

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.013

低温下改良SBBR脱氮除磷效能及微生物种群研究

徐凤英¹, 樊科峰¹, 周炯¹, 龚本洲^{1,2}, 孟红¹, 和雪杰¹,
周健¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 长江勘测规划设计
研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以SBBR高标准脱氮除磷系统为研究对象,考察了温度对该系统脱氮除磷效能及微生物种群的影响,提出了低温下SBBR系统高标准脱氮除磷的运行策略。结果表明,温度对系统的脱氮效能影响显著。当温度为10℃、COD负荷为0.82 kg/(m³·d)时,系统对NH₄⁺-N、TN的平均去除率分别为72.4%、70.1%,与温度为24℃时相比,去除率分别降低26.4%和26.1%;通过调整低温(10℃)下SBBR系统的运行工况及进水方式,可以有效强化SBBR脱氮除磷效能,在COD负荷为0.41 kg/(m³·d)、运行工况为进水6 min—厌氧2 h—好氧9 h—缺氧3 h(二次进水)—好氧9 h—沉淀0.8 h—排水6 min条件下,对COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P的去除率分别提高至95.3%、99.2%、95.9%、95.1%,出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)类Ⅳ类水标准。16S rRNA Amplicon高通量测序结果表明,温度对功能微生物种群结构的影响不显著,对脱氮除磷功能菌属的相对丰度影响显著。当温度由24℃降低至10℃时,硝化菌属*Nitrospira*、反硝化菌属*Flavobacterium*和*Thermomonas*、聚磷菌属*Candidatus_Accumulibacter*的相对丰度分别由1.47%、9.17%、6.27%、2.70%降至0.67%、2.66%、1.82%、0.30%;而异养硝化好氧反硝化菌属*Pseudomonas*、反硝化聚磷功能菌属*Dechloromonas*的相对丰度分别由0.07%、0.12%上升至1.05%、1.03%。

关键词: 低温; SBBR; 脱氮除磷; 种群

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0082-06

Nitrogen and Phosphorous Removal Performance and Microbial Community of Modified SBBR at Low Temperature

XU Feng-ying¹, FAN Ke-feng¹, ZHOU Jiong¹, GONG Ben-zhou^{1,2}, MENG Hong¹,
HE Xue-jie¹, ZHOU Jian¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The effects of temperature on nitrogen and phosphorus removal efficiency and microbial community of a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) under strict discharge standard were investigated, and the operational strategy for SBBR to achieve efficient nitrogen and phosphorus removal at low temperature was introduced. The temperature had a significant effect on the nitrogen removal efficiency of the system. When the temperature and COD loading rate were 10℃ and 0.82 kg/(m³·d), the

通信作者: 周健 E-mail: zhoujian126@126.com

average removal efficiencies of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 72.4% and 70.1%, respectively, which decreased by 26.4% and 26.1% compared with those at 24 °C. The removal efficiency of nitrogen and phosphorus was effectively enhanced by adjusting the operating condition and feeding mode of the SBBR at low temperature (10 °C). When the operating conditions were as follows: COD loading rate of 0.41 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and cyclic time consisting of filling (6 min), anaerobic reaction (2 h), aerobic reaction (9 h), anoxic reaction (3 h, secondary filling), aerobic reaction (9 h), settling (0.8 h) and drainage (6 min), the removal efficiencies of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ increased to 95.3%, 99.2%, 95.9% and 95.1%, respectively, and the effluent quality met the class IV criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The 16S rRNA Amplicon high-throughput sequencing indicated that temperature had no significant effect on the microbial community composition, but had a significant effect on the relative abundance of denitrifying and phosphorous accumulating genera. When the temperature decreased from 24 °C to 10 °C, the relative abundance of *Nitrospira* (nitrifying bacterium), *Flavobacterium*, *Thermomonas* (denitrifying bacteria) and *Candidatus_Accumulibacter* (phosphorous accumulating bacterium) decreased from 1.47%, 9.17%, 6.27% and 2.70% to 0.67%, 2.66%, 1.82% and 0.30%, respectively. In contrast, the relative abundance of *Pseudomonas* (heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium) and *Dechloromonas* (denitrifying phosphorus accumulating bacterium) increased from 0.07% and 0.12% to 1.05% and 1.03%, respectively.

