



CASS 工艺改进及对城镇污水含氮污染物的去除

郑丽丽^{1,2,3}, 刘 闯³, 王 倩³, 李肖燕^{1,2}, 马莉萍^{1,2}, 梁文艳³

(1. 北京中铁生态环境设计院有限公司, 北京 102600; 2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600;

3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

[摘要] 含氮污染物的去除一直是污水处理领域的难题。传统的周期循环式活性污泥法(CASS)处理工艺在污水处理厂中广泛应用,但其普遍存在对总氮处理效果不佳的问题。分别通过增加硝化液回流、添加聚氨酯海绵填料 2 种方式,对传统周期循环式活性污泥法处理工艺进行改进,研究了循环周期、曝气时间、排水比和内硝化液回流比等运行参数对 CASS 改进工艺中总氮强化去除效果的影响,并通过高通量测序分析不同工艺中微生物群落的差异。研究表明,改进工艺的最佳操作参数:循环周期为 8 h、曝气时间为 4 h、排水比为 50%、硝化液回流比为 35%。与传统 CASS 工艺相比,CASS 回流工艺(RCASS)和 CASS 复合生物膜工艺(IFAS-CASS)对 TN 的去除率分别增加 10%~15% 和 15%~37%,出水 TN 质量浓度分别低至 14.8、4.65 mg/L。在最优运行条件下,2 种 CASS 改进工艺能够发挥最佳的处理作用,强化 TN 的去除。IFAS-CASS 工艺内的 Actinobacteria(放线菌门)和 Proteobacteria(变形菌门)丰度较高,因此 IFAS-CASS 工艺可以更好地强化去除含氮污染物。

[关键词] 城镇污水处理;周期循环式活性污泥法;回流工艺;复合生物膜

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0078-07

Improvement of CASS process and enhanced removal of nitrogen-containing pollutants from urban wastewater

ZHENG Lili^{1,2,3}, LIU Chuang³, WANG Qian³, LI Xiaoyan^{1,2}, MA Liping^{1,2}, LIANG Wenyan³

(1. Beijing China Railway Ecology & Environment Design Institute Co., Ltd., Beijing 102600, China; 2. China Railway

Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China; 3. College of Environmental

Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The removal of nitrogen-containing pollutants has been a challenge in the field of wastewater treatment. The traditional cyclic activated sludge system (CASS) treatment process is widely used in wastewater treatment plants, but it generally has the problem of poor treatment effect on total nitrogen. The traditional CASS process was improved by adding nitrate liquid reflux and polyurethane sponge filler, respectively. The effects of operating parameters such as cycle time, aeration time, drainage ratio and internal nitrification fluid reflux ratio on the enhanced removal of total nitrogen in improved CASS process were investigated, and the differences of microbial communities in different processes were analyzed by high-throughput sequencing. The results showed that the optimal operating parameters for the improved process were: cycle time of 8 h, aeration time of 4 h, drainage ratio of 50%, and nitrification solution reflux ratio of 35%. Compared with the traditional CASS process, the removal rates of TN by CASS reflux process (RCASS) and CASS composite biofilm process (IFAS-CASS) increased by 10%~15% and 15%~37%, respectively, and the effluent TN mass concentrations were as low as 14.8 and 4.65 mg/L, respectively. Under the optimal operating conditions, two CASS improvement processes can play the best treatment role to enhance the TN removal. The abundance of Actinobacteria and Proteobacteria in the IFAS-CASS process was higher, resulted in better enhanced removal of nitrogen-containing pollutants by the IFAS-CASS process.

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51672028);中铁第五勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划项目(T5Y2020-B09);北京中铁生态环境设计院有限公司科技研究开发计划项目(70052004)

Key words: urban wastewater treatment; cyclic activated sludge system; reflux process; composite biofilm process

城镇污水中TN的去除是污水治理的重难点,污水排放标准的不断提高也要求污水处理厂提升对含氮污染物的处理能力。传统的周期循环式活性污泥法(CASS)工艺因占地面积小、运行成本低且可自动化运转而广泛用于城镇污水处理^[1]。然而,城镇污水普遍存在碳源不足的问题,导致CASS工艺难以实现高效脱氮^[2]。随着出水水质标准的日益严格,有必要开发高效的生物脱氮系统。

