

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.012

碳源投加方式对短程反硝化性能的影响

郭露^{1,2}, 汪晓军^{1,2,3}, 秦嘉富^{1,2}, 陈振国^{3,4}

(1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广东 广州 510006; 3. 佛山市化尔铵生物科技有限公司, 广东 佛山 528300; 4. 华南理工大学 化学与化工学院, 广东 广州 510665)

摘要: 短程反硝化是非常有前景的硝酸盐废水前处理方法,可为厌氧氨氧化提供必需的底物(NO_2^- -N),而不同碳源投加方式会影响短程反硝化的性能。在进水 NO_3^- -N为100 mg/L、乙酸钠为碳源、碳氮比为2的条件下,探究了不同碳源投加方式(1次投加、3次投加、6次投加)对短程反硝化氮素转化特性及反应速率的影响。结果表明,分次投加碳源可以在短时间内启动高效稳定的短程反硝化,且6次投加方式条件下短程反硝化性能最优。6次投加碳源($t=0/10/20/30/40/50$ min)条件下短程反硝化出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N平均浓度分别为7.33、60.92 mg/L, NO_3^- -N至 NO_2^- -N的平均转化率(NTR)为86.55%, NO_3^- -N比还原速率和 NO_2^- -N比还原速率分别为26.79、4.14 mg/(g·h)。高通量测序结果显示,拟杆菌门和变形菌门是短程反硝化系统中的优势菌门。在研究过程中,短程反硝化功能菌属 *Thauera* 丰度逐渐增加,3种投加方式下其相对丰度分别为0、14.29%、17.11%,说明与短程反硝化相关的优势菌得到富集。

关键词: 短程反硝化; 碳源投加方式; 亚硝酸盐积累; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0074-07

Effect of Carbon Source Dosing Mode on Partial Denitrification Performance

GUO Lu^{1,2}, WANG Xiao-jun^{1,2,3}, QIN Jia-fu^{1,2}, CHEN Zhen-guo^{3,4}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Cluster, Guangzhou 510006, China; 3. Huaan Biotech Co. Ltd., Foshan 528300, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510665, China)

Abstract: Partial denitrification is a promising pretreatment method for nitrate wastewater, which can provide essential substrate (NO_2^- -N) for Anammox. However, different carbon source addition methods will affect the performance of partial denitrification. Under the condition that influent NO_3^- -N was 100 mg/L, sodium acetate was the carbon source, and the ratio of carbon to nitrogen was 2, the effects of different carbon source dosing modes (one time dosing, three times dosing and six times dosing) on nitrogen transformation characteristics and reaction rate of partial denitrification were investigated. The partial denitrification with high efficiency and stability could be started in a short time by multiple dosing

基金项目: 2019年广东省科技计划项目重点领域研发计划项目(2019B110205002); 2017年广东省应用型科技研发及重大科技成果转化专项(2017B020236004)

通信作者: 汪晓军 E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

of carbon sources, and the partial denitrification performance with dosing of carbon source in six batches was the best. When carbon source was added for six times ($t=0/10/20/30/40/50$ min), the average NO_3^- -N and NO_2^- -N in the effluent were 7.33 mg/L and 60.92 mg/L, respectively, the average nitrogen transformation rate (NTR) of NO_3^- -N to NO_2^- -N was 86.55%, and the specific reduction rates of NO_3^- -N ratio and NO_2^- -N were 26.79 mg/(g·h) and 4.14 mg/(g·h), respectively. High-throughput sequencing showed that *Bacteroidetes* and *Proteobacteria* were the dominant bacterial phyla in the partial denitrification system. During the operation, the abundance of *Thauera* (a functional bacterium of partial denitrification) increased gradually, and its relative abundance in the systems with three dosing modes was 0, 14.29% and 17.11%, respectively, indicating that the dominant bacteria related to partial denitrification were enriched.

