



低温同步短程硝化反硝化可行性研究

张邗昊^{1,2}, 张 群^{1,2}, 孙郁聪^{1,2}, 韩 鹏^{1,2},
陈元晗^{1,2}, 刘 庆^{1,2}, 徐光景^{1,2}

(1. 辽宁省近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 辽宁大连 116023;
2. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023)

[摘要] 为了解决市政废水生物脱氮过程中碳源不足的问题, 利用多循环序批式反应器(MCSBR)建立了基于混合生物膜和悬浮污泥的主流同步短程硝化反硝化工艺。重点考察了温度对生物膜、悬浮污泥短程硝化和反硝化效果的影响, 并分析了低温条件下同步短程硝化反硝化的可行性。周期实验结果表明, 在好氧阶段, NO_2^- -N 无显著上升, 而总氮明显下降, 且无明显的 NO_3^- -N 积累, 说明 MCSBR 内发生了同步短程硝化反硝化。随着温度的降低, 氨氧化和反硝化容积负荷均呈下降趋势, 但混合体系氨氧化活性始终低于其反硝化活性, 保证了反硝化菌较亚硝酸盐氧化菌(NO_B)竞争 NO_2^- -N 的优势。此外, 高通量测序结果表明脱氮菌主要分布在生物膜中, 受低温影响相对较小。因此, 在低温条件下, 通过反硝化菌与 NO_B 竞争 NO_2^- -N, 进而抑制 NO_B 生长是可行的。

[关键词] 市政废水; 温度; 多循环; 生物膜; 悬浮污泥

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)05-0083-06

Feasibility of simultaneous nitrification and denitrification at low temperature

ZHANG Zhihao^{1,2}, ZHANG Qun^{1,2}, SUN Yucong^{1,2}, HAN Peng^{1,2},
CHEN Yuanhan^{1,2}, LIU Qing^{1,2}, XU Guangjing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Marine Environmental Science and Technology of Liaoning Province, Dalian 116023, China; 2. Dalian Ocean University, School of Marine Science and Environment Engineering, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to solve carbon source shortage for the treatment of municipal wastewater, a mainstream simultaneous nitrification and denitrification process was developed in a multi-cycle sequential batch reactor (MCSBR) with integrated biofilm and suspended sludge. The effect of temperature on nitrification and denitrification of biofilm and/or suspended sludge was detailly investigated for the feasibility analysis of mainstream simultaneous nitrification and denitrification process under low temperature. Cycle studies demonstrated that nitrite with little nitrate did not significantly increase, but total nitrogen significantly decreased in aerobic stage, indicating simultaneous nitrification and denitrification taking place in MCSBR. Batch tests showed that both rates of ammonia oxidation and denitrification decreased with decreasing temperature, but nitrification rate was slowed down more than denitrification rate, especially in the integrated biofilm and suspended sludge, which gave denitrifiers the competitive advantage in NO_2^- -N over nitrite oxidizing bacteria (NO_B). Moreover, high-throughput sequencing data showed that N-removal bacteria mainly distributed in biofilm and were relatively less affected by low temperature. As such, it was feasible to suppress NO_B using nitrite competition between NO_B and denitrifiers under low temperature.

Key words: municipal wastewater; temperature; multi-cycle; biofilm; suspended sludge

传统的城市生活污水处理厂能耗高、剩余污泥产量高, 且外加碳源需求量大。为了改变这一现状, 能源

回收、营养盐回收和水资源循环利用成了未来污水处理的新理念。2013年9月, “建设面向未来的中国污水

[基金项目] 国家自然科学基金青年项目(31800104)