Key words: low temperature; SBBR; nitrogen and phosphorus removal; community

污水厂排放的尾水中携带大量氮、磷等污染物进入受纳水体,对于环境容量小的敏感水环境造成严重威胁。温度对生物处理效能的影响显著。特别是温度 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硝化和反硝化菌属的活性降低,生物脱氮效能显著下降^[1-2]。温度不仅影响微生物的代谢活动,而且还影响微生物群落的多样性^[3],夏季活性污泥系统生物多样性及脱氮除磷功能微生物的丰度均高于冬季^[4]。目前,对于提高低温下生物脱氮除磷效能的主要途径有反应器保温、增加泥龄、降低负荷、改变运行工况等^[2]。对于低温下城镇污水的处理,采用倒置A²O工艺时,通过提高污泥浓度和DO浓度的方法,TN去除率仅提高至62%^[5]。采用A²O—BAF工艺时,将活性污泥法和生物膜法相结合,通过降低有机负荷、增大曝气量,TN去除率可提高至81.5%^[6]。赵宪章等^[7]采用多级AO工艺,通过增设组合填料,使得城镇污水厂出水水质达到一级A标准。上述途径虽然在一定程度上提高了低温下的脱氮效能,但对于城镇污水处理,在不增设工艺单元的条件下,鲜见通过运行工况调整等非工程措施在低温下实现氮、磷的深度去除,从而使出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)类IV类水的报道。

笔者以改良SBBR高标准脱氮除磷系统为研究对象,考察温度对系统脱氮除磷效能的影响;重点探讨低温下城镇污水SBBR高标准脱氮除磷系统的运行策略及关键工况参数;同时,采用16S rRNA Amplicon高通量测序技术,分析不同温度条件下系统微生物种群结构及其功能微生物,旨在为现有污水厂提标改造提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示。

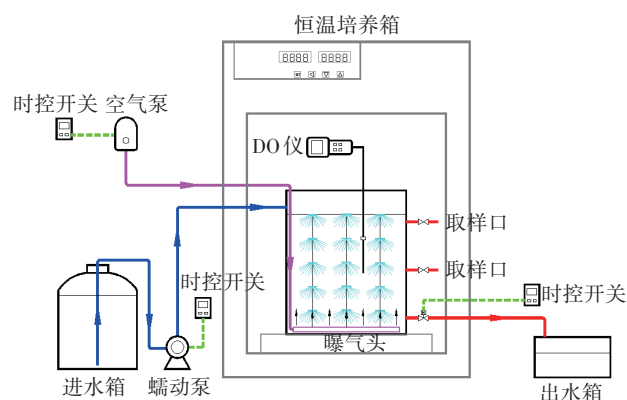


图1 SBBR试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of SBBR test

SBBR反应器有效容积为15 L, $L \times B \times H$ 为35 cm \times 20 cm \times 30 cm, 内设组合填料, 挂膜密度为40%; 进水由蠕动泵自水箱抽取, 采用空气泵经曝气砂头供氧, 溶解氧(DO)为3~4 mg/L, 采用恒温箱控制反应器温度。

1.2 试验水质

试验采用人工配水模拟城市污水, 所用试剂包括乙酸钠、氯化铵、磷酸氢二钾、氯化钙、硫酸铁, 同时添加1 mL/L微量元素。具体水质: COD为380~440 mg/L, 平均为410 mg/L; NH_4^+-N 为40~50 mg/L, 平均值为43 mg/L; TN为42~52 mg/L, 平均值为46 mg/L; $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为4~6 mg/L, 平均值为5 mg/L; pH为7.0~8.0, 平均值为7.6。