改变传统工艺的运行方式,优化工艺控制参数,提高CASS工艺的脱氮能力等方法引起研究人员的关注。CASS反应器可根据污水水质的要求,改变进水、曝气、沉淀等阶段的时间,迅速实现好氧、缺氧、厌氧条件之间的转换,提高污染物的去除效率^[3]。对于同一种序批式污水处理工艺,不同循环周期下的脱氮效果也有较大差异^[4]。曝气时间是污水处理工艺运行中的最主要影响因素之一,曝气量会影响氨氮的去除和反硝化处理效果。王加蒙等^[5]采用序批式活性污泥(SBR)工艺处理生活污水,发现适当增加排水比可增加下一周期反应器内的碳源浓度,进而提高脱氮效果。排水比和回流比也是影响CASS工艺处理效果的重要因素,排水比过大会对工艺内部系统产生较大冲击,回流比例偏小影响反硝化作用,而排水比太小或回流比例过大会增加工艺运行成本^[6]。

硝化液回流可将污水中的碳源优化分配至不同处理阶段,增强反硝化能力,强化脱氮去除能力。此外,由活性污泥法和生物膜法构成的生物膜与活性污泥复合工艺也可提高系统的脱氮能力^[7]。赵亮等^[8]在CASS池内投加PVA悬浮填料,研究结果表明,添加填料后CASS工艺的氨氮去除能力明显提升。李济源等^[9]在传统CASS工艺中添加一种人工合成填料处理酒精废水,当填料填充比为30%、循环周期为6h时,对氨氮的去除率高达96.51%,TN去除率也达到88.81%,显著高于传统CASS工艺。Sen YANG等^[10]发现,固定生物膜活性污泥系统(IFAS)-SBR组合工艺对TN的去除效果明显优于传统SBR工艺。

笔者在CASS中添加硝化液回流和生物填料开发了CASS回流工艺(RCASS)与CASS复合生物膜工艺(IFAS-CASS),比较了CASS、RCASS、IFAS-CASS工艺的处理效果,分析了2种CASS改进工艺的强化作用,

研究并确定了RCASS和IFAS-CASS的最优运行参数,并对3种工艺的微生物群落结构进行分析。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用水采用人工配水模拟生活污水,COD、TP、 NH_4^+-N 、TN分别约为350、4、40、50 mg/L,组成为 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (333.3 mg/L)、 KH_2PO_4 (17.5 mg/L)、 NH_4Cl (152.8 mg/L)、 NaNO_3 (61.2 mg/L),适当添加微量元素。

实验装置如图1所示,尺寸为40 cm×20 cm×30 cm,主体为有机玻璃材质,有效容积14 L。生物选择区、预反应区和主反应区的容积比为2:3:15,生物选择区设有搅拌装置。RCASS工艺中增加了硝化液回流管道。IFAS-CASS工艺中关闭硝化液回流,添加1/3体积的聚氨酯(PU)海绵填料,填料尺寸为10 mm×10 mm×10 mm。

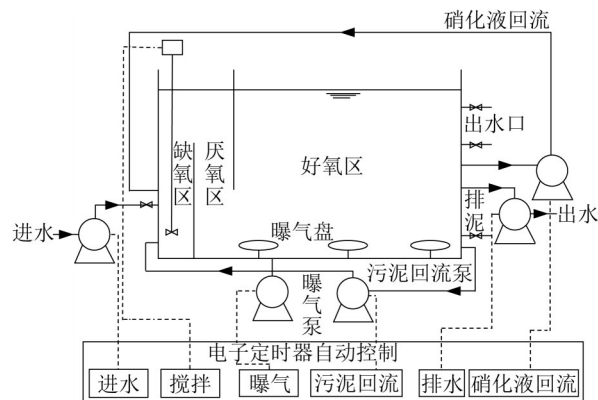


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

1.2 实验设计

向CASS反应装置加入3 L污水处理厂好氧活性污泥(MLSS为1 350 mg/L),以20 mL/min的流速泵入模拟污水,在溶解氧为2~4 mg/L、排水比为100%的条件下启动。运行20 d后出水水质稳定,反应装置启动完成。CASS的循环周期为24 h,进水阶段为6 h。

