



锰负载固相碳源在处理生活污水中脱氮性能研究

黄佳琦¹, 赵晓祥¹, 许敬新², 王宇晖¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 中国城市发展规划设计咨询有限公司上海分公司, 上海 201210)

[摘要] 生物强化脱氮技术是城镇污水处理厂重点关注的技术之一, 现有大量研究表明改性填料可以增强污水生物脱氮效果。制备了一种锰负载丝瓜络填料, 构建以锰负载丝瓜络为生物载体的生物滤池系统, 应用同步硝化反硝化(SND)技术处理模拟低碳氮比生活污水, 考察反应器的启动及一系列 C/N 条件下系统脱氮性能的变化情况。结果表明, 系统运行 20 d 后, 实验组和对照组总氮去除率分别可达 39.92% 和 60.07% 左右, 实现了 SND 的启动; 且在反应器启动阶段, 实验组 COD、NH₄⁺-N、TN 平均去除率均高于对照组, 分别提高了 4.61%、20.09%、16.31%。在 DO=(4.0±0.5) mg/L、HRT=12 h, 进水 C/N=5 的条件下, 实验组 NH₄⁺-N、TN 平均去除率分别可达 88.95%、64.98%, 相较对照组分别提高 9.72%、10.84%。可见锰负载物可提高污水处理中 NH₄⁺-N、TN 以及 COD 的去除效果。

[关键词] 丝瓜络; 锰; 同步硝化反硝化; 生物滤池; 固相碳源

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)09-0101-08

Denitrification performance of manganese supported solid carbon source in domestic sewage treatment

HUANG Jiaqi¹, ZHAO Xiaoxiang¹, XU Jingxin², WANG Yuhui¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. China Urban Development Planning and Design Consulting Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: Biological enhanced nitrogen removal technology is one of the key concerns of urban sewage treatment plants. A large number of existing studies show that modified fillers can enhance the effect of biological nitrogen removal. We have prepared loofah/MnO_x fillers biological carriers for constructing biological filter systems. Simultaneous nitrification and denitrification(SND) was applied to treat simulation low carbon and nitrogen ratio domestic sewage. The effects of reactor startup and different C/N ratio on the denitrification performance of the system were investigated. The results showed that after hanging 20 days, the total nitrogen removal rates of control and trail group could reach 39.92% and 60.07%, respectively, which means that SND startup was complete. And at this stage, the average removal rate of COD, NH₄⁺-N, TN in trail group was higher than that in the control group, they increased by 4.61%, 20.09% and 16.31% respectively. With DO, HRT and C/N of (4.0±0.5)mg/L, 12 h and 5, the NH₄⁺-N and TN highest removal rates of trial group were 88.95% and 64.98%, which were 9.72% and 10.84% higher than that in the control group. It could be seen that manganese loading could significantly improve the removal rate of ammonia nitrogen in sewage treatment.

Key words: loofah; manganese; simultaneous nitrification and denitrification; biological filter; solid carbon source

我国天然水体中的氮污染是普遍存在的水污染问题^[1]。水环境中氨氮升高不仅阻碍水生生物生存、生长和繁殖, 破坏水生态, 还会对人类饮水安全产生一定威胁。生物脱氮是目前应用最为广泛的污水脱氮技术^[2-3], 但是, 我国城市污水厂, 尤其是南方

地区, 普遍存在进水有机污染物(COD)浓度偏低, 而总氮(TN)含量相对较高的情况。传统生物脱氮技术中有机碳源不足会影响生物反硝化过程, 硝化和反硝化难以达到平衡, 从而导致 TN 去除率难以提高。通常采用外加碳源的方式来提高进水有机物含

[基金项目] 资源型城市雨污协同高效利用关键技术集成与示范(2019YFC0408603); 上海市青年科技启明星项目(19QC1401100)

量、强化反硝化反应以保证出水 TN 的稳定,投加量过少不能起到充分反硝化的效果,投加量过高则会抑制硝化作用,还会增加污水处理成本。因此,选择合适的碳源形式以及调控碳氮比(C/N)是实现污水高效生物脱氮的关键。

常用外加碳源可分为液态碳源和固体碳源两大类。有研究发现^[4],当采用乙醇为外加碳源时,硝酸盐去除速率提升较快,并且不会产生亚硝酸盐积累;还有研究分别选用淀粉、葡萄糖和甲醇为外加碳源^[5],研究不同碳源类型对低碳氮比生活污水脱氮性能的影响,结果表明,投加淀粉会导致系统恶化,而投加甲醇和葡萄糖时,系统运行良好,脱氮效果得以提高;且以葡萄糖作为碳源,反硝化细菌的繁殖速率明显优于其他外加碳源^[5]。虽然液态碳释碳速度快、反应效果提升明显,但在污水处理过程中,液态碳源投加量不易控制,投加成本高,投加过量还将造成水体二次污染^[6-7]。