1.3 试验方法

反应器COD负荷为0.82 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$), 周期运行工况: 进水6 min—厌氧2 h—好氧9 h—沉淀0.8 h—排水6 min, 好氧段DO为3~4 mg/L。分别控制两个反应器的温度为10℃(1 $^\circ$)和24℃(2 $^\circ$)。试验期间测定COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等水质指标。同时, 采集不同温度下的生物样品进行16S rRNA Amplicon高通量测序。

在此基础上, 根据前期研究结果, 调整低温(10℃)条件下反应器的运行工况和进水方式, 考察改良SBBR系统的高标准脱氮除磷效能。COD负荷为0.41 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$), 周期运行工况: 进水6 min—厌氧2 h—好氧9 h—缺氧3 h—好氧9 h—沉淀0.8 h—排水6 min, 并在缺氧3 h时对系统进行二次进水, 进水量为0.75 L, 好氧段DO为3~4 mg/L。试验期间测定COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等水质指标。

1.4 分析项目及方法

试验过程中, COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等水质指标均按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。16S rRNA Amplicon高通量测序通过捕捉细菌的引物27F (5'-AGAGTTT-GATCMTGGCTCAG-3')和533R (5'-TTACCGCG-GCTGCTGGCAG-3')扩增16S rRNA基因的V1-V3区域, 再进行测序分析探究系统微生物种群的变化规律。