RCASS工艺的启动中,硝化液回流比为20%;IFAS-CASS工艺启动中,硝化液不回流,在装置主反应区添加聚氨酯海绵填料,填料与主反应区的体积比为1:3。IFAS-CASS循环周期为12 h,进水阶段设

计时间为4 h,污水流量为35 mL/min,其他启动条件与CASS工艺一致。当出水浓度趋于稳定时,可认为实验装置启动成功。研究循环周期、曝气时间、硝化液回流比对RCASS工艺运行效能的影响;研究循环周期、曝气时间、排水时间对IFAS-CASS工艺处理效果的影响;测定反应器活性污泥的微生物群落结构。在每个周期的进水阶段和排水阶段取样,测定COD和TN。

1.3 分析方法

COD用快速催化消解法(HJ/T 399—2007)测定,TN用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定, NH_4^+-N 用水杨酸分光光度法(GB 7479—1987)测定,DO用便携式溶解氧仪测定。微生物群落组成采用MiSeq高通量测序技术进行研究:分别取活性污泥样品和聚氨酯海绵填料水洗液于50 mL离心管中,离心速度5 000 r/min,离心时间15 min,将底部活性污泥置于冰箱-20℃冷冻层保存,污泥样本送至上海美吉生物有限公司进行测序。

2 结果与讨论

2.1 循环周期对强化去除污染物的影响

分别设置循环周期为6、8、12、24 h(见图2),研究不同循环周期条件下3种工艺对污染物的去除效果,整个实验过程3种工艺的污泥质量浓度分别达到2 800、2 900、3 100 mg/L,结果如图3所示。

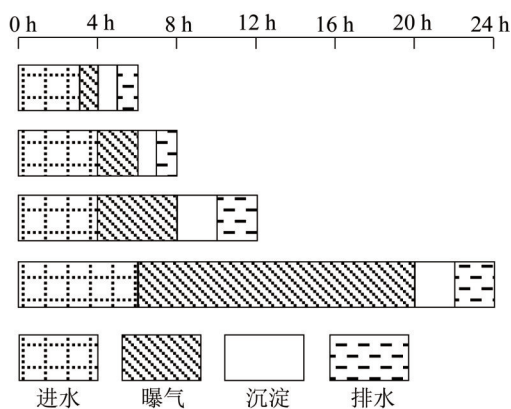


图2 不同循环周期的一周期内运行过程

Fig. 2 Operation process of one cycle in different cycle periods

由图3(a)可知,实际运行时3种工艺DO均在2.5~3.2 mg/L波动,充足的溶解氧为好氧微生物提供了好氧环境,保证硝化作用的顺利进行。由图3(b)可以看出,COD去除率由高到低依次为RCASS>CASS>IFAS-CASS。3种工艺对COD的去除率随循

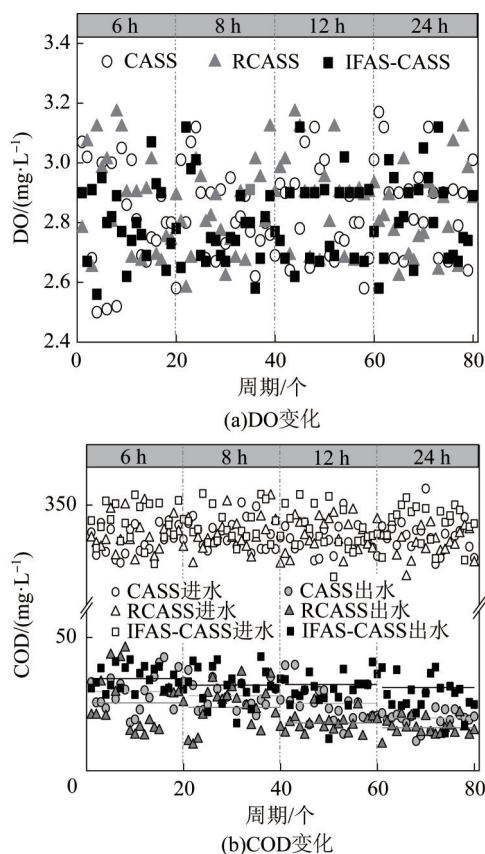


图3 不同循环周期下3种工艺的DO变化(a)和COD处理效果(b)

Fig. 3 DO changes (a) and COD treatment effects (b) of three processes under different cycle periods