相较于液态碳源,丝瓜络作为一种天然的固体碳源,既可作为外加碳源,同时也具有较高的比表面积和孔隙度,可为微生物挂膜提供载体,且成本低廉,操作方便^[8-10]。

此外,基于锰氧化物(MnO_x)对有机污染物的吸附及氧化性能^[3],现已有越来越多的研究聚焦于锰氧化物(MnO_x)在废水处理和土壤修复方面的应用,但在城市污水处理方面的研究较少。在对海洋沉积物的研究中发现^[11-12],与 Fe(III) 相似,锰氧化物(MnO_x)可作为电子受体参与氨氧化过程,将 NH_4^+-N 转化为 NO_3^- 或 NO_2^- ;另有研究表明,在 MnO_x 存在的情况下,厌氧硝化反应生成的 NO_3^- 明显增加^[13],这可能与 MnO_x 的氧化电

位有关(其氧化还原电位由高到低的顺序依次为 O_2 、 NO_3^- 、 MnO_x 、 FeO_x 、 SO_4^{2-} 、 CO_2),在缺氧条件下 MnO_x 可充当氧化剂^[14]。除此之外, Mn^{2+} 又可作为电子供体参与 NO_2^- 、 NO_3^- 反硝化过程,在有效去除 TN 的同时实现 MnO_x 的循环,为进一步硝化作用提供新的电子受体^[12,15]。在研究不同金属离子对硝化-厌氧氨氧化的影响过程中发现^[16],二价锰能增强厌氧氨氧化菌(AnAOB 菌)活性,有效提高脱氮效率。

因此,本研究制备了一种锰负载丝瓜络填料,构建以锰负载丝瓜络为填料生物载体的生物滤池系统,采用同步硝化反硝化技术进行对比试验,分别探究其启动及不同 C/N 阶段对 COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 和 TN 的处理效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 改性丝瓜络纤维的制备

剪取块状丝瓜络(20 mm×20 mm×5 mm)完全浸没于 1.5% 氢氧化钠溶液中,浸泡 30 min 后取出,并用纯水洗涤 5 次至中性,自然干燥得碱改性丝瓜络^[9-10];然后将碱改性丝瓜络浸泡于 30 mmol/L 高锰酸钾溶液中,室温下搅拌反应 12 h 后取出,洗净干燥后即得锰负载丝瓜络纤维。

1.1.2 实验模拟废水

实验用水均为人工模拟的城镇生活污水,配制生活污水所用溶剂来自管网自来水,水质详细情况见表 1;模拟废水以葡萄糖作为有机碳源,氯化铵(NH_4Cl)为氮源,磷酸二氢钾(KH_2PO_4)为磷源,并加以微量元素作为营养物质,同时添加适量碳酸氢钠(NaHCO_3)调节进水 pH。

表 1 启动阶段模拟废水水质
Table 1 Simulated wastewater quality

水质指标	COD	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TP	pH
质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	90	30±0.10	30±0.50	0±0.15	0	4	7.5±0.5

1.1.3 活性污泥

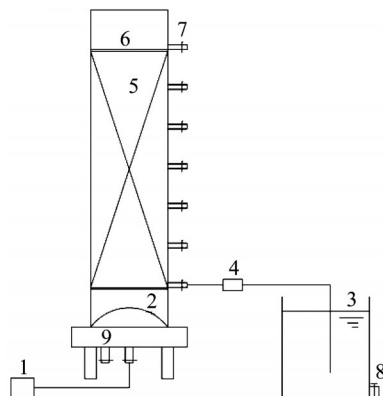
接种污泥取自上海市松江污水处理厂二沉池的污泥,接种前对污泥进行曝气驯化后待用。

1.2 实验装置

将锰负载丝瓜络纤维填充到聚丙烯材质多孔

悬浮小球中。采用填充改性填料(填充率 40%)的连续流生物滤池反应器,其材质为有机玻璃,内径 20 cm,有效高度 60 cm,总容积 18.84 L,且在距离底部和顶部 10 cm 处各设置一块 ABS 穿孔挡板,以保证填料在反应器中分布均匀,避免上浮。反应器的

底部装有曝气盘和排泥管,装置底部进水、进气,顶部出水;连续运行,实验装置见图1。



1—曝气泵;2—曝气盘;3—配水箱;4—进水蠕动泵;5—填料;
6—ABS穿孔板;7—出水口;8—水箱排水口;9—底部排泥口

图1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment

1.3 实验方法

分别设置以丝瓜络和锰负载丝瓜络两种填料为生物载体的生物滤池系统A、B,各反应器中一次性接种来自上海市松江污水处理厂二沉池的污泥,接种污泥质量浓度均为3.5 g/L。