Key words: partial denitrification; carbon source dosing mode; nitrite accumulation; microbial community

短程反硝化(PD)是指 NO_3^- -N还原到 NO_2^- -N的过程,相比于完全反硝化过程可节约60.10%的外加碳源^[1-4]。有研究表明,通过控制污泥类型、碳源种类、碳氮比(C/N值)、pH值、碳源投加方式等条件可以实现短程反硝化和 NO_2^- -N积累。毕春雪等^[5]、张星星等^[6]利用不同污泥快速启动了PD, NO_2^- -N转化率(NTR)分别在80%、70%左右。Ge等^[7]研究发现添加不同碳源时,添加葡萄糖碳源条件下亚硝酸盐积累率最高,较高C/N值会获得更高的 NO_2^- -N积累量。Gong等^[8]用乙酸钠作为碳源时,发现在C/N值=1.4~3.5时 NO_2^- -N都能有效积累。Qian等^[9]发现当系统pH值从5.0增至9.0时,反应器中NTR逐渐升高,而且pH值=9.0时短程反硝化关键细菌*Thauera*的相对丰度最高。王淑莹等^[10]研究表明,以污泥发酵液为碳源,分次投加和1次投加对短程反硝化系统中NTR的峰值影响不大,但分次投加更有利于 NO_2^- -N稳定积累。在反硝化耦合厌氧氨氧化系统中,分次投加污泥发酵液不会降低厌氧氨氧化活性。Du等^[11]发现,在反硝化氨氧化(DEAMOX)系统中,总氮超过500 mg/L时,分次投加碳源能明显提升PD过程的NTR。

目前虽有少部分文献报道了碳源投加方式对PD的影响,但这些研究多是采用短程反硝化-ANAMMOX耦合工艺分析碳源投加方式对整体脱氮效果的影响,而碳源投加方式对PD中氮素转化特性和转化速率的影响鲜有研究。因此,笔者采用序批式反应器(SBR)处理模拟硝酸盐废水,以乙酸钠为碳源,探究在不同碳源投加方式下PD工艺的

启动以及运行性能的差异情况,并利用高通量测序技术分析不同条件下微生物群落变化,旨在为硝酸盐废水的处理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置采用SBR反应器,由有机玻璃制成,有效体积为3 L,长为11 cm,宽为11 cm,高为40 cm,见图1。在反应器上方安装JJ-1型悬臂式搅拌器,搅拌速度为200 r/min,以保持反应过程中的完全混合且溶解氧不超过0.2 mg/L。使用哈希HQ30d溶解氧仪测定溶解氧,雷弗BT100L型蠕动泵控制进水和碳源投加,德力西2W040-10型电磁阀进行排水。使用YX25L型温控加热盘控制反应器内温度在24~25℃。

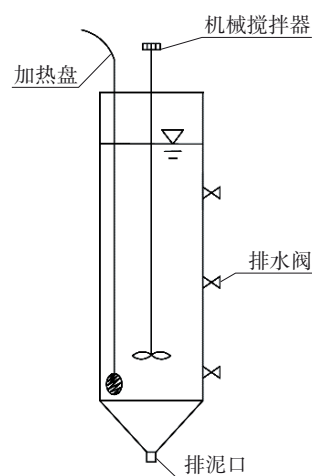


图1 SBR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of SBR

1.2 实验方案

SBR 每天运行 2 个周期,每周进水 1.5 L,排水比为 50%。本实验分为两个阶段,阶段 I 为反应启动阶段:厌氧搅拌 360 min(包括进水 2 min),沉淀 30 min,排水 5 min;阶段 II 为碳源投加方式探究阶段:厌氧搅拌 240 min(包括进水 2 min),沉淀 30 min,排水 5 min。

整个实验过程进水 NO_3^- -N 为 100 mg/L,使用乙酸钠溶液(COD 为 25 g/L)提供反应所需碳源,控制反应起始 C/N 值为 2。第 I 阶段(第 1~10 天)分 4 次投加碳源,即在 $t=0/1/2/3$ h 分别投加 3 mL 乙酸钠溶液,旨在启动短程反硝化。第 II 阶段采用 3 种碳源投加方式,即 1 次投加方式(第 11~28 天,在 $t=0$ min 时投加 12 mL 乙酸钠溶液)、3 次投加方式(第 29~47 天,在 $t=0/30/60$ min 分别投加 4 mL 乙酸钠溶液)、6 次投加方式(第 48~68 天,在 $t=0/10/20/30/40/50$ min 分别投加 2 mL 乙酸钠溶液)。3 种投加方式各选取 3 个周期进行单周期连续取样。每天监测 SBR 反应器进、出水的 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、pH 值。