环周期的增加而增大,循环周期为24 h时,平均去除率均高于90%。

循环周期对RCASS工艺的影响最大,循环周期为6、8、12、24 h时,COD平均去除率分别为92.25%、92.3%、94.35%、94.56%,且在12、24 h时,出水COD低于20 mg/L,优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准要求。由于有机物可通过硝化液的回流而被更好地降解利用,因此在所有循环周期中RCASS出水COD均低于CASS出水^[11]。但对于IFAS-CASS工艺,出水中的COD均高于CASS工艺,说明添加填料后对COD的降解能力有所减弱。这是因为PU内部易形成厌氧区,当水力停留时间较短时,COD不能作为碳源被充分利用。此外,1/3的填料填充比对中小型CASS装置而言比例较大,导致填料在反应器内的流动程度不高^[10],影响了氧的传递和利用^[12],进而影响COD的进一步降解。

3种工艺对TN和氨氮的去除率由大到小依次为

IFAS-CASS>RCASS>CASS(见图4)。出水总氮和氨氮均随循环周期的延长而降低,其中IFAS-CASS降幅最明显。循环周期从6 h增加到24 h时,IFAS-CASS出水TN下降了73.7%,低至4.65 mg/L,而CASS只降低了16.7%。8 h时IFAS-CASS出水TN就能达到城镇污水处理一级A标准要求,而RCASS需要24 h。循环周期为6、8 h时,IFAS-CASS出水氨氮平均分别为2.89、1.22 mg/L;循环周期为24 h时,RCASS和IFAS-CASS出水中的氨氮几乎一致,结果表明对于氨氮的处理,采用IFAS-CASS工艺可以明显缩短处理周期。

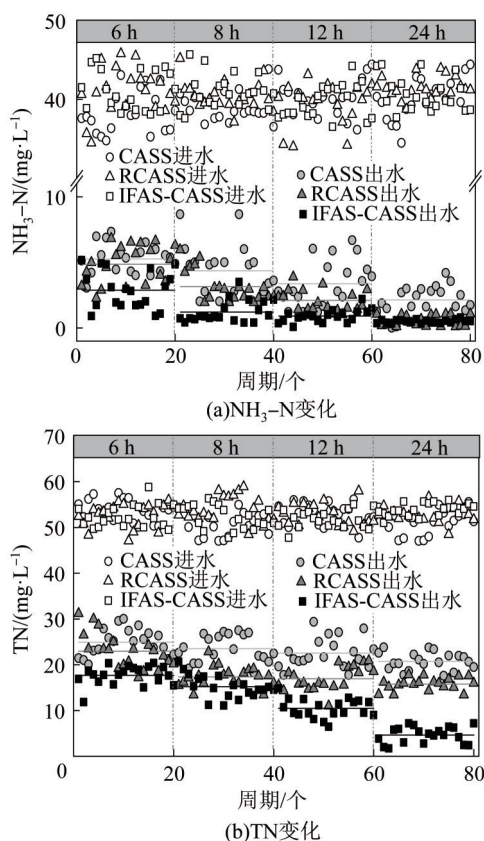


图4 不同循环周期下3种工艺对TN(a)和 $\text{NH}_3\text{-N}$ (b)的处理效果

Fig. 4 TN(a) and $\text{NH}_3\text{-N}$ (b) treatment effects of three processes under different cycle periods

IFAS-CASS内填料的孔隙结构为功能微生物的生长提供了所需的微氧环境^[13],创造了同步硝化反硝化的条件^[14],可强化TN和氨氮的去除。在悬浮污泥与填料微生物的共同作用下,IFAS-CASS对总氮的去除效果更显著。实验中IFAS-CASS出水氨氮始终维持在较低水平,说明添加聚氨酯海绵填料后,系统内世代生长周期较长的硝化细菌含量有所增

加。循环周期延长后,功能微生物与污水中污染物的接触时间也有所增加,而CASS与RCASS中没有大量剩余碳源支撑反硝化反应进行,因此其总氮去除效果随循环周期的增幅较小。而IFAS-CASS的反硝化作用发生在整个周期内,即使没有充足的碳源,IFAS-CASS内填料中的自养反硝化菌也能进行脱氮,自养反硝化菌^[15]和厌氧氨氧化细菌^[10]强化了脱氮效果。此外,循环周期延长使IFAS-CASS的传质效率大幅提高,系统内反硝化细菌对污染物的降解发挥了更大作用。