1.3.1 锰负载固相碳源生物膜反应器挂膜启动

首先将接种污泥与人工模拟生活废水混合一起从柱底以20.8 mL/min(HRT=12 h)的流速泵入反应器,使活性污泥在反应器中内循环一段时间,直至可观察到填料上附载一层黄褐色的微絮状污泥;再采用连续运行的方式进行污泥驯化培养,直到生物膜稳定成熟。启动阶段进行至15~20 d,出水总氮趋于稳定状态,即认为该反应器启动成功。在该阶段,实验组和对照组TN去除率可分别稳定在80.47%和44.75%左右。

启动阶段设定反应器内DO为 (4.0 ± 0.5) mg/L, HRT=12 h。每天定时取样,测定反应器出水COD、 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 等水质指标。

1.3.2 运行参数的确定

为探讨进水COD和氮的负荷对脱氮性能的影响,设计了一组实验。脱氮性能稳定(启动阶段)后,在保持进水氨氮不变的情况下,保持水力停留时间为12 h,其他运行参数相同,通过改变进水COD来调节C/N,确定反应最佳C/N。每天检测并记录反应器中出水水质指标的变化。

1.4 分析方法

本实验每天对反应器的进水、出水进行取样,水质测试前经0.45 μm 的滤膜过滤。分别采用快速消解分光光度法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法、pH快速测定仪和溶解氧测定仪分析测定COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、pH和DO。利用扫描电镜(JSM-7500F)观察填料表面形态并对表面元素分布进行能谱分析。

2 结果与讨论

2.1 实验填料的表征

实验所用锰负载丝瓜络纤维填料的SEM和能谱分析结果见图2。

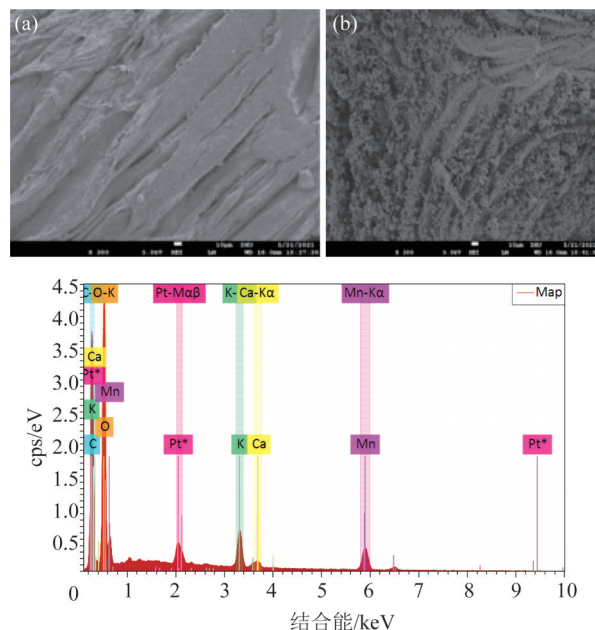


图2 丝瓜络/MnO_x材料SEM和能谱分析

Fig.2 SEM and energy spectrum analysis figures of loofah/MnO_x

相比原丝瓜络纤维[图2(a)],改性后的丝瓜络纤维[图2(b)]表面被尺寸为微米大小颗粒状的MnO_x所覆盖。同时,能谱分析结果显示,改性后的丝瓜络纤维表面Mn和O占比约为1:3,猜测在丝瓜络纤维上可能存在MnO_x颗粒。

2.2 锰负载固相碳源反应器启动

实验采用接种挂膜法,接种污泥取自上海市松江污水处理厂二沉池污泥,在曝气条件下使活性污泥在反应器中内循环一段时间,观察到填料上负载

一层黄褐色的微絮状污泥,且出水管中的流水变清,即认为挂膜成功。

启动过程在曝气条件下采用连续运行的方式从底部进水,直到生物膜成熟。设定反应器内 DO 为 (4.0 ± 0.5) mg/L, HRT=12 h, pH 为 7.5 左右。当出水