1.3 接种污泥与实验进水

接种污泥取自实验室培养成熟的全程自养脱氮污泥,接种后 SBR 反应器内混合液的 MLVSS 为 1 500 mg/L,30 d 排泥 1 次。

实验进水为人工配制的模拟废水,主要包括 NaNO_3 、微生物生长所需的营养元素、微量元素 A 及 B 溶液^[12],pH 值为 7.5~8.5。

1.4 分析项目及方法

水样首先经过 0.45 μm 纳滤膜过滤,然后分别采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、紫外分光光度法、PHS-3C 型 pH 计、马福炉灼烧重量法测定 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、pH 值、MLVSS^[13];微生物群落结构采用高通量基因测序技术进行分析。

NTR、比转化速率参考文献[14]进行计算。

2 结果与分析

2.1 短程反硝化系统的启动

图 2 反映了反应器内 PD 启动过程中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度及 NTR 变化情况。进水 NO_3^- -N 为 100 mg/L,乙酸钠为唯一碳源,碳源分 4 次投入 SBR 反应器中,PD 系统经过 19 个周期的驯化完成启动。启动可分为两个阶段:第 1~9 周期,PD 活性增强阶段;第 10~19 周期,PD 活性稳定阶段。第 1~9 周期,反应

器出水 NO_3^- -N 浓度从 26.89 mg/L 降至 12.39 mg/L, NO_2^- -N 浓度从 0.75 mg/L 增加到 44.9 mg/L, NTR 从 22.00% 升至 86.17%,此时认为系统中 PD 性能逐渐增强。第 10~19 周期,反应器出水 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 平均浓度为 12.53 mg/L 和 61.41 mg/L, NO_2^- -N 高积累量得以维持, NTR 平均为 89.78%、最大为 97.09%,说明经过 19 个周期的驯化,在 SBR 反应器中成功启动了 PD 系统。

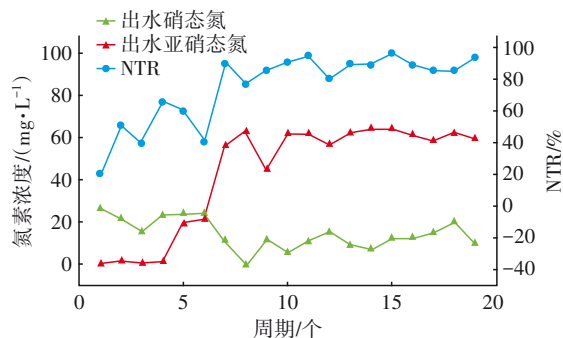


图2 PD启动阶段运行状况

Fig.2 Operational characteristics during start-up period of partial denitrification

目前,大多数研究者启动 PD 采用一次性投加碳源的方法。毕春雪等^[5]在 SBR 反应器中通过一次性投加乙酸钠耗时 21 d 启动了 PD,张星星等^[6]采用 3 种不同的污泥源耗时 9 d 启动了 PD 系统,且 NTR 均仅在 70% 左右。本实验采用的 SBR 反应器仅经过 19 个周期(10 d)的运行, NTR 就达到 89.78%,在短时间内完成了高效稳定 PD 系统的启动,因此可以认为分次投加碳源有利于 SBR 反应器中 PD 的启动。

2.2 碳源投加方式对短程反硝化的影响

2.2.1 氮素转化特性

不同碳源投加方式对 PD 系统氮素转化特性的影响如图 3 所示。进水 NO_3^- -N 为 100 mg/L,一次性投加时,反应器出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 平均浓度分别为 17.18、49.24 mg/L, NTR 平均为 75.10%、最大达到 88.62%。前 10 d 反应器中 NTR 稍有波动,后趋于稳定。3 次投加方式条件下,反应器出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 平均浓度分别为 12.28、58.9 mg/L, NTR 平均为 81.55%,比一次性投加时高 6.45%, NTR 最大为 88.72%,与一次性投加时相差不大,说明 3 次投加时反应器出水 NTR 波动不大。6 次投加方式条件下,反应器出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 平均浓度分别为