处理概念厂”这一命题正式提出。概念厂的建设在技术层面上主要是基于水中有机物资源化、短程硝化反硝化/厌氧氨氧化脱氮以及水肥资源回收等^[1]。通过化学絮凝或生物吸附法可分离、转移有机物至污泥厌氧发酵系统进而生产沼气能源,但与此同时会导致废水 COD/N 大大降低,必须采用同步硝化反硝化或短程硝化相关先进工艺进行脱氮。同步短程硝化反硝化具有短程硝化与同步硝化反硝化两种工艺的优点,与传统生物脱氮工艺相比,短程硝化反硝化能够节省 40% 碳源,而同步硝化反硝化在一个反应器内同时硝化和反硝化,也可节省部分碳源。

短程硝化需要抑制亚硝酸盐氧化菌(Nitrite-oxidizing bacteria, NOB),但在主流污水处理系统中可利用控制手段较少,主要包括间歇性曝气、低浓度溶解氧(Dissolved oxygen, DO)和短污泥龄(Solids retention time, SRT)等^[2-5]。硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)对 NO_2^- -N 的氧化速率较硝化杆菌属(*Nitrobacter*)低,在低氨氮市政污水处理厂具有竞争优势,是 NOB 优势菌属^[6],所以主流短程硝化反硝化的关键在于抑制 *Nitrospira*。然而,冬季脱氮菌代谢速率都较低,污水厂必须通过延长曝气时间和污泥龄维持生物脱氮,为 NOB 提供了更多生长机会。从 *Nitrosomonas*(污水厂主要氨氧化菌属^[6])和 *Nitrospira* 代谢模型来看,DO 浓度越高, *Nitrospira* 越容易受到抑制^[7],但 SRT 必须控制较短。在多循环 SBR(multi-cycle SBR, MCSBR)交替缺氧/好氧环境下,分步进水能够及时反硝化消耗新生成的 NO_2^- -N,导致 NOB 底物短缺,而氨氧化菌(Ammonia-oxidizing bacteria, AOB)并不受底物影响,通过短 SRT 能够抑制 NOB 生长,且在高 COD/N 条件下,NOB 的抑制与 DO 浓度关联不显著^[8]。由此来看,可以通过提高 DO 浓度(即不需要传统低 DO 控制),选择性提高 AOB 代谢速率,但需要维持系统的高反硝化效率用以抑制 NOB 生长,并控制短 SRT,持续将 NOB 冲刷出去。

通常,可以通过提高 COD/N,营造适合反硝化菌的缺氧环境(如生物膜或颗粒污泥)促进反硝化,以此建立反硝化菌较 NOB 竞争 NO_2^- -N 的优势,但二者受低温抑制程度未知。因此,本研究利用 MCSBR 建立基于生物膜和悬浮污泥混合系统的同步短程硝化反硝化工艺,强化好氧过程反硝化脱氮,并考察低温对 AOB、NOB 和反硝化菌代谢速率的影响,确定低温条件下短程硝化反硝化的可行性。同