TN 浓度呈现稳定状态时,即认为该反应器启动阶段完成。

2.2.1 启动阶段 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

挂膜启动期间 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的变化情况见图 3。

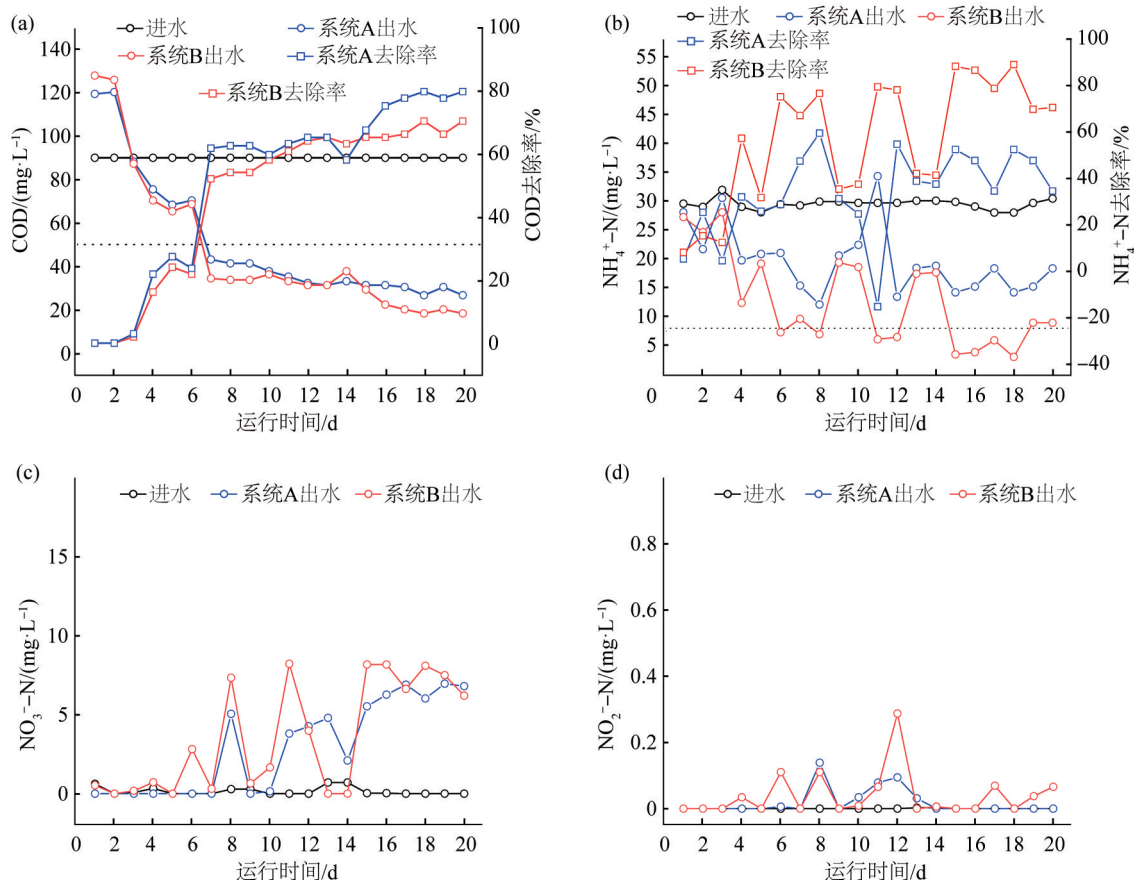


图3 挂膜启动期间 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 变化情况

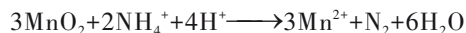
Fig. 3 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ changes during the start-up phase of hanging film

由图 3(a)可知,在反应器挂膜初期,出水 COD 显著高于进水,COD 去除率为 0。这源于丝瓜络缓释碳作用,有研究表明丝瓜络等农作物材料在 48 h 内可释放 95% 以上的 COD,从而造成水体中 COD 的积累,但微生物所能利用的碳源有限,导致出水 COD 高于进水。实验运行一周后,COD 去除率有了较大幅度增长,由 30% 提升至 60% 左右并趋于稳定,其出水 COD 均低于 50 mg/L,实验运行至 14 d 时,系统 A、B COD 去除率分别稳定在 75% 和 80% 左右。结果表明,经过 20 d 的挂膜启动,生物膜已形成并逐渐成熟。

在启动阶段,系统 A、B 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别

可达到 50% 和 85% 左右。由图 3(b)可知,随着反应时间的增加,在启动阶段的 20 d 内,两反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不断降低。系统 A 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率由初期 21% 提升至 50% 左右,系统 B 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率由初期 31% 提升至 89%;这是因为启动阶段,硝化细菌处于增长期,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率也随之上升,而到了启动阶段后期,系统内已存在较高浓度且生长稳定的硝化细菌。从图中可以看出,系统 B 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率明显高于系统 A,可能是系统 B 中填料负载的 MnO_2 参与到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解过程,这与 D. SWATHI 等^[17]的研究结果相似,一方面 MnO_2 可作为吸附剂^[18]吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$;另一方面, MnO_2 作为电子受

体参与氨氧化过程,将 NH_4^+ 转化为 NO_2^- 或 NO_3^- ,从而加强硝化反应的进行^[15],其反应方程如下:



由图3(c)、3(d)可知,在启动阶段,系统B出水 NO_3^- -N略高于系统A,这可能归因于反应器中DO在 (4.0 ± 0.5) mg/L有利于硝化反应的进行,且系统B中的 MnO_2 提高了系统硝化反应的效果,造成系统B出水 NO_3^- -N高于系统A;此外,两反应器内几乎没有出现 NO_2^- -N积累。

2.2.2 启动阶段TN的去除效果

系统A、B启动阶段TN的去除效果见图4。

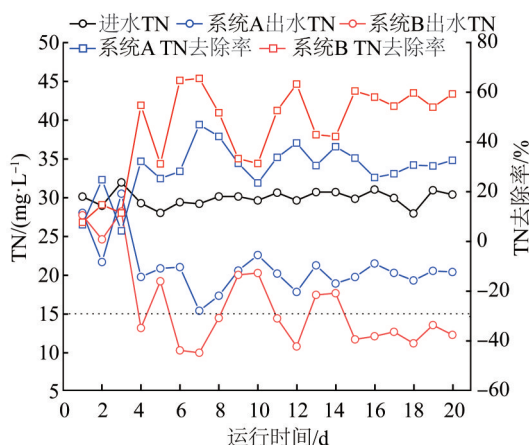


图4 系统A、B启动阶段TN去除效果

Fig. 4 TN removal effect of system A and B during start-up

由图4可知,在初始阶段系统A、B对TN的去除率分别可达到32%和56%左右。随着时间的增长,两反应器出水TN不断降低至趋于稳定。到启动阶段末期,系统A、B总氮去除率分别可达40%和60%,且系统B的出水总氮可维持在15 mg/L以下,这可归因于反应器中的同步硝化反硝化作用^[19]。受氧扩散的限制,填料表面生长的生物膜内产生溶解氧浓度梯度^[20-21],从外到内溶解氧浓度逐渐下降,在膜内形成缺氧区。在生物膜外表面,溶解氧浓度相对较高,等于反应器内混合液的溶解氧浓度,在此处主要以好氧硝化菌为主,发生硝化反应。进入生物膜内部,氧传递受阻,并且由于生物膜外部氧的大量消耗,使得生物膜内形成缺氧或厌氧环境,此环境下反硝化菌占优势并进行反硝化反应。

2.3 不同C/N对锰负载固相碳源运行效果的影响

C/N是指有机物中碳的总含量与氮的总含量的比值,C/N过高,促进异养反硝化菌大量繁殖,使自养硝化菌处于竞争劣势,从而影响系统硝化效果;C/N过低,微生物可利用的碳源减少,异养反硝化菌长期在低负荷下运行,系统反硝化能力下降^[22-23]。因此,C/N也是影响生物脱氮效率的重要因素。

实验过程中控制进水pH为7.5、DO为 (4.0 ± 0.5) mg/L、HRT=12 h、 NH_4^+ -N为 (30 ± 0.5) mg/L、TN为 (30 ± 0.1) mg/L,通过改变进水COD探究进水C/N分别为3、4、5、6、7时系统对COD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和TN去除效率的影响。