2.2 曝气时间对强化去除污染物的影响

根据实验结果选择循环周期为8 h,考察曝气时间分别为4、5、6 h时2种改进CASS工艺的处理效果,其运行过程如图5所示,对COD和TN的去除效果见图6。

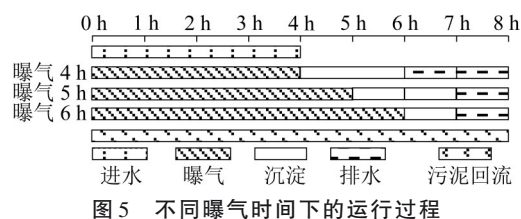


Fig. 5 Operation process with different aeration time

如图6(a)所示,RCASS对COD的去除效果高于IFAS-CASS,硝化液回流大大提高了对COD的处理效能。2种CASS改进工艺均有一定抗冲击负荷能力,在研究的曝气时间下对COD去除效果均较好,RCASS的COD去除率高达95%,IFAS-CASS的去除率达到90%左右,且出水 $\text{COD}<50\text{ mg/L}$,能够满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准要求。在改进的CASS反应器中,较少的曝气时间就能保证COD的去除。

图6(b)中,不同曝气时间下IFAS-CASS对TN的去除效果都好于RCASS;曝气时间为4、5、6 h时,RCASS中的出水TN平均分别为16.0、17.9、18.3 mg/L,而IFAS-CASS的出水TN平均分别低至13.6、14.2、14.8 mg/L。对于IFAS-CASS,曝气时间为4 h时的TN去除效果优于其他曝气条件,这是因为曝气时间为4 h时,反应器内发生反硝化作用的缺氧环境存在时间相对较长。RCASS有类似情况,当曝气时间延长至5、6 h时,出水TN升高,原因在于进入沉淀阶段系统内没有充足碳源支撑反硝化作用的进行。

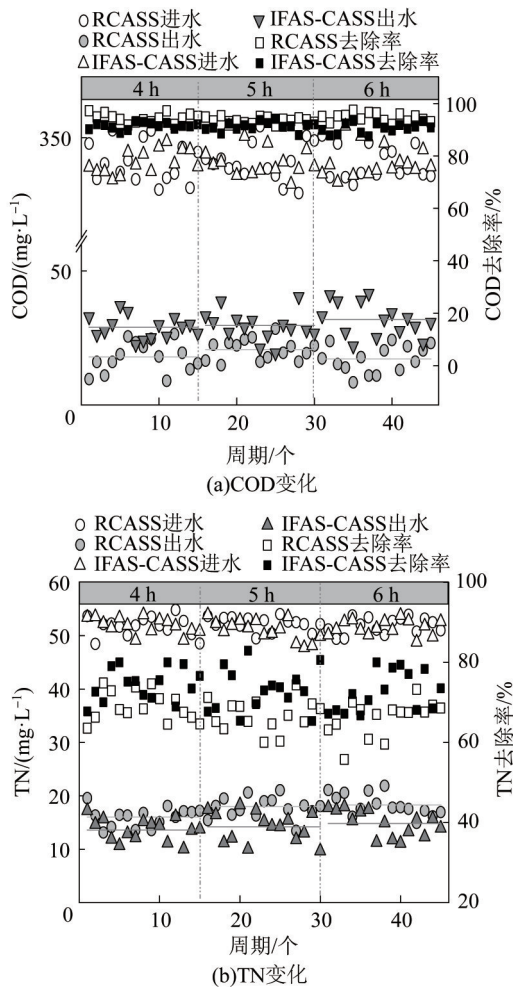


图6 不同曝气时间下2种改进工艺对COD(a)和TN(b)的处理效果

Fig. 6 Treatment effects of COD(a) and TN(b) in two improved processes with different aeration times