7.33、60.92 mg/L, NTR 平均为 86.55%、最高可达 96.14%。

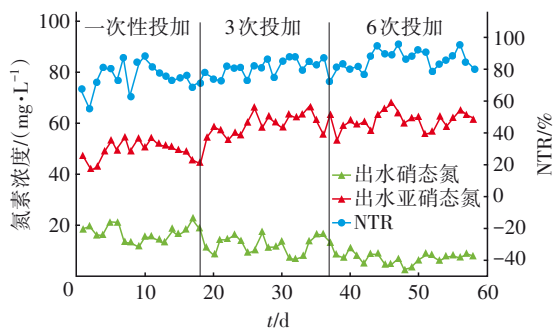


图3 不同碳源投加方式下PD运行状况

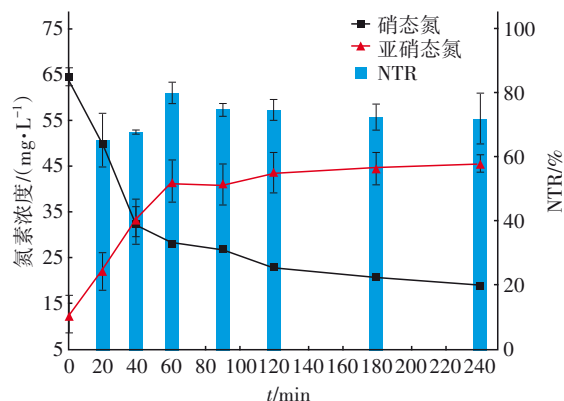
Fig.3 Operational characteristics of PD under different dosing modes of carbon sources

在不同的投加方式下,PD系统出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N浓度差异明显。在其他运行条件相同的情况下,随着碳源投加次数的增多,SBR反应器出水 NO_2^- -N浓度、NTR呈上升趋势, NO_3^- -N剩余量呈下降趋势,说明碳源投加次数增多有利于提升反应器内PD活性。碳源分6次投加可以在最大限度上促使 NO_3^- -N转化为 NO_2^- -N,同时进行完全反硝化的 NO_3^- -N比例下降,因此积累了高浓度的 NO_2^- -N。少量多次地投加碳源可使反应器中的有机物浓度处于较低水平。在较低的C/N值条件下,硝酸盐还原酶的活性大于亚硝酸盐还原酶的活性^[7], NO_3^- -N优先还原为 NO_2^- -N,使 NO_2^- -N得以积累。

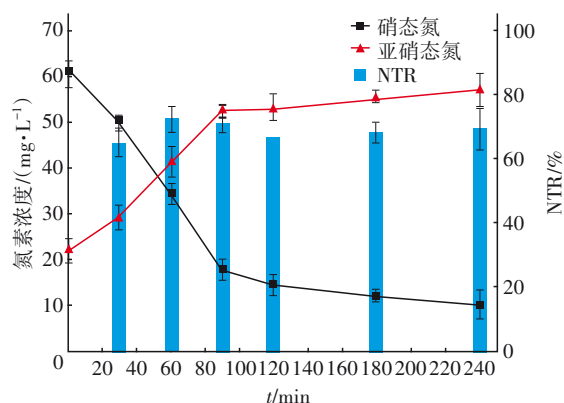
2.2.2 典型周期转化速率

图4展示了不同碳源投加方式下SBR反应器中PD典型周期内 NO_3^- -N、 NO_2^- -N浓度及NTR变化情况。各条件下典型周期实验次数为3次。一次性投加时,在前60 min,反应器出水 NO_3^- -N浓度由64.63 mg/L降至28.15 mg/L, NO_2^- -N浓度从12.68 mg/L升至41.72 mg/L,60 min时NTR达到峰值80.09%。在后续180 min反应时间内, NO_2^- -N仅增加了3.94 mg/L, NO_3^- -N仅减少了9.45 mg/L。3次投加时,反应器出水氮素浓度变化主要在前90 min内, NO_3^- -N在0~90 min和90~240 min的浓度分别下降了43.39、7.37 mg/L, NO_2^- -N则分别增加了30.83、4.21 mg/L,但NTR峰值仍出现在60 min时,为72.46%。6次投加时,在前60 min完成了大部分 NO_2^- -N的积累,反应器出水 NO_2^- -N增加了33.80 mg/L, NO_3^- -N减少了39.90 mg/L,60 min时NTR最大为84.50%。3种投加方式下反应器内 NO_3^- -N减