2.3.1 不同C/N对COD、 NH_4^+ -N去除效果的影响

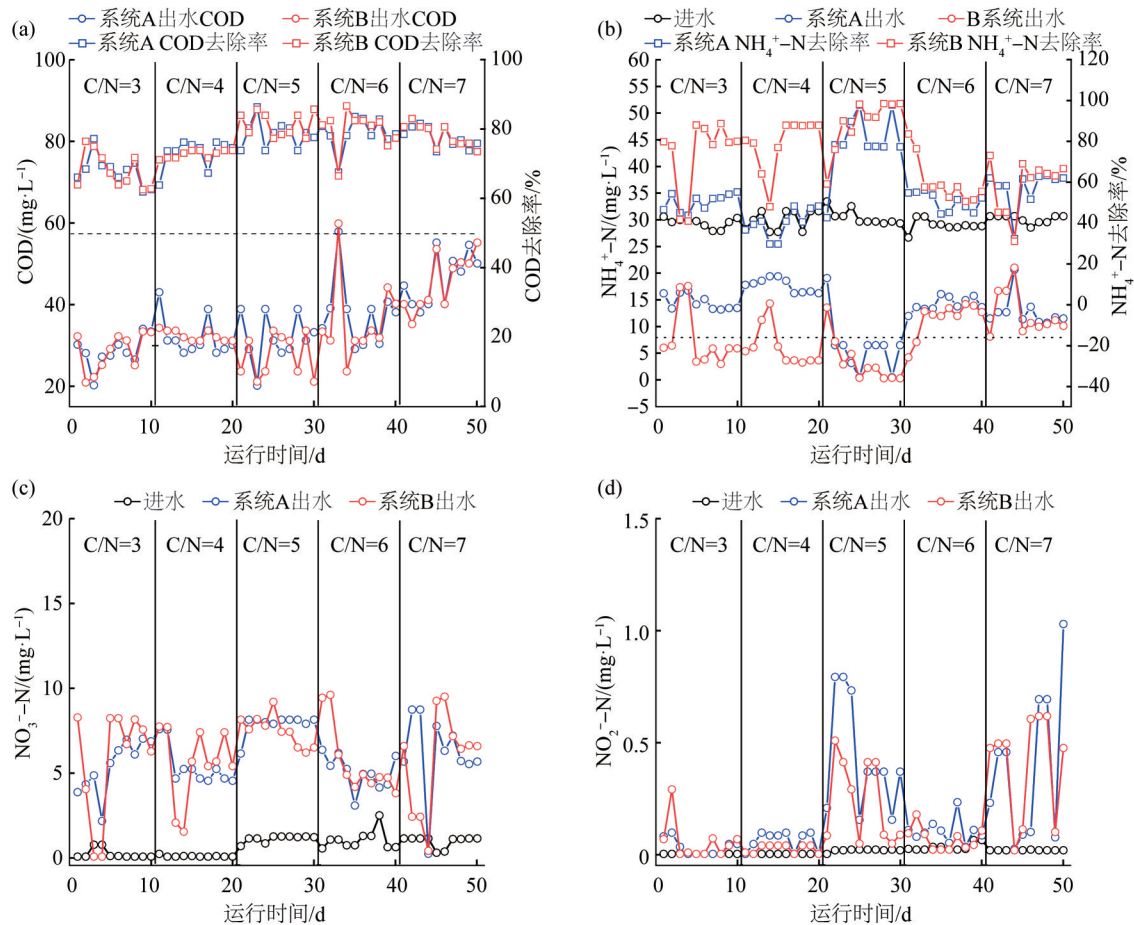
实验期间系统A、B的COD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N变化情况见图5。

由图5(a)可知,在进水C/N分别为3、4、5、6、7时,出水COD在20~50 mg/L范围内浮动,随着进水COD的增加,系统A、B出水COD略有上升。实验期间,系统A、B对COD平均去除率分别为76.15%和76.89%,平均出水COD均在50 mg/L以下。这表明该系统可耐受低C/N污水COD的波动,出水数据稳定,具有一定的耐冲击负荷能力。

由图5(b)可知,保持进水 NH_4^+ -N为 (30 ± 0.5) mg/L,C/N由3增加到5的过程中,系统B出水 NH_4^+ -N变化不大,平均出水 NH_4^+ -N由7.61 mg/L下降到3.52 mg/L,平均去除率由74.41%上升至88.95%,最高去除率可达98.76%。 NH_4^+ -N去除效果随C/N增加变化较小,这可能是因为系统中存在少量异养硝化菌,相关研究发现^[24],在同步硝化反硝化系统中,随着C/N的增加,硝化速率也随之增加。而当实验中进一步提高进水COD浓度发现系统B出水 NH_4^+ -N浓度上升,这可能是因为高C/N会抑制硝化菌活动^[25]。

在该实验阶段,系统A出水 NH_4^+ -N浓度变化趋势与系统B基本一致。在C/N为5的条件下,系统B对 NH_4^+ -N的平均去除率略高于系统A,可能是因为系统B中填料负载的 MnO_2 参与到 NH_4^+ -N降解过程,加强了系统硝化反应。

由图5(c)、5(d)可知,系统B出水 NO_3^- -N略高

图5 系统A、B实验期间COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 变化情况Fig. 5 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ changes during the experiment

于系统A,这可能归因于反应器中DO为 (4.0 ± 0.5) mg/L时有利于硝化反应的进行,且系统B中的 MnO_2 提高了系统硝化反应的效果,造成系统B出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 高于系统A;随着C/N的增加,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度略有下降,其原因可能是较高的进水COD浓度能够促进反硝化作用,但丝瓜络作为固相碳源可被微生物降解利用^[26],故即使进水碳源不足,微生物也能利用丝瓜络作为固体碳源达到较好的脱氮效果;在C/N为5,DO为 (4.0 ± 0.5) mg/L的条件下,系统A、B出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别为7.84、7.45 mg/L。出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较高可能是因为系统溶解氧浓度较高,反硝化进行不彻底。此外,两反应器内 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累量维持在1 mg/L以下。