2 结果与讨论

2.1 温度对SBBR系统脱氮除磷效能的影响

图2为温度对SBBR反应器性能的影响。

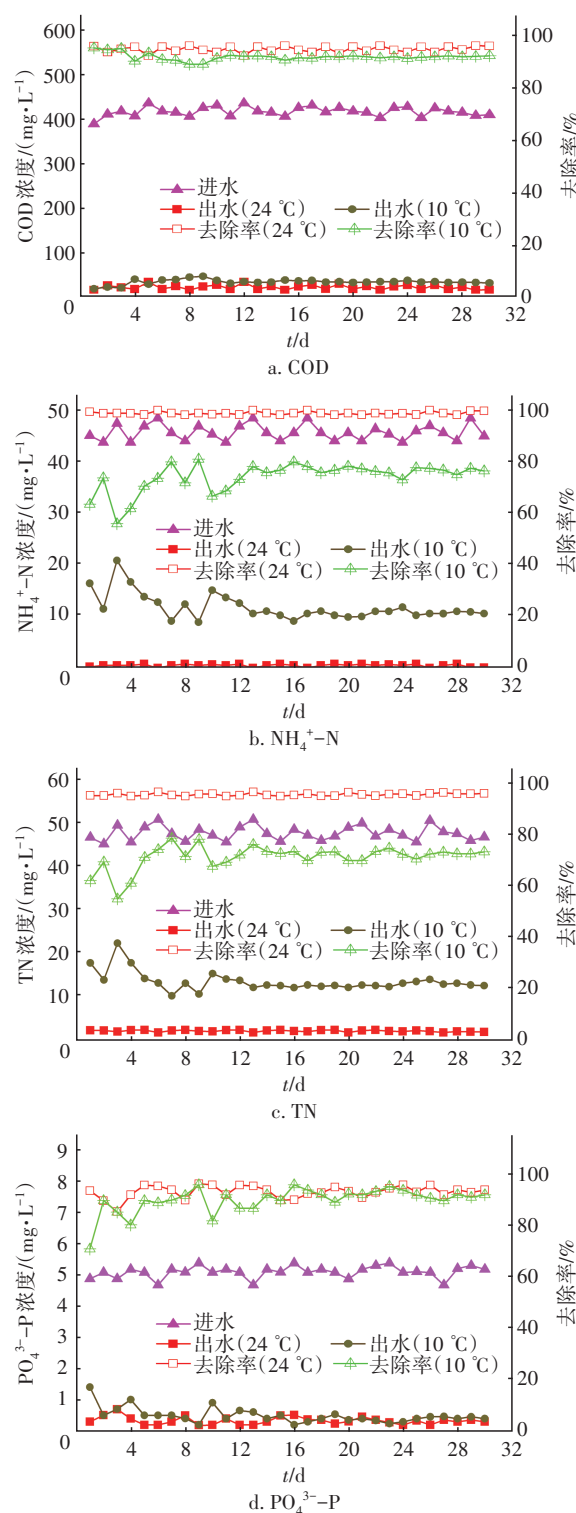


图2 温度对SBBR反应器性能的影响

Fig.2 Effect of temperature on performance of SBBR reactor

由图2可以看出, 当温度为24和10℃时, 出水COD、 NH_4^+-N 、TN的平均值分别为17.2、0.5、1.8 mg/L和32.4、12.0、13.9 mg/L, 平均去除率分别为

95.8%、98.8%、96.2%和92.1%、72.4%、70.1%。可见,温度对系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除影响显著。硝化细菌的最适生长温度为15~35℃^[8],反硝化菌最适温度为30℃^[9]。当温度为10℃时,系统中硝化菌和反硝化菌的生物活性均受到明显抑制,硝化过程严重受阻,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增大,导致系统TN去除率下降。此外,本系统中,低温条件下对TN的去除率(70.1%)高于相关报道(对TN的去除率约为60%)^[5,10]。分析认为,本系统采用的SBBR系统集成成了生物膜工艺和序批式运行模式的优点,有利于世代时间较长的微生物(如长泥龄的硝化菌等)附着生长在填料表面,系统内能维持更多的生物量,且具有良好的同步硝化反硝化脱氮效能,进而在一定程度上增强了系统抗低温的能力。

由图2(d)可知,当温度为24和10℃时,系统出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均值分别为0.35和0.45 mg/L,平均去除率分别为93.1%和91.2%。可见,温度对系统去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的影响不显著。聚磷菌(PAOs)是一种嗜冷性细菌,PAOs的温度系数较低,其活性受温度影响较小,在温度较低的条件下,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果的影响不显著,这与本研究结果一致。

2.2 改良SBBR系统的低温脱氮除磷效能

低温条件下,对反应器的运行工况及进水方式进行了优化,结果表明,优化运行后,出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度分别为19.3、0.3、2.0、0.25 mg/L,平均去除率显著提高至95.3%、99.2%、95.9%、95.1%,高于现有研究报道的低温条件下通过生物强化或者工艺调控达到的强化脱氮除磷效果^[7,11],实现了低温下出水水质达到地表类Ⅳ类水标准。图3为10℃条件下1个周期内改良SBBR系统的效能。可知,在1个周期运行过程中,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN浓度呈现逐渐降低的趋势。其中,COD浓度在反应初期厌氧2 h内迅速减少至77 mg/L,降解速率高达96.5 mg/(L·h)。分析认为,进水初期,一方面因为有机物被反硝化菌利用,将上一周期残留的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 还原为氮气;另一方面,低温下PAOs利用水中挥发性脂肪酸(VFA)将有机物转化为内碳源,故在较短时间内COD浓度急剧降低。随着反应时间的增加,水中剩余的可降解COD继续被异养反硝化菌利用进行反硝化,实现对COD的进一步去除。反应开始的第2~4小时(第一段好氧运行), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降解速率为3.9 mg/(L·h),第4~10

小时,降解速率降为1 mg/(L·h);第15~23小时(第二段好氧运行), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解速率为0.4 mg/(L·h),23 h后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化完全。分析认为,反应初期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低较快,主要是因为系统内填料上附着的微生物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有吸附作用;另外,通过增加好氧段,再次对系统进行充氧,可保证低温条件下良好的硝化效果,这也是生物脱氮的前提。在第6小时(第一段好氧运行)系统开始出现 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 积累,第12小时的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 积累量达到最高(7.5 mg/L)。在反应器第一次、第二次进水时,反应器处于缺氧阶段,反硝化菌利用进水携入的碳源进行反硝化,TN浓度得以降低。