2.3 排水比对强化去除污染物的影响

在循环周期为8 h、曝气时间为4 h的条件下,设定排水比分别为30%、50%、90%,考察2种改进CASS强化去除污染物的效果,结果见图7。

由图7(a)可见,IFAS-CASS对COD的去除效果略低于RCASS,排水比为30%、50%、90%时,IFAS-CASS出水COD平均分别为26.4、28.4、30.0 mg/L,而RCASS出水COD均<25 mg/L。COD去除率随排水比例的增加而下降,是因为排水比较小时,COD的去除得益于装置中上一周期污水的稀释作用;排水比较大时,装置内的污泥可能流出,从而影响出水水质。

图7(b)中,不同排水比下,IFAS-CASS对TN的处理效果均优于RCASS。排水比为30%、50%、90%时,IFAS-CASS出水TN平均低于15 mg/L,均能满足

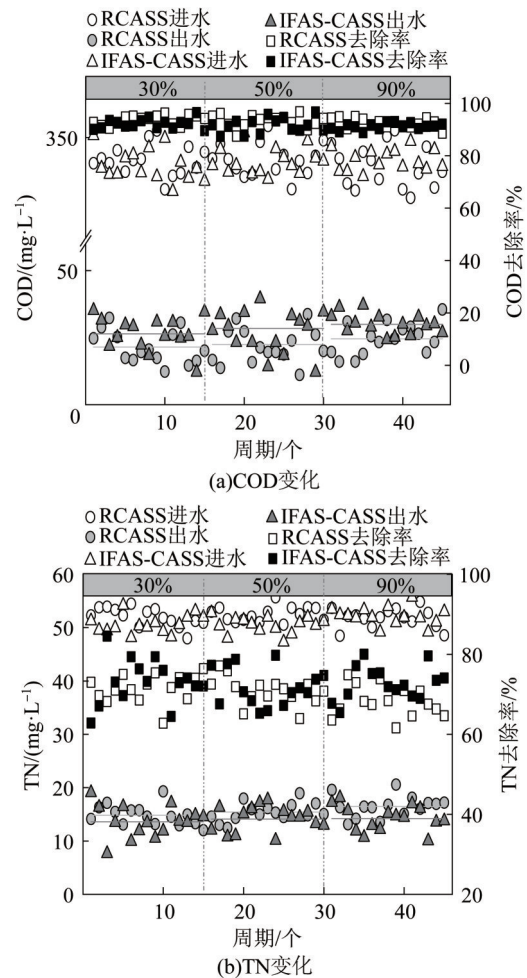


图7 不同排水比下2种改进工艺对COD(a)和TN(b)的处理效果

Fig. 7 Treatment effect of COD(a) and TN(b) in two improved processes with different drainage ratios

一级A标准要求,而RCASS尚不能达标。在2种CASS改进工艺中,出水TN均随排水比的减小而降低,并随排水比的改变在小范围内变化。实验结果表明,排水比较小时污水在装置内的停留时间增加,污染物能与微生物充分接触进而被去除。

2.4 回流比对污染物强化去除的影响

在循环周期为8 h、曝气时间为4 h的条件下,研究回流比为20%、35%、50%时RCASS对污染物强化去除的效果。实验结果表明,硝化液回流比为20%、35%、50%时,出水COD平均为24.5、23.8、23.8 mg/L,COD平均去除率分别为92.48%、92.62%、92.59%。可以看出调节硝化液回流比后RCASS工艺对COD的处理效果差异不大,出水COD均低于25 mg/L,满足一级A标准要求。回流比为20%时,COD处理效果相对较差,回

流比越大COD的处理效果越好,说明提高硝化液回流比可增加COD去除量,但整体上COD的去除受回流比影响较小。

硝化液回流比为20%、35%、50%时,出水TN平均为16.5、15.5、14.8 mg/L,平均去除率分别为68.12%、70.23%、72.09%。随着硝化液回流比的增加,RCASS对TN的去除能力逐渐增加。回流比为50%时,出水中的TN低于一级A标准规定的15 mg/L。反应器内回流比例较高时,更多的硝化液回流至缺氧区相对丰等,反硝化作用加强,TN的处理效果提升。