2.3.2 不同C/N对TN去除效果的影响

系统A、B实验期间TN去除效果见图6。

对比图5、图6可知,两系统出水TN变化趋势均

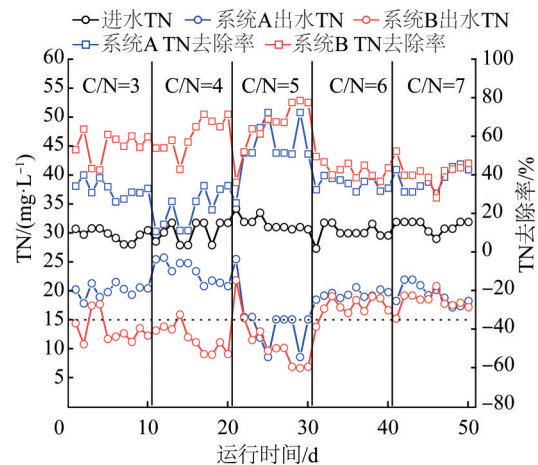


图6 系统A、B实验期间TN的去除效果

Fig. 6 TN removal effect in system A and B during the experiment

与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化趋势类似, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果是出水TN变化的主要影响因素。C/N由3增加到5的过程中,系统A、B平均出水TN分别由20.01、13.38 mg/L下

降到 14.58、11.20 mg/L, 平均 TN 去除率分别由 32.55%、55.08% 上升到 54.14%、64.99%, 最高去除率分别为 72.27% 和 78.47%。其中系统 B 平均 TN 去除率变化幅度较小, 也说明锰负载丝瓜络填料相较于普通丝瓜络填料具有更强的抗冲击负荷能力, 系统脱氮效果更稳定。

3 结论

(1) 固体碳源生物膜反应器接种挂膜历时 20 d, 实验组、对照组均可实现同步硝化反硝化, 出水氨氮和 TN 分别低于 15 mg/L 和 50 mg/L, 且实验组 TN 去除率(60.07%)高于对照组(39.92%)。

(2) 在启动阶段后期, 出水中硝酸盐含量增加, 且 TN 去除率有一定程度的下降, 其原因可能是启动阶段进水 C/N 低且水体溶解氧浓度较高, 微生物长期在低负荷下运行, 系统反硝化能力下降。

(3) 不同 C/N 进水对 COD 降解效果的影响较小, 控制 C/N 在 3~7 之间, 平均出水 COD 均在 50 mg/L 以下。且两系统出水 TN 变化趋势均与 NH_4^+-N 变化趋势类似, 可见 NH_4^+-N 去除效果是出水 TN 变化的主要影响因素。

(4) 控制 C/N 为 5 时可达到最佳去除效果, 出水污染物浓度均可满足 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级标准, 且实验组平均 TN 去除率高于对照组, 可能是锰氧化物(MnO_x)对有机污染物的吸附及氧化性能, 促进同步硝化反硝化作用进行。

(5) 随着反应的进行, 反应器中部分丝瓜络被氧化分解, 这也可能是导致后期实验效果不太理想的原因之一, 在后续的研究中, 还需考虑定期更换一定比例的改性填料以保证系统的脱氮效果。

参考文献

- [1] SUN Zhiyi, LÜ Yongkang, LIU Yuxiang, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a novel metal resistant bacterium *Cupriavidus* sp. S1[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 142–150.
- [2] 周少奇, 周吉林, 范家明. 同时硝化反硝化生物脱氮技术研究进展[J]. *环境技术*, 2002, 20(2): 38–44.
ZHOU Shaoqi, ZHOU Jilin, FAN Jiaming. The study and progress of biological nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification(snd) technology[J]. *Environmental Technology*, 2002, 20(2): 38–44.
- [3] 张旭, 刘佳, 许兵. 缓释碳源材料及其在低碳氮比废水处理中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2021, 52(2): 1–5.
ZHANG Xu, LIU Jia, XU Bing. Slow-release carbon source material and its application in low carbon-nitrogen ratio sewage treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2021, 52(2): 1–5.
- [4] 蒋亚萍, 陈余道, 刘汉乐, 等. 乙醇在地下水硝酸盐原位去除中的可利用性[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(8): 1446–1452.
JIANG Yaping, CHEN Yudao, LIU Hanle, et al. Availability of ethanol for *in situ* nitrate bioremediation in polluted groundwater[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1446–1452.
- [5] 刘昱迪. 利用外加碳源处理低碳氮比污水的研究进展[J]. *科技展望*, 2016, 26(9): 68.
LIU Yudi. Research progress of using external carbon source to treat low carbon nitrogen ratio wastewater[J]. *Science and Technology*, 2016, 26(9): 68.
- [6] PARK J Y, YOO Y J. Biological nitrate removal in industrial wastewater treatment: Which electron donor we can choose[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 82(3): 415–429.
- [7] 蓝梅, 许志欣, 孙文叶. 缓释碳源材料的选择与制备探究[J]. *工业水处理*, 2017, 37(2): 24–28.
LAN Mei, XU Zhixin, SUN Wenye. Study on the selection and preparation of the slowly-releasing organic carbon source(SOC) materials[J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(2): 24–28.
- [8] 栾晓男, 田云飞, 郑力, 等. 丝瓜络填料反硝化滤池对生活污水的净化[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3471–3476.
LUAN Xiaonan, TIAN Yunfei, ZHENG Li, et al. Sewage purification by loofah denitrification filler[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(7): 3471–3476.
- [9] 王尉, 常雅军, 崔键, 等. 改性丝瓜络填料对富营养化水体的高效脱氮特性[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 130–137.
WANG Wei, CHANG Yajun, CUI Jian, et al. High-efficiency nitrogen removal of eutrophic water by modified loofah fillers[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 130–137.
- [10] 高嘉敏, 廖佳欢, 张宇含, 等. 改性丝瓜络悬浮填料与 SBR 工艺结合处理生活废水研究[J]. *生物化工*, 2019, 5(3): 14–15.
GAO Jiamin, LIAO Jiahuan, ZHANG Yuhuan, et al. Study on combined treatment of domestic wastewater by modified loofah suspension filler and SBR process[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2019, 5(3): 14–15.
- [11] HULTH S, ALLER R C, GILBERT F. Coupled anoxic nitrification/manganese reduction in marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(1): 49–66.
- [12] FERNANDES S O, JAVANAUD C, AIGLE A, et al. Anaerobic