时,通过 16S rRNA 基因高通量测序分析了 MCSBR 内微生物群落组成。

1 材料与方法

1.1 MCSBR 装置及其运行参数

实验采用有机玻璃材质的 MCSBR 装置示意图见图 1。

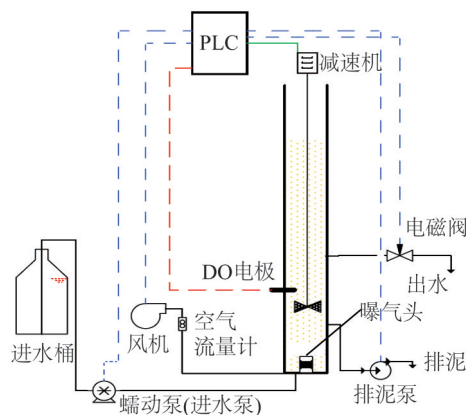


图 1 MCSBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of MCSBR

MCSBR 有效容积为 4.5 L, PVA-Gel 凝胶颗粒(可乐丽, 日本)用做生物附着填料,其填充率为 10%。运行模式包括 4 个相同的子循环(进水 2 min、搅拌 25 min 和曝气 45 min)。4 个子循环后依次沉淀 5 min、排泥 2 min 和排水 5 min。悬浮污泥 SRT 约为 6 d,全混方式排泥。排水口位于 MCSBR 中间部位,每次排水 50%,水力停留时间(HRT)为 12 h。SBR 通过 PLC 自动运行,在线监测溶解氧浓度而无控制,气泵气体流速为 0.5~0.75 L/min。SBR 运行温度为 15~25 °C。MCSBR 进水为人工模拟废水,以乙酸钠为有机碳源(COD 为 180 mg/L), NH_4Cl 为氮源(NH_4^+ -N 为 40 mg/L),同时包含少量其他金属营养盐。 KHCO_3 提供进水碱度并维持 pH 在 7.8 左右。

1.2 周期实验和批式实验

采用周期实验考察 MCSBR 内短程硝化和反硝化性能。周期实验以第 1 个子循环为周期,每间隔 10 min 取 1 次水样,水样经 0.22 μm 滤膜过滤后,测定 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N。温度条件分别为 15、20、25 °C。

采用批式实验考察了温度对生物膜、悬浮污泥短程硝化和反硝化效果的影响。批式实验使用 250 mL 锥形瓶,测定不同温度(15、20、25 °C)条件下生物膜和悬浮污泥氮代谢速率。分别取 400 mL 泥水混合物和 30 mL 填料,清洗 3 遍后,加入氮源和碳源,水

质条件见表1。好氧实验通过气泵曝气,厌氧实验封口搅拌,每30 min取1次水样,过滤后分别测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 。

表1 批式实验水质条件

Table 1 Water quality conditions of batch tests			
项目	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{COD}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
硝化速率测定	20	—	—
反硝化容积负荷测定	—	20	90
同步短程硝化反硝化	20	—	90

1.3 分析方法

MLSS、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、COD等通过国标法检测^[9]。TN以 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 三者之和计。微生物组成通过16S rRNA高通量测序分析,生物膜中微生物通过揉搓、重悬浮后送检。高通量测序外委上海生工(中国,上海)完成,包括DNA提取、凝胶电泳和高通量测序等。

2 结果与讨论

2.1 MCSBR脱氮性能

经过间歇接种成熟主流短程硝化反硝化污泥,2周后启动混合生物膜和悬浮污泥MCSBR,开始本实验,计为第1天。为了研究温度对短程硝化反硝化的影响,分别控制3个温度范围分别在 $(15\pm 1)^\circ\text{C}$ 、 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,研究MCSBR运行性能,结果见表2。

表2 MCSBR运行工况随温度变化

Table 2 The operation of MCSBR at different temperature				
温度/ $^\circ\text{C}$	时间/d	TN去除率/%	NH_4^+-N 去除率/%	COD去除率/%
15 ± 1	1~17	56.3	65.5	85.6
20 ± 1	18~44	81.5	91.8	85.1
25 ± 1	45~85	84.5	98.5	89.1

由表2可知,COD的去除受温度影响较小,COD去除率均在85%以上,而脱氮效果受低温抑制明显。在 25°C 时, NH_4^+-N 和TN去除率最高,分别为98.5%和84.5%;在 20°C 时, NH_4^+-N 和TN去除率稍微降低;而在 15°C 时, NH_4^+-N 和TN去除率显著降低,出水残留 NH_4^+-N 较多。在碳源充足的条件下,多步进水后实现及时反硝化,出水残留氮素主要是第4个子循环好氧生成的 NO_2^--N 和残留的 NH_4^+-N 。但在低温时, NH_4^+-N 氧化率较低,每个子循环都有残余,进水中的COD与生成的 NO_2^--N 比例较高,反