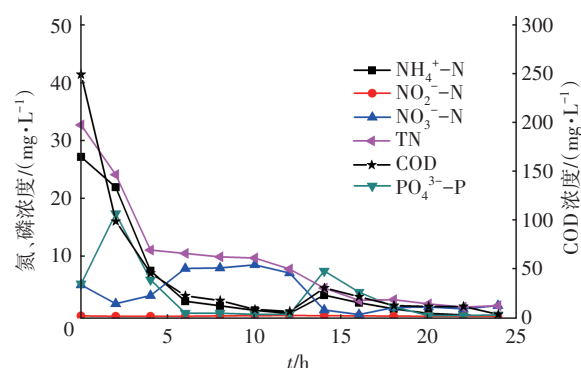


图3 10℃条件下1个周期内改良SBBR系统的效能

Fig.3 Performance of improved SBBR system in one cycle at 10 °C

0~2 h阶段,首先经过缺氧反硝化去除上一周期残留的硝态氮后,聚磷菌开始进行厌氧释磷,系统液相中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度逐渐增加,由5.58 mg/L增加到17.65 mg/L。3~11 h的好氧阶段,聚磷菌(PAOs)通过氧化分解体内聚羟基丁酸酯(PHB)提供的能量来吸收水中的磷酸盐,使液相中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度逐渐降低,由17.65 mg/L降至0.32 mg/L。第20小时之后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度基本不变。分析认为,一方面系统采取序批式运行,厌氧、好氧交替进行,为PAOs优势富集提供了良好条件;另一方面,PAOs本身是一种嗜冷性细菌,所以,低温条件下除磷效率更高。

2.3 高通量测序分析

2.3.1 系统种群的多样性

24和10℃条件下系统生物样品的16S rRNA Amplicon高通量测序结果表明,随着温度的降低,微生物群落丰富度和种群多样性均减少(见表1)。与24℃系统相比,10℃系统的Chao指数和Ace指数均下降,表明10℃系统中微生物群落丰富度低于

24℃的。10℃系统的微生物 Shannon 值低于 24℃的,表明 10℃系统中微生物种群多样性较低。

表 1 微生物群落的样本信息和统计结果

Tab.1 Sample information and statistics results of microbial community

温度/℃	序列数	OTU	Ace	Chao	Shannon	Simpson
24	27 981	709	762	747	4.4	0.04
10	29 028	620	704	691	4.1	0.05

2.3.2 微生物种群结构分析

图 4 为不同温度时 SBBR 系统门水平下微生物种群及其相对丰度。

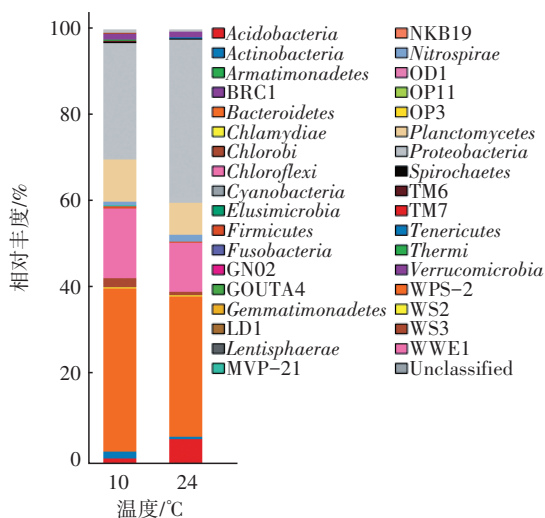


图 4 不同温度时 SBBR 系统门水平下微生物种群及其相对丰度

Fig.4 Microbial population and relative abundance at the phylum level of SBBR system at different temperatures