2.5 微生物群落特征变化

为了解3种CASS工艺中微生物群落结构,对IFAS-CASS填料和污泥、CASS污泥和RCASS污泥4个样本进行分析,见图8。

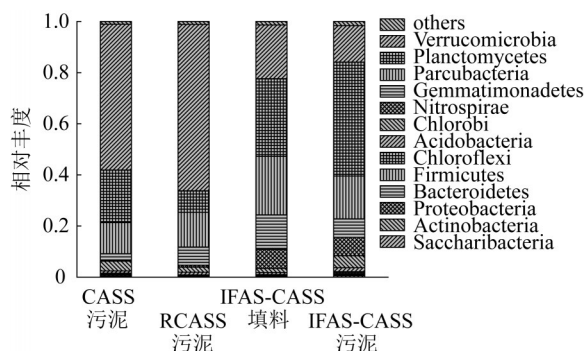


图8 不同反应器的细菌门分类水平群落结构

Fig. 8 Community structure of bacterial phylum classification levels in different reactors

由图8可见,4种样品共有24个菌门,主要包括Actinobacteria(放线菌门)、Proteobacteria(变形菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)、Firmicutes(厚壁菌门)、Chloroflexi(绿弯菌门)、Acidobacteria(酸杆菌门)、Chlorobi(绿菌门)、Nitrospirae(硝化螺旋菌门)、Gemmatimonadetes(芽单胞菌门)、Parcubacteria、Planctomycetes(浮霉菌门)、Verrucomicrobia(疣微菌门),可以看出不同样品在门水平上的优势物种可能相同,但相对丰度存在明显差异^[16]。Saccharibacteri菌门是目前细菌群落中最大的菌门,在污水中大量存在。Saccharibacteri在降解各种有机物,尤其是糖类化合物中起到重要作用^[17]。RCASS工艺中Saccharibacteri含量最高,而在IFAS-CASS中其含量最低。在改进的CASS中Proteobacteria(变形菌门)和Bacteroidetes(拟杆菌门)丰度增加,说明增加硝化液回流和填料对提高生物群落多样性起到促进作用,也促进了有机物的降解。放

线菌门可将硝酸盐转化为 N_2O ,促进系统中氮的转化与降解。变形菌门是细菌中最大的一门,营兼性厌氧及异养生活有利于水中氮的去除。IFAS-CASS中的Actinobacteria和Proteobacteria丰度要高于CASS和RCASS,因此IFAS-CASS可以更好地强化去除含氮污染物。

在4种样品中均检测到Nitrospirae(硝化螺旋菌门),其中的Nitrospira(硝化螺旋菌属)是常见的硝化细菌,其在脱氮过程中扮演重要角色,是污水处理过程中不可或缺的微生物^[18]。Planctomycetes(浮霉菌门)内包含厌氧氨氧化细菌,其作用是促使氨氮与亚硝态氮发生反应直接生成氮气,将氮从系统内去除。

3 结论

(1) RCASS和IFAS-CASS均有强化CASS去除总氮的能力。IFAS-CASS中添加填料,减弱了COD的降解能力,却更有利于总氮的去除。当循环周期为24 h、进水TN为50 mg/L时,CASS的出水TN为20.8 mg/L,而RCASS和IFAS-CASS出水TN分别低至14.8、4.65 mg/L。

(2)各工艺的处理效果均随循环周期的延长而增加;曝气时间对COD的去除效果影响较小,曝气时间增加会增加出水中的TN。较小的排水比更利于改进工艺对COD和TN的去除。回流比增加可促进RCASS对COD和TN的去除,回流比为50%时出水COD和TN分别为23.8、14.8 mg/L。在最优运行条件下,CASS改进工艺能够发挥最佳处理作用,强化TN的去除。

参考文献

- [1] 高斌雄. 某污水处理厂CASS工艺脱氮除磷效果分析[J]. 广东化工, 2020, 47(6): 180-181.
GAO Binxiang. Analysis of nitrogen and phosphorus removal by CASS process in a sewage treatment plant[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(6): 180-181.
- [2] 高健磊, 翁伟, 闫怡新, 等. 改良CASS城镇污水厂处理高比例工业废水的运行[J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 125-128.
GAO Jianlei, WENG Wei, YAN Yixin, et al. Operation of municipal wastewater treatment plant with improved CASS process for high proportion of industrial wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(3): 125-128.
- [3] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. Environment Interna-