硝化不受COD/N制约,使得氧化的 NH_4^+-N 基本可被反硝化去除。据报道,随着水温降低,生物膜和悬浮污泥内反硝化速率均会降低,但前者反硝化容积速率降低幅度远远低于后者,可能因为低温诱导生物膜胞外聚合物增加,使得生物膜更加耐受低温^[10-11],而MCSBR内生物膜保证了低温反硝化脱氮。

2.2 周期实验

为了考察MCSBR内短程硝化和反硝化性能,分别在3个温度下进行了原位周期实验,结果见图2。

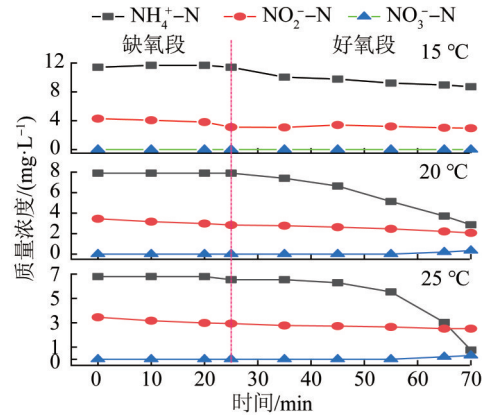


图2 单个子循环氮素浓度变化曲线

Fig. 2 Concentration profiles of nitrogen in one A/O cycle

由图2可知,在缺氧段, NH_4^+-N 几乎无变化, NO_2^--N 稍微降低;在好氧段, NH_4^+-N 被氧化为 NO_2^--N ,但AOB活性随温度降低而降低,15、20、 25°C 时,氨氧化容积负荷分别为1.6、2.9、 $3.4\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 。不同温度条件下,MCSBR内均未出现明显的 NO_2^--N 和 NO_3^--N 缺氧下降、好氧上升现象,尤其是好氧结束时 NO_2^--N 累积量少(NO_3^--N 累积量极少),远远低于悬浮污泥MCSBR系统^[8]。由此可以推断,MCSBR生物膜内发生了同步短程硝化反硝化反应。

2.3 温度对反硝化的影响

在3个温度条件下,分别检测了悬浮污泥和生物膜反硝化容积负荷。批式实验COD/N为4.5:1,能够满足短程反硝化脱氮(理论COD/N约为1.7),结果见图3。

由图3可知,15、20、 25°C 时,生物膜缺氧反硝化贡献率分别为79.4%、79.5%、81.5%,表明缺氧反硝化反应主要在生物膜中进行。究其原因,悬浮污泥SRT较短,悬浮污泥生物量较低,导致其反硝化贡献率较低。同时,不同体系反硝化容积负荷均随温度

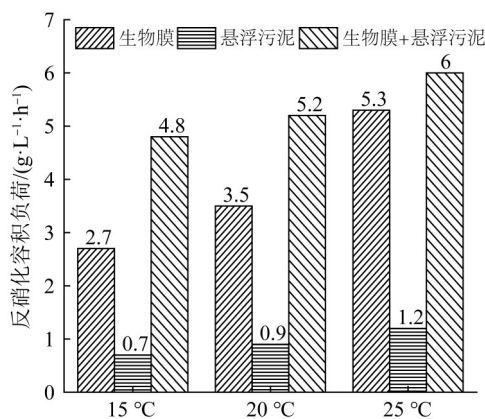


图3 反硝化容积负荷随温度的变化情况

Fig. 3 Volume loading rate of denitrification at different temperature

降低而降低,当温度从25℃降到15℃,生物膜、悬浮污泥和混合体系的反硝化容积负荷分别降低49.1%、41.7%和20.0%,说明混合系统反硝化过程受低温抑制最不明显,单独生物膜或悬浮污泥反硝化受低温抑制相似。由图3还可知,15、20、25℃时,混合体系与生物膜反硝化容积负荷比分别为1.8、1.5和1.1,表明混合体系反硝化较生物膜更耐受低温环境。因此,混合体系能够在低温环境下保证高的反硝化容积负荷^[10],有利于维持反硝化菌与NOB竞争NO₂⁻-N,从而减少NOB的底物。但是,低温条件对其他微生物(如AOB、NOB等)也具有影响,甚至破坏了活性污泥结构和物理特性^[12]。