由图 4 可知,10℃时,门水平上系统微生物种群相对丰度大于 0.5% 的共有 8 类,分别为拟杆菌门 *Bacteroidetes* (37.55%)、变形菌门 *Proteobacteria* (26.74%)、绿弯菌门 *Chloroflexi* (16.16%)、浮霉菌门 *Planctomycetes* (9.55%)、绿菌门 *Chlorobi* (2.03%)、放线菌门 *Actinobacteria* (1.69%)、酸杆菌门 *Acidobacteria* (1.03%) 和硝化螺旋菌门 *Nitrospirae* (0.67%)。其中,硝化螺旋菌门内含有硝化菌属,变形菌门内含有反硝化菌属和聚磷菌属^[12]。24℃时,系统微生物的门种类未发生明显变化,与脱氮除磷相关的功能菌门仍然是硝化螺旋菌门和变形菌门,但是其相对丰度却明显增加,分别由 0.67%、26.74% 增加至 1.46%、37.87%。而其余门类 *Bacteroidetes*、*Chloroflexi*、*Planctomycetes*、*Chlorobi* 相对丰度分别由

37.55%、16.16%、9.55%、2.03% 降至 32.46%、11.28%、7.12%、0.88%。

图 5 为不同温度时 SBBR 系统属水平下微生物种群及其相对丰度。可知,温度对功能微生物种群结构的影响不显著,对功能菌属的相对丰度影响显著。10℃时,系统中脱氮除磷功能菌属主要有硝化菌属 *Nitrospira* (0.67%)、反硝化菌属 *Flavobacterium* (2.66%)、*Thermomonas* (1.82%)、聚磷菌属 *Candidatus_Accumulibacter* (0.30%),以及异养硝化好氧反硝化菌属 *Pseudomonas* (1.05%)、反硝化聚磷功能菌属 *Dechloromonas* (1.03%)。当温度由 24℃降至 10℃时, *Nitrospira*、*Flavobacterium*、*Thermomonas*、*Candidatus_Accumulibacter* 相对丰度分别由 1.47%、9.17%、6.27%、2.70% 降至 0.67%、2.66%、1.82% 和 0.30%,而 *Pseudomonas*、*Dechloromonas* 相对丰度分别由 0.07%、0.12% 上升至 1.05%、1.03%。

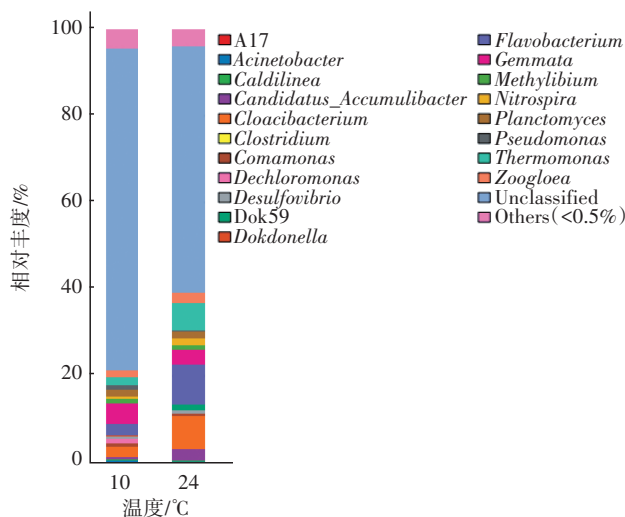


图 5 不同温度时 SBBR 系统属水平下微生物种群及其相对丰度

Fig.5 Microbial population and relative abundance at the genus level of SBBR system at different temperatures

3 结论

① 温度对 SBBR 脱氮效能的影响显著。10℃时,系统对 NH_4^+-N 和 TN 的平均去除率较 24℃的分别降低 26.4%、26.1%。

② 低温条件下,通过调整运行工况和进水方式,可以有效强化 SBBR 的脱氮除磷效能,在不增设工艺单元的前提下,使出水水质达到高标准。

③ 温度对 SBBR 系统脱氮除磷功能菌属种类的影响不显著,对其相对丰度的影响显著。当温度

从24℃降至10℃时,系统中脱氮除磷功能菌属中硝化菌属 *Nitrospira*、反硝化菌属 *Flavobacterium* 和 *Thermomonas*、聚磷菌属 *Candidatus_Accumulibacter* 的相对丰度降低,异养硝化好氧反硝化菌属 *Pseudomonas*、反硝化聚磷功能菌属 *Dechloromonas* 的相对丰度升高。