- tional, 2016, 92/93:11-22.
- [4] ZHANG Fang, LI Ping, CHEN Mengsi, et al. Effect of operational modes on nitrogen removal and nitrous oxide emission in the process of simultaneous nitrification and denitrification[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 280:549-557.
- [5] 王加蒙, 彭澄瑶, 辛振兴, 等. SBR 分段进水工艺提高污水厂的脱氮效率[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5):2131-2136.
- WANG Jiameng, PENG Chengyao, XIN Zhenxing, et al. Ways of SBR step feed process to improve efficiency of nitrogen removal in wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5):2131-2136.
- [6] 郑俊田, 郑俊, 程洛闻, 等. 混合液回流比对多点进水新型 A/O/A/O 泥膜耦合工艺脱氮除磷的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5):1744-1752.
- ZHENG Juntian, ZHENG Jun, CHENG Luowen, et al. Influence of mixed liquid reflux ratio on a new multiple-inflow A/O/A/O sludge-biofilm coupling process for denitrification and phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5):1744-1752.
- [7] PEDROUSO A, TRELA J, VAL DEL RIO A, et al. Performance of partial nitrification-anammox processes at mainstream conditions in an IFAS system[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 250:109538.
- [8] 赵亮, 张洛红, 王鑫浩, 等. PVA 填料对低温生活污水生物脱氮的影响[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(2):181-185.
- ZHAO Liang, ZHANG Luohong, WANG Xinhao, et al. Effect of PVA filler on biological denitrification of low temperature domestic sewage[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2018, 32(2):181-185.
- [9] 李济源, 孙俊伟, 曹文平, 等. 复合式 CASS 反应器处理酒精废水特性研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(10):95-98.
- LI Jiyuan, SUN Junwei, CAO Wenping, et al. Characteristics of treating alcohol wastewater by using a hybrid Cass bioreactor[J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(10):95-98.
- [10] YANG Sen, XU Shengnan, MOHAMMED A, et al. Improving nitrogen removal in an IFAS nitrification-anammox reactor treating lagoon supernatant by manipulating biocarrier filling ratio and hydraulic retention time[J]. Biochemical Engineering Journal, 2019, 152:107365.
- [11] GAO Feng, NAN Jun, LI Shengnan, et al. Modeling and simulation of a biological process for treating different COD:N ratio wastewater using an extended ASM1 model[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332:671-681.
- [12] 王亚举, 黄胜, 杨慧敏, 等. 不同填充率对 MBBR 污水处理效果影响研究[J]. 广东化工, 2017, 44(8):149-150.
- WANG Yaju, HUANG Sheng, YANG Huimin, et al. Study on the effect of different filling rate on MBBR wastewater treatment[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(8):149-150.
- [13] YANG Yandong, ZHANG Liang, CHENG Jun, et al. Achieve efficient nitrogen removal from real sewage in a plug-flow integrated fixed-film activated sludge (IFAS) reactor via partial nitrification/anammox pathway[J]. Bioresource Technology, 2017, 239:294-301.
- [14] 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 等. 碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10):3807-3813.
- TAN Chong, LIU Yingjie, WANG Wei, et al. Effect of carbon/nitrogen ratio on short-cut nitrification and denitrification of polyurethane biofilm reactor[J]. Environmental Science, 2014, 35(10):3807-3813.
- [15] BAI Yang, ZHANG Yaobin, QUAN Xie, et al. Enhancing nitrogen removal efficiency and reducing nitrate liquor recirculation ratio by improving simultaneous nitrification and denitrification in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) process[J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2016, 73(4):827-834.
- [16] LABUS J S, HOLLISTER E B, JACOBS J, et al. Differences in gut microbial composition correlate with regional brain volumes in irritable bowel syndrome[J]. Microbiome, 2017, 5(1):49.
- [17] 张从轩, 刘舒巍, 谢涛, 等. 多壁碳纳米管短期作用对厌氧颗粒污泥的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10):5375-5380.
- ZHANG Congxuan, LIU Shuwei, XIE Tao, et al. Effect of multi-walled carbon nanotube exposure in short term on anaerobic granular sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10):5375-5380.
- [18] 顾国海, 李梦莎. 滨海不同湿地类型土壤微生物功能多样性[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24):355-358.
- GU Guohai, LI Mengsha. Soil microbial functional diversity of different types of wetlands in coastal areas[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(24):355-358.
- [作者简介] 郑丽丽(1989—), 工程师。电话: 15652937693, E-mail: zll890831@163.com。
- [收稿日期] 2022-11-20(修改稿)