2.4 温度对同步短程硝化反硝化的影响

为了验证低温对硝化细菌和反硝化菌的抑制情况,分别在3个温度条件下,检测了3个体系氨氮的变化趋势,氨氧化反应受温度的影响情况见图4。

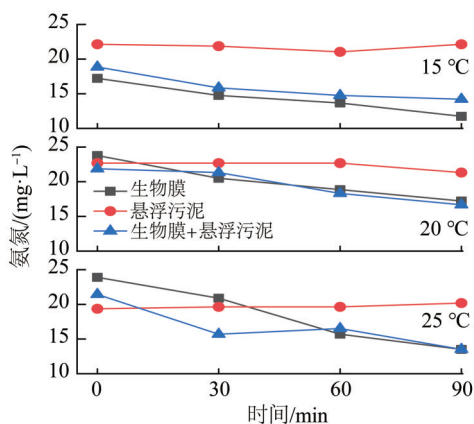


图4 氨氧化反应受温度的影响情况

Fig. 4 Ammonium oxidation rates at different temperature

由图4可知,不同体系的氨氧化速率均受低温抑制,且单独的生物膜氨氧化速率始终远远大于单独的悬浮污泥,表明MCSBR混合污泥系统中氨氧化反应也是主要在生物膜中进行。究其原因,悬浮污泥SRT约为3 d,且每个运行周期都排泥,使得悬浮污泥生物量较低,AOB难以富集。

为了对比不同体系氨氧化活性受温度的影响,对氨氧化容积负荷进行了分析,结果见图5。

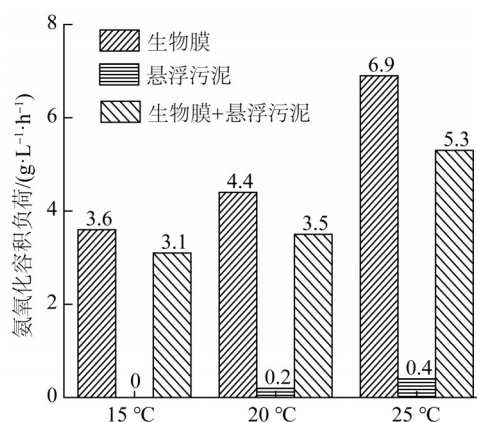


图5 氨氧化容积负荷随温度的变化情况

Fig. 5 Volume loading rate of ammonium oxidation at different temperature

由图5可知,单独的生物膜的氨氧化容积负荷大于混合体系,可能因为悬浮污泥丝状菌偏多(镜检结果未提供),吸附到填料表面,与生物膜上的AOB竞争DO,导致氧气由水到生物膜内部传递受阻,抑制了混合体系生物膜氨氧化反应,该现象在MBBR悬浮污泥生物膜复合系统中已被证明^[13],具体微生物学分析在2.5部分详述。当温度从25℃降到15℃,生物膜和混合体系的氨氧化速率分别降低47.8%和41.5%,而单独的悬浮污泥氨氧化几乎灭活,说明混合系统氨氧化过程受低温影响最不明显^[10]。由图5还可知,混合体系和生物膜的氨氮容积负荷从25℃到20℃分别降低34.0%和36.2%,从20℃到15℃分别降低11.4%和18.2%,进一步表明混合体系氨氧化活性更加耐受较低温度。

对比不同温度条件下生物膜和混合体系氨氧化容积负荷(图5)和反硝化容积负荷(图3)发现,混合系统氨氧化活性始终低于其反硝化活性,说明混合体系始终具有反硝化竞争优势。生物膜硝化反硝化活性受温度影响复杂,在15℃时,生物膜体系氨氧化活性略大于其反硝化活性,而稍高温度则反之。但是,整体来看,生物膜和混合系统均能维持较好的反硝化性能,尤其生物膜中反硝化菌能够在曝气阶