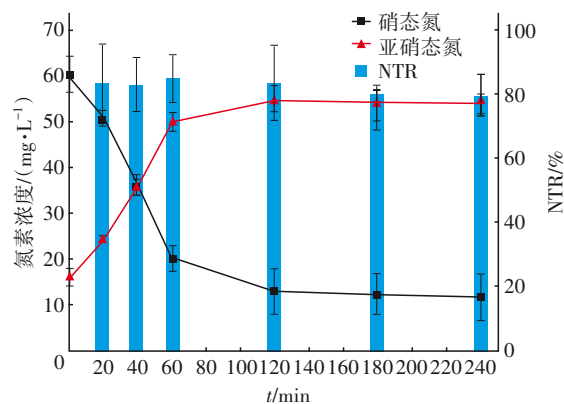
少量均大于 NO_2^- -N积累量,二者差值越小,说明反应器内 NO_2^- -N的还原量越少,NTR越高。



a. 一次性投加



b. 3次投加



c. 6次投加

图4 PD典型周期内氮素浓度、NTR变化曲线

Fig.4 Variations of nitrogen concentration and NTR of PD in typical cycles

此外,3种投加条件下SBR反应器出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N浓度及NTR变化趋势基本相似。在反应前期,反应器出水 NO_3^- -N浓度随着反应的进行而逐渐降低, NO_2^- -N浓度不断积累升高。这是因为在反应初期,硝酸盐还原菌的底物 NO_3^- -N和碳源充足,硝

酸盐还原酶可结合的电子供体与受体增加, NO_3^- -N 可快速转化为 NO_2^- -N。反应一段时间后, 反应器中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度变化不大, 是因为反应后期 NO_3^- -N 和碳源浓度较低, 反应变慢, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 变化不明显, 因此二者浓度及 NTR 比较稳定。有研究表明^[10, 15], 当 C/N 值大于 3 (超过了完全反硝化所需要的碳源量) 时出水 NO_2^- -N 浓度随反应的进行而先增加后减少。而本实验中 C/N 值为 2, 且通过分次投加降低了反应期间碳源浓度, 使反应器中不明显发生完全反硝化, 才成功在反应后期稳定积累 NO_2^- -N 浓度。3 种碳源投加方式下, 反应器中的 NTR 呈微弱的先上升后下降的趋势, 且均在 60 min 时达到最大值。经比较可知, 6 次投加方式下反应器出水 NO_2^- -N 浓度和 NTR 都达到最高水平。

在前 4 次取样时间内, 反应器内 NO_3^- -N 减少量和 NO_2^- -N 积累量与时间呈线性关系, $R^2 > 0.95$ 。典型周期内的 PD 反应速率可由拟合后的二者浓度变化以及污泥浓度 MLVSS 来确定, 结果如图 5 所示。

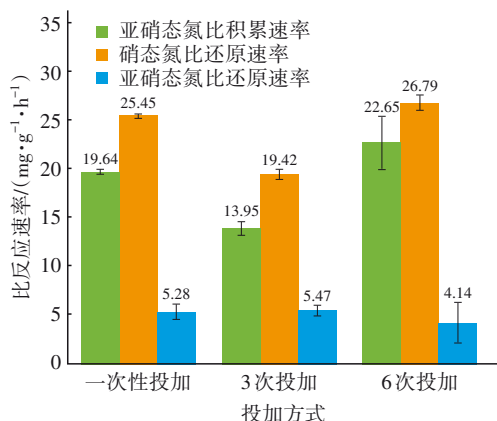


图5 不同碳源投加方式下PD典型周期内的比反应速率
Fig.5 Specific denitrification rate of PD in typical cycles under different carbon source dosing modes

在 3 种投加方式中, 6 次投加时 NO_3^- -N 比还原速率、 NO_2^- -N 比积累速率最大, 分别为 26.79、22.65 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 3 次投加方式的 NO_3^- -N 比还原速率、 NO_2^- -N 比积累速率最小, 分别为 19.42、13.95 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。此外, 无论何种投加方式, NO_3^- -N 比还原速率远大于 NO_2^- -N 比还原速率。一次性投加时, NO_3^- -N 比还原速率是 NO_2^- -N 比还原速率的 4.82 倍, 3 次、6 次投加时分别为 3.55、6.47 倍。6 次投加方式的 NO_3^- -N 比还原速率与 NO_2^- -N 比还原速率相差最大, NO_2^- -N 得以更好地积累, 与在该条件下 PD 系统具有较高的 NTR 相一致。由此可以认为,

NO_3^- -N 比还原速率大于 NO_2^- -N 比还原速率是 NO_2^- -N 积累的直接原因, 这与王淑莹等^[10]、Cao 等^[16]的研究结果相似。