参考文献:

- [1] REN Q K, YU Y, ZHU S Y, *et al.* Characterization of a novel micro-pressure swirl reactor for removal of chemical oxygen demand and total nitrogen from domestic wastewater at low temperature [J]. *Biodegradation*, 2017, 28(2/3): 145-157.
- [2] LIU X Y, ZENG A, WANG Y T, *et al.* Comparison and strategy of nitrogen removal at different low temperatures in a pilot-scale A²/O system [J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(19): 2473-2481.
- [3] WANG Q B, CHEN Q W. Simultaneous denitrification and denitrifying phosphorus removal in a full-scale anoxic-oxic process without internal recycle treating low strength wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 39: 175-183.
- [4] WANG Z B, MIAO M S, KONG Q, *et al.* Evaluation of microbial diversity of activated sludge in a municipal wastewater treatment plant of Northern China by high-throughput sequencing technology[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 57(50): 23516-23521.
- [5] 陈杰云,张智,李勇,等. 处理低碳源污水的倒置A²/O工艺强化脱氮调控[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(19): 32-36.
CHEN Jieyun, ZHANG Zhi, LI Yong, *et al.* Comprehensive regulation technology for enhancing nitrogen removal from low-carbon wastewater in reversed A²/O process[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(19): 32-36 (in Chinese).
- [6] 王建华,陈永志,彭永臻. 低碳氮比实际生活污水A²O-BAF工艺低温脱氮除磷[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(9): 1195-1200.
WANG Jianhua, CHEN Yongzhi, PENG Yongzhen. Biological nutrients removal from domestic wastewater with low carbon-to-nitrogen ratio in A²O-BAF system at low temperature [J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9): 1195-1200 (in Chinese).
- [7] 赵宪章,董文艺,王宏杰,等. 组合填料强化多级AO工艺处理低温污水脱氮效果[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 49-53.
ZHAO Xianzhang, DONG Wenyi, WANG Hongjie, *et al.* Enhancing nitrogen removal efficiency of multistage AO process with combined carrier for low temperature wastewater treatment [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3): 49-53 (in Chinese).
- [8] 高欣,高梦国,周丹丹,等. 前置反硝化-曝气生物滤池低温脱氮效能中试研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(6): 76-79.
GAO Xin, GAO Mengguo, ZHOU Dandan, *et al.* Pilot scale study on nitrogen removal efficiency of predenitrification biological aerated filter under low temperature condition [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(6): 76-79 (in Chinese).
- [9] LI S M, DO G S, TANG F B, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal of modified A²/O process on low-carbon domestic sewage under low temperature [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 777: 187-191.
- [10] 李莉,张智,周芳. 改良型ICEAS工艺处理低温生活污水的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(3): 432-436.
LI Li, ZHANG Zhi, ZHOU Fang. Study on domestic sewage treatment by using modified ICEAS process at low temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(3): 432-436(in Chinese).
- [11] 陈翰,马放,李昂,等. 低温条件下污水生物脱氮处理研究进展[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(8): 37-43.
CHEN Han, MA Fang, LI Ang, *et al.* Research progress in biological nitrogen removal from wastewater under low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(8): 37-43 (in Chinese).
- [12] 徐林建,潘杨,章豪,等. 好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3179-3185.
XU Linjian, PAN Yang, ZHANG Hao, *et al.* Effects of aerobic carbon sources on biofilm with simultaneous phosphate removal and enrichment [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3179-3185 (in Chinese).

作者简介:徐凤英(1995-),女,四川射洪人,硕士研究生,主要研究方向为废水处理技术。

E-mail:xfyhlh@163.com

收稿日期:2019-12-08

修回日期:2020-01-19

(编辑:任莹莹)