段辅助脱氮。因此,低温条件下,含有混合生物膜和悬浮污泥的MCSBR能够维持反硝化菌较NOB竞争 NO_2^- -N的优势。

NO_2^- -N浓度变化情况见图6。

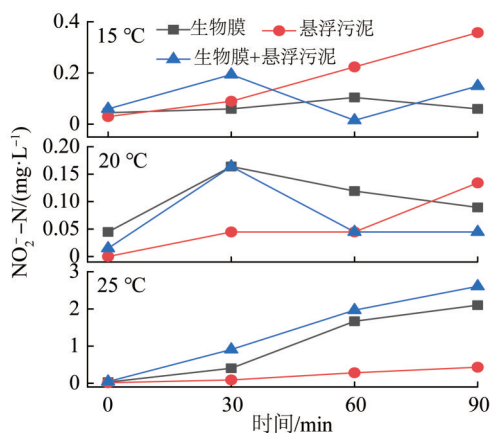


图6 NO_2^- -N浓度随温度变化情况

Fig. 6 Nitrite accumulation at different temperature

3种体系 NO_3^- -N累积质量浓度均低于0.2 mg/L,且出现在批式实验后期(结果未提供),说明 NO_3^- -N可少量生成,但被及时反硝化消耗。由图6可知,在15 °C时,生物膜和混合体系内 NO_2^- -N累积质量浓度小于0.1 mg/L,而单独的悬浮污泥 NO_2^- -N累积质量浓度约为0.4 mg/L,进一步说明生物膜具有较好同步反硝化性能。在20 °C时,3种体系 NO_2^- -N累积质量浓度均低于0.2 mg/L,说明温度升高促进了反硝化。在25 °C时,悬浮污泥体系 NO_2^- -N累积量依然较低,而生物膜和混合体系 NO_2^- -N浓度显著升高,说明此温度条件下,生物膜相关体系氨氧化速率超过反硝化速率。

单独就生物膜体系而言,其氨氧化和反硝化容积负荷均受低温抑制。通过以上数据计算总氮去除情况,15、20、25 °C时,生物膜、混合体系TN去除负荷分别为3.6、3.0 mg/(L·h),4.3、3.4 mg/(L·h),5.5、3.6 mg/(L·h),进一步表明生物膜和混合体系均具有同步短程硝化反硝化功能,且低温时二者脱氮效率差别不大。整体而言,混合体系兼具生物膜和悬浮污泥反硝化能力之和,且远远大于单独生物膜反硝化能力,但由于其氨氧化受传质差抑制,使得其TN去除能力较生物膜显得较低。相对于反硝化菌来说,低温对AOB抑制更明显,需要对混合体系好氧传质作用进行优化,进而提高其脱氮效能。总之,在低温条件下能够维持短程硝化反硝化脱氮,证明工艺具有一定可行性。