2.3 微生物群落分析

利用 16S rDNA 高通量测序进一步了解不同运行条件下反应器中微生物群落结构的变化情况。seed 取自反应器运行第 1 天 (接种污泥)、R1 取自反应器运行第 16 天 (1 次投加方式)、R3 取自反应器运行第 35 天 (3 次投加方式)、R6 取自反应器运行第 57 天 (6 次投加方式)。4 个污泥样品的 Coverage 值分别为 98.80%、97.68%、99.60%、99.74%, 有较高的样本文库覆盖率, 说明本次测序有效。Shannon 值用来表征微生物群落的多样性, 其数值越大, 多样性越高。seed、R1、R3、R6 的 Shannon 值分别为 5.69、8.02、6.19、7.10, 说明 R1 比其他样品的物种多样性要高, 即 seed、R3、R6 中微生物的专一性更高, 功能细菌的优势更强。

SBR 反应器中各时期污泥样品门水平、属水平的微生物群落丰度见图 6。从图 6(a) 可知, 4 个污泥样品中分别检测出 9、11、18、15 种已知菌门, 有 6 种主要菌门 (相对丰度 $> 1.0\%$), 分别为拟杆菌门 (*Bacteroidetes*)、变形菌门 (*Proteobacteria*)、绿弯菌门 (*Chloroflexi*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、浮霉菌门 (*Planctomycetes*) 和 *Patescibacteria* 菌门。按照丰度由高到低排序, seed 中优势菌门为拟杆菌门 (84.08%)、厚壁菌门 (14.86%); R1 中优势菌门为拟杆菌门 (70.50%)、厚壁菌门 (25.60%) 以及 *Patescibacteria* 菌门 (1.59%); R3 中优势菌门为拟杆菌门 (38.49%)、变形菌门 (32.73%)、绿弯菌门 (22.35%)、浮霉菌门 (4.28%); R6 中优势菌为变形菌门 (47.71%)、绿弯菌门 (22.62%)、拟杆菌门 (22.35%)、浮霉菌门 (4.96%)。可以发现, R3、R6 中出现了 seed、R1 中没有的绿弯菌门, 绿弯菌门是含有绿色素的兼性厌氧细菌, 可以分解糖类物质并进行脱氮^[17]。拟杆菌门的丰度逐渐降低, 变形菌门的丰度逐渐升高, R6 中变形菌门占 47.71%, 此丰度与已有文献^[18]中活性污泥变形菌门的丰度相近。污水处理中常见的反硝化菌属大多属于变形菌门, 变形菌门可以在降解有机物的同时脱氮除磷^[19], 因此, 高丰度变形菌门是 PD 系统中高 NTR 的保证。

从图 6(b) 可知, R3、R6 新增了前两个样品中未检测出的反硝化菌属 *Thauera*, 相对丰度分别为

14.29%、17.11%。*Thauera* 是PD研究中实现 NO_2^- -N积累的功能菌属。Du等^[14]的研究接种已驯化成功且稳定运行的反硝化污泥,发现在实验后期*Thauera*是PD工艺中的绝对优势菌属,相对丰度为67.25%。而本实验接种污泥为实验室培养成熟的全程自养脱氮污泥,反应后期才出现*Thauera*,条件的优化使与PD相关优势菌得到富集,这与6次投加时效果最优的结论一致。