- nitrification-denitrification mediated by Mn-oxides in meso-tidal sediments: Implications for N_2 and N_2O production[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 144: 1-8.
- [13] JAVANAUD C, MICHOTÉY V, GUASCO S, et al. Anaerobic ammonium oxidation mediated by Mn-oxides: From sediment to strain level[J]. *Research in Microbiology*, 2011, 162(9): 848-857.
- [14] SCHINK B. Microbially driven redox reactions in anoxic environments: Pathways, energetics, and biochemical consequences[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2006, 6(3): 228-233.
- [15] LUTHER G W III, SUNDBY B, LEWIS B L, et al. Interactions of manganese with the nitrogen cycle: Alternative pathways to dinitrogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4043-4052.
- [16] LI Huayu, YAO Hong, ZHANG Dayi, et al. Short- and long-term effects of manganese, zinc and copper ions on nitrogen removal in nitrification-anammox process[J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 479-488.
- [17] SWATHI D, SABUMON P C, MALIYEKKAL S M. Microbial mediated anoxic nitrification-denitrification in the presence of nanoscale oxides of manganese[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 499-510.
- [18] ZHANG Lei, WANG Junli, QIAO Hongxia, et al. Synthesis of manganese oxides for adsorptive removal of ammonia nitrogen from aqueous solutions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 123055.
- [19] 杨麒, 李小明, 曾光明, 等. 同步硝化反硝化机理的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2003, 30(4): 88-91.
- YANG Qi, LI Xiaoming, ZENG Guangming, et al. Study progress on mechanism for simultaneous nitrification and denitrification[J]. *Microbiology*, 2003, 30(4): 88-91.
- [20] CHIU Y C, LEE Liling, CHANG Chengnan, et al. Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, 59(1): 1-7.
- [21] MÜNCH E V, LANT P, KELLER J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 1996, 30(2): 277-284.
- [22] LEUNG S M, LITTLE J C, HOLST T, et al. Air/water oxygen transfer in a biological aerated filter[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(2): 181-189.
- [23] 侯红娟, 王洪洋, 周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(12): 19-23.
- HOU Hongjuan, WANG Hongyang, ZHOU Qi. Effect of influent COD concentration and C/N ratio on denitrification[J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(12): 19-23.
- [24] 李贤胜. 生物膜法同步硝化反硝化脱氮效果研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- LI Xiansheng. Study on the effect of simultaneous nitrification and denitrification by biofilm process[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [25] 郭英. SBR 生物脱氮过程进水 C/N 及 FA 对微生物硝化特性影响试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- GUO Ying. Study on the effect of influent C/N and FA on the nitrification characteristic of microbial populations in the biological nitrogen removal of sequencing batch reactor[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2013.
- [26] XIONG Rui, YU Xinxiao, ZHANG Yonge, et al. Comparison of agricultural wastes and synthetic macromolecules as solid carbon source in treating low carbon nitrogen wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139885.
- [作者简介] 黄佳琦(1998—), 硕士。电话: 18271866769, E-mail: 182718667692163.com。通讯作者: 王宇晖, 教授, 博士。电话: 021-67792558, E-mail: yhwang@dhu.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-07-11(修改稿)