2.5 微生物群落分析

为了验证分析生物膜和悬浮污泥微生物组成,

分别对其微生物16S rRNA进行高通量测序分析,结果见图7。

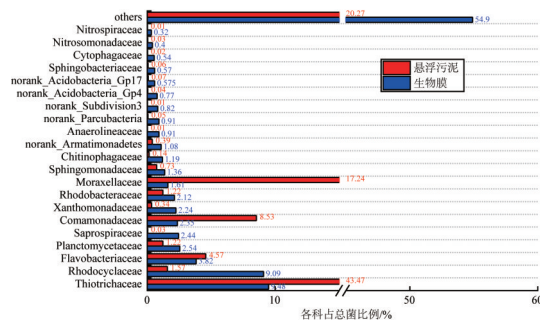


图7 MCSBR微生物组成

Fig. 7 Microbial composition of MCSBR

由图7可知,AOB细菌Nitrosomonadaceae科在生物膜和悬浮污泥的含量占总菌的0.32%和0.01%,而NOB细菌Nitrospiraceae科在生物膜和悬浮污泥的含量占总菌的0.4%和0.03%,因此硝化细菌主要分布在生物膜上,同时AOB和NOB含量均比较低。究其原因,生物膜和悬浮污泥中均含有较多的丝状菌(Thiobacillus),分别占总菌比例达9.48%和43.5%。研究表明,Thiobacillus eikelboomii较AOB、NOB具有DO竞争优势,使得AOB、NOB缺氧受抑制,尤其在生物膜从外到内依次是异养菌、AOB、NOB和反硝化菌等^[14]。丝状菌偏多主要原因是MCSBR分步进水,使得微生物/食物比始终较高,导致活性污泥饥饿而出现丝状菌增多现象^[15-16],可能是填料填充比过高导致,相关原因有待进一步研究。

同时,生物膜以混养反硝化Rhodocyclaceae科的Zoogloea属(总菌的6.29%)^[17]和Thauera属(0.52%)^[18],Xanthomonadaceae科的Lysobacter属^[19](1.34%)和Dokdonella属(0.4%)^[20]为主,且这些反硝化菌远远高于悬浮污泥,支撑了生物膜同步硝化反硝化功能。悬浮污泥以好氧反硝化菌Moraxellaceae科的Acinetobacter属(13.96%)^[21]和Psychrobacter属(2.95%)^[22],Comamonadaceae科的Acidovorax属(1.94%)^[23]和Hydrogenophaga属(2.2%)^[24]为主,这些反硝化菌支撑了悬浮污泥好氧反硝化功能。

3 结论

笔者系统研究了MCSBR系统中悬浮污泥和/或生物膜受低温的影响。结果证实低温对硝化菌和反硝化菌均具有抑制作用。在15 °C时,生物膜和悬浮污泥混合体系的氨氧化过程较反硝化过程受抑制更明显,使得系统内生成的 NO_2^- -N能够被快速消耗,导致NOB获得的 NO_2^- -N较少,进而抑制了NOB细菌的生长。因