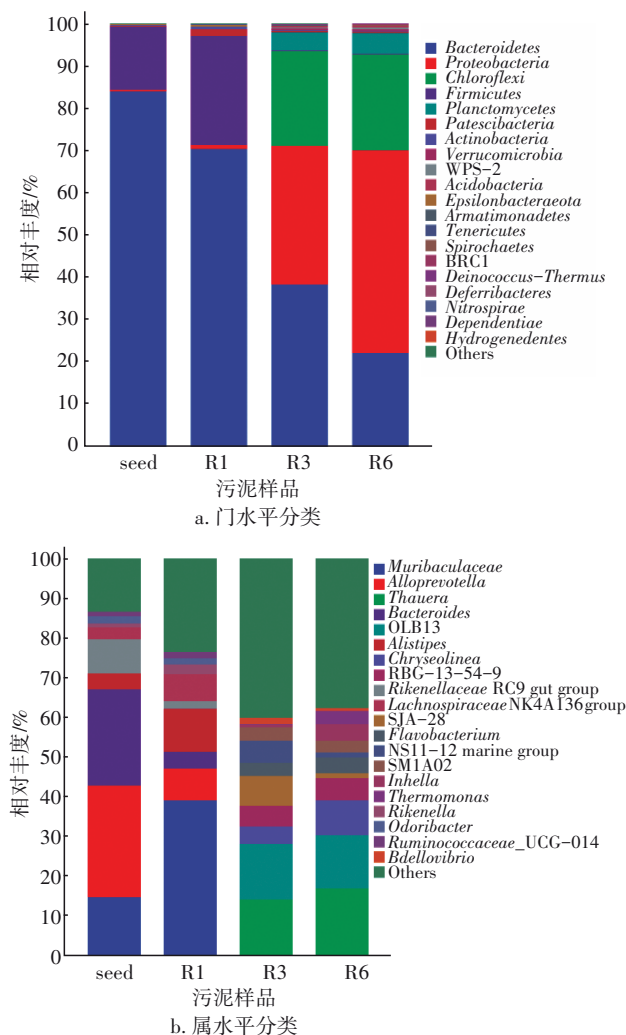


图6 微生物群落分析

Fig.6 Microbial community analysis

3 结论

① 在常温(24~25℃)下,当进水 NO_3^- -N为100 mg/L、C/N值=2时,碳源分次投加,可以在短时间(10 d)内启动高效稳定的PD系统。

② 6次投加方式下SBR反应器中PD运行效能最好。6次投加方式下出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N平均浓度分别为7.33、60.92 mg/L,NTR平均为86.55%,

NO_3^- -N比还原速率最大[26.79 mg/(g·h)], NO_2^- -N比还原速率最小[4.14 mg/(g·h)]。

③ 碳源投加次数增多有利于提升SBR反应器内PD的活性,促进反应器出水 NO_2^- -N的积累,可为后续ANAMMOX脱氮提供充足的基质。

④ 拟杆菌门和变形菌门是PD系统中的优势菌门,在3次投加和6次投加的污泥中出现的新菌属*Thauera*是众多已报道PD研究中实现 NO_2^- -N积累的功能菌属,*Thauera*的富集能维持PD系统的稳定。

参考文献:

- [1] CAO S B, OEHMEN A, ZHOU Y. Denitrifiers in mainstream Anammox processes: competitors or supporters? [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(19): 11063-11065.
- [2] CAO S B, PENG Y Z, DU R, et al. Feasibility of enhancing the denitrifying ammonium oxidation (DEAMOX) process for nitrogen removal by seeding partial denitrification sludge [J]. Chemosphere, 2016, 148: 403-407.
- [3] CAO S B, DU R, NIU M, et al. Integrated anaerobic ammonium oxidization with partial denitrification process for advanced nitrogen removal from high-strength wastewater [J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 37-46.
- [4] ZHANG M, WANG S Y, JI B, et al. Towards mainstream deammonification of municipal wastewater: partial nitrification-anammox versus partial denitrification-anammox [J]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 393-401.
- [5] 毕春雪,于德爽,杜世明,等. 乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 783-790.
- [6] BI Chunxue, YU Deshuang, DU Shiming, et al. Nitrite accumulation characteristics of partial denitrification in different sludge sources using sodium acetate as carbon source [J]. Environmental Science, 2019, 40 (2): 783-790(in Chinese).
- [6] 张星星,王超超,王焱,等. 基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性[J]. 环境科学, 2020, 41 (8): 3715-3724.
- ZHANG Xingxing, WANG Chaochao, WANG Yao, et al. Rapid start-up and stability of partial denitrification based on different waste sludge sources [J].

- Environmental Science, 2020, 41(8): 3715–3724 (in Chinese).
- [7] GE S J, PENG Y Z, WANG S Y, *et al.* Nitrite accumulation under constant temperature in anoxic denitrification process: the effects of carbon sources and COD/NO₃⁻-N [J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 137–143.
- [8] GONG L X, HUO M X, YANG Q, *et al.* Performance of heterotrophic partial denitrification under feast-famine condition of electron donor: a case study using acetate as external carbon source [J]. Bioresource Technology, 2013, 133: 263–269.
- [9] QIAN W T, MA B, LI X Y, *et al.* Long-term effect of pH on denitrification: high pH benefits achieving partial-denitrification [J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 444–449.
- [10] 王淑莹, 操沈彬, 杜睿, 等. 污泥发酵液为碳源的反硝化过程亚硝酸盐积累 [J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 743–750.
- WANG Shuying, CAO Shenbin, DU Rui, *et al.* Nitrite accumulation during the denitrification process with sludge fermentation liquid as carbon source [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(5): 743–750 (in Chinese).
- [11] DU R, CAO S B