图6 不同外加碳源条件下出水硝态氮和亚硝态氮浓度变化
Fig. 6 Change of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentrations in effluent under different external carbon sources

综上,结合污染物降解时间、出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度以及运行成本,确定 SBR 的最优外加碳源为碳源 B(葡萄糖:乙酸钠=0.73:1)。

2.4 SBR 连续运行的出水水质情况

采用混合碳源 B,结合表 1 中 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、尿素和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在各时间段内的去除效果,将 SBR 反应器的缺氧搅拌时间调整为 1 h、曝气时间调整为 5 h。反应器连续运行 45 d 的出水水质见图 7 和图 8。由图 7 可知,出水尿素浓度均低于 2 mg/L、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度低于 4 mg/L、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均较为稳定,由此可见,在一个运行周期内微生物所产生的脲酶可将进水中的尿素完全分解,反应器中的硝化

菌和反硝化菌有较高活性,能够完全去除反应过程中产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,同时降解上一运行周期内残余的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$,避免含氮物质累积。如图 8 所示,出水 COD 虽有波动,但基本稳定在 50~90 mg/L,SBR 对 COD 有良好的去除效果,去除率在 99% 以上,整个反应阶段 SBR 反应器内并没有发生污染物积累的现象,污泥性状良好,尿素去除率大于 99%,可用作 RO 膜分离系统处理尿液的前处理装置。

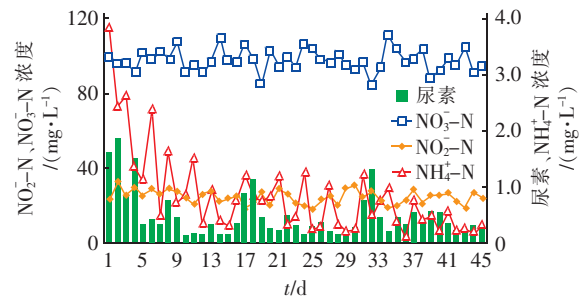


图7 SBR 连续运行阶段出水含氮物质浓度的变化
Fig. 7 Change of effluent nitrogen concentration in SBR during continuous operation period

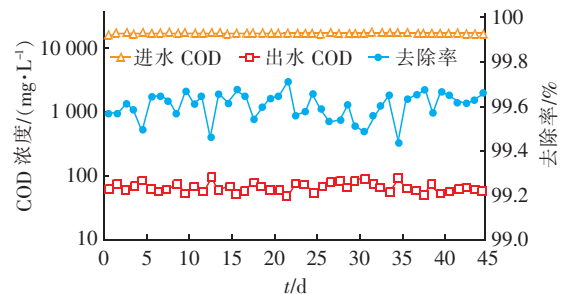


图8 SBR 连续运行阶段出水 COD 浓度的变化
Fig. 8 Change of effluent COD concentration in SBR during continuous operation period

2.5 SBR 耦合 RO 工艺的运行效果

为防止 RO 膜堵塞,SBR 工艺出水采用超滤膜进行预处理,保证 RO 系统进水 SDI(污泥密度指数) < 5。分别采用 RO 工艺和 SBR/RO 工艺处理源分离尿液,在 50% 的回收率下连续运行 10 次,出水 TDS 如图 9 所示。可知,直接采用 RO 工艺处理尿液时出水 TDS 为 1 797~2 041 mg/L,不能满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中冲刷用水水质要求($\text{TDS} \leq 1\,500 \text{ mg/L}$),这可能是因为 RO 系统进水中尿素浓度高,约为 5 000 mg/L,而尿素为小分子有机物,比大分子物质更容易透过反渗透膜^[14],随着循环过程中原水尿素浓度逐渐增大,在进水压力一定的条件下,反渗透系统无

法完全截留大量尿素分子,导致出水 TDS 偏高。当采用 SBR/RO 工艺时,由于前置 SBR 工艺可将尿液中的尿素转化完全,降低了 RO 工艺进水尿素负荷,因此可使系统出水 TDS(248 ~ 321 mg/L)较直接采用 RO 工艺时显著降低。