此,在低温条件下,只要保证足够的COD/N,主流短程硝化反硝化完全可行。

参考文献

- [1] ZHU Chenyu, ZHU Boyang, GU Xueyuan, et al. Technology and concept of wastewater treatment: Differences between the Rhine Basin and the Yangtze Basin[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 106(6): 1059-1064.
- [2] WANG Chao, LIU Sitong, XU Xiaochen, et al. Achieving mainstream nitrogen removal through simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification process in an integrated fixed film activated sludge reactor[J]. Chemosphere, 2018, 203: 457-466.
- [3] MARIN J C A, CARAVELLI A, ZARITZKY N. Performance of anoxic-oxic sequencing batch reactor for nitrification and aerobic denitrification[J]. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.84775.
- [4] XU Zaizhou, ZHANG Liang, GAO Xinjie, et al. Optimization of the intermittent aeration to improve the stability and flexibility of a mainstream hybrid partial nitrification-anammox system[J]. Chemosphere, 2020, 261: 127670.
- [5] SUN Tiantian, DU Rui, DAN Qiongpeng, et al. Rapidly achieving partial nitrification of municipal wastewater in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) reactor: Effect of heterotrophs proliferation and microbial interactions [J]. Bioresource Technology, 2021, 340: 125712.
- [6] YU Lifang, WANG Yu, LI Ren, et al. The differential proliferation of AOB and NOB during natural nitrifier cultivation and acclimation with raw sewage as seed sludge[J]. RSC Advances, 2020, 10(47): 28277-28286.
- [7] CUI Bin, YANG Qing, LIU Xiuhong, et al. The effect of dissolved oxygen concentration on long-term stability of partial nitrification process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 90: 343-351.
- [8] XU Guangjing, ZHANG Zhihao, GAO Fan. Effect of COD/N ratios and DO concentrations on the NOB suppression in a multi-cycle SBR[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105735.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 10-20.
- State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 10-20.
- [10] 李韧, 于莉芳, 张兴秀, 等. 硝化生物膜系统对低温的适应性: MBBR和IFAS[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3691-3698.
- LI Ren, YU Lifang, ZHANG Xingxiu, et al. Adaptability of nitrifying biofilm systems to low temperature: MBBR and IFAS[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3691-3698.
- [11] WAQAS S, BILAD M R, MAN Z, et al. Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110718.
- [12] 郭耀, 李志华, 杨成建, 等. 活性污泥物理结构对呼吸过程的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2813-2820.
- GUO Yao, LI Zhihua, YANG Chengjian, et al. Effects of the physical structure of activated sludge on respiration processes[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2813-2820.
- [13] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR泥膜复合系统泥膜竞争关系的影响因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4735-4743.
- ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, et al. Factors influencing the competition between activated sludge and biofilm in hybrid MBBR nitrification system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4735-4743.
- [14] WU Xianwei, HUANG Ju, LU Zichuan, et al. Thiothrix eikelboomii interferes oxygen transfer in activated sludge[J]. Water Research, 2019, 151: 134-143.
- [15] SUN Chenxiang, ZHANG Bing, CHEN Zhan, et al. Sludge retention time affects the microbial community structure: A large-scale sampling of aeration tanks throughout China [J]. Environmental Pollution, 2020, 261: 114140.
- [16] HAMZA R A, SHENG Zhiya, IORHEMEN O T, et al. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater [J]. Water Research, 2018, 147: 287-298.
- [17] SU Junfeng, LI Guoqing, HUANG Tinglin, et al. The mixotrophic denitrification characteristics of *Zoogloea* sp. L2 accelerated by the redox mediator of 2-hydroxy-1, 4-naphthoquinone [J]. Bioresource Technology, 2020, 311: 123533.
- [18] XUE Xiaofang, WANG Dexin, YI Xuesong, et al. Simultaneously autotrophic denitrification and organics degradation in low-strength coal gasification wastewater (LSCGW) treatment via microelectrolysis-triggered Fe(II)/Fe(III) cycle[J]. Chemosphere, 2021, 278: 130460.
- [19] FENG Lijuan, YANG Jingyi, YU Hui, et al. Response of denitrifying community, denitrification genes and antibiotic resistance genes to oxytetracycline stress in polycaprolactone supported solid-phase denitrification reactor[J]. Bioresource Technology, 2020, 308: 123274.
- [20] LIU Tao, HE Xiaolu, JIA Guangyue, et al. Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater[J]. Chemosphere, 2020, 247: 125831.
- [21] FENG Lijuan, JIA Rong, ZENG Zhen, et al. Simultaneous nitrification-denitrification and microbial community profile in an oxygen-limiting intermittent aeration SBBR with biodegradable carriers[J]. Biodegradation, 2018, 29(5): 473-486.
- [22] ZHANG Qian, CHEN Xue, ZHANG Zhengyi, et al. Performance and microbial ecology of a novel moving bed biofilm reactor process inoculated with heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria for high ammonia nitrogen wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123813.
- [23] BLOHM A, KUMAR S, KNEBL A, et al. Activity and electron donor preference of two denitrifying bacterial strains identified by Raman gas spectroscopy[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2022, 414(1): 601-611.
- [24] DENG Min, LI Lu, DAI Zhili, et al. Aerobic denitrification affects gaseous nitrogen loss in biofloc-based recirculating aquaculture system[J]. Aquaculture, 2020, 529: 735686.
- [作者简介] 张邳昊(1992—), 硕士研究生. E-mail: as2350229669@163.com. 通讯作者: 徐光景, 副教授. E-mail: xuguangjing@dlou.edu.cn.
- [收稿日期] 2022-02-23(修改稿)