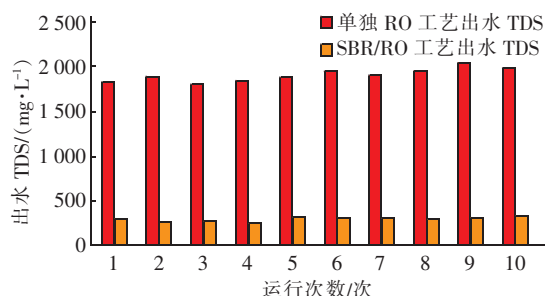


图 9 两种工艺出水 TDS 对比

Fig. 9 Comparison of effluent TDS between two processes

在 SBR/RO 工艺中,SBR 工艺出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、COD、电导率分别为 18 ~ 33 mg/L、85 ~ 110 mg/L、48 ~ 93 mg/L、8 430 ~ 8 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$,经 RO 工艺处理后,以上指标分别降至 0.21 ~ 0.35 mg/L、1.63 ~ 2.47 mg/L、< 15 mg/L、265 ~ 354 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。可以看出,尽管 SBR 工艺出水中含有较高浓度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,但这些物质经过 RO 膜分离系统处理后基本可实现完全去除,同时对 COD 也有较好的去除效果。虽然模拟尿液中的盐分无法通过 SBR 工艺去除,但是经过 RO 膜分离系统处理后出水电导率显著降低,这说明 RO 膜可大量截留尿液中的带电离子,利用 SBR/RO 工艺处理尿液时表现出极佳的脱氮脱盐性能。另外,SBR/RO 工艺出水 pH 值为 7.0 ~ 8.0、浊度 < 1 NTU、TDS 为 248 ~ 321 mg/L、 BOD_5 为 6.56 ~ 8.84 mg/L、氨氮 < 1 mg/L、DO 为 1.46 ~ 3.25 mg/L、无色、嗅无不快感,阴离子表面活性剂、铁、锰、总大肠菌群均未检出(由于本实验采用的系统不含加氯装置,因此未在出水中检测总余氯指标),与《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中的冲厕用水水质标准进行对比,可知 SBR/RO 工艺出水水质符合冲厕用水水质相关标准,可用作源分离生态厕所中尿液的处理系统。

3 结论

① 采用 SBR 工艺处理源分离尿液的过程中,反应器中的硝化作用随污泥浓度的升高而增强,pH 值是影响 SBR 硝化能力的主要因素,通过提升污泥

浓度和调节反应过程中的 pH 值可避免 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的积累。最终确定 SBR 的基本运行参数为:MLSS = 12 g/L,pH 值维持在 7.0 ~ 8.0。

② 采用葡萄糖为外加碳源时,SBR 稳定运行时对尿素、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果良好,但反应时间较长,完全去除尿素及其转化产物需在反应阶段缺氧搅拌 4 h、曝气 6 h。将外加碳源优化为葡萄糖/乙酸钠混合碳源(质量比为 0.73 : 1)时,反应 6 h 后尿素去除率为 98.06%,缺氧搅拌 1 h 时 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率为 95.98%,曝气 4 h 时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 94.91%,尿素降解速率与葡萄糖为外加碳源时差别不大, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解速率明显升高。

③ 进水碳源采用葡萄糖/乙酸钠混合碳源(质量比为 0.73 : 1),运行工况优化为缺氧搅拌 1 h、曝气 5 h,SBR 反应器连续运行过程中尿素和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可基本完全去除,出水中各组分浓度稳定, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别稳定在 18 ~ 33、85 ~ 110 mg/L,反应器内未发生污染物积累的现象,污泥性状良好。

④ 直接采用 RO 工艺处理尿液时,出水 TDS 为 1 797 ~ 2 041 mg/L,而采用 SBR/RO 工艺处理尿液时,出水 TDS 为 248 ~ 321 mg/L,前置 SBR 工艺对提升 RO 系统出水水质有明显效果。SBR/RO 工艺出水水质符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中的冲厕用水水质标准,可为源分离厕所尿液处理提供新的发展方向。

参考文献:

- [1] 郝晓地,衣兰凯,仇付国. 源分离技术的国内外研发进展及应用现状[J]. 中国给水排水,2010,26(12): 1-7.
Hao Xiaodi, Yi Lankai, Qiu Fuguo. Global R&D progress and applied situation of source separation techniques [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(12): 1-7 (in Chinese).
- [2] 郑向勇,叶海仁,程天行,等. 源分离尿液处理技术的研究进展[J]. 水处理技术,2012,38(12): 16-20.
Zheng Xiangyong, Ye Hairen, Cheng Tianxing, et al. Progress on the treatment of source separated urine [J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(12): 16-20 (in Chinese).
- [3] Garrido J M, Méndez R, Lema J M. Simultaneous urea hydrolysis, formaldehyde removal and denitrification in a

- multifed upflow filter under anoxic and anaerobic conditions[J]. *Water Res*, 2001, 35(3): 691–698.
- [4] 李志华, 付进芳, 李胜, 等. 好氧颗粒污泥处理综合城市污水的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(15): 4–8.
- Li Zhihua, Fu Jinfang, Li Sheng, *et al.* Pilot study on aerobic granular sludge for treating comprehensive municipal wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(15): 4–8 (in Chinese).
- [5] 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 等. C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 845–852.
- Zhang Min, Wei Jiamin, Huang Huimin, *et al.* Effect of C/N and sludge concentration on the pH-regulated nitrosation system[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 845–852 (in Chinese).
- [6] 傅金祥, 张羽, 杨洪旭, 等. 短程硝化反硝化影响因素研究[J]. *工业水处理*, 2010, 30(12): 38–41.
- Fu Jinxiang, Zhang Yu, Yang Hongxu, *et al.* Study on the influential factors affecting short-cut nitrification-denitrification[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, 30(12): 38–41 (in Chinese).
- [7] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z. Free ammonia and free nitrous acid inhibition on the anabolic and catabolic processes of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* [J]. *Water Sci Technol*, 2007, 56(7): 89–97.
- [8] Wu C C, Peng Y Z, Zhang L, *et al.* Enhanced nitrogen removal of low C/N wastewater in a subsequent denitrifying reactor fed by endogenous carbon source generated from primary sludge fermentation [J]. *Adv Mater Res*, 2011, 281: 101–105.
- [9] 李巍巍, 王晓昌, 夏四清, 等. 厨余发酵液与乙酸钠作碳源的脱氮与膜污染对比[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 19–22.
- Li Weiwei, Wang Xiaochang, Xia Siqing, *et al.* Denitrification and membrane fouling using kitchen waste fermentation liquid and sodium acetate as carbon source [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(21): 19–22 (in Chinese).
- [10] Cherchi C, Onnis-Hayden A, Gu A Z. Ability of Specific enriched denitrifying culture to utilize other carbon sources[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2009(4): 799–814.
- [11] 程喆, 王晓昌, 张永梅, 等. 厨余发酵液与乙酸钠、葡萄糖脱氮性能的比较[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(1): 362–366.
- Cheng Zhe, Wang Xiaochang, Zhang Yongmei, *et al.* Comparison between fermentation liquid of food-waste and sodium acetate, glucose on denitrification potential [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 362–366 (in Chinese).
- [12] 郑春华, 耿安锋, 李金国. 碱度对生物脱氮工艺的影响及其调控[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10): 34–36.
- Zheng Chunhua, Geng Anfeng, Li Jinguo. Role and control of alkalinity in the process for biological nitrogen removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(10): 34–36 (in Chinese).
- [13] Park S, Bae W. Modeling kinetics of ammonium oxidation and nitrite oxidation under simultaneous inhibition by free ammonia and free nitrous acid [J]. *Process Biochem*, 2009, 44(6): 631–640.
- [14] Choi J, Chung J. Evaluation of urea removal by persulfate with UV irradiation in an ultrapure water production system [J]. *Water Res*, 2019, 158: 411–416.



作者简介: 马跃龙(1994–), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水处理技术。

E-mail: mayuelongyx@163.com

收稿日期: 2019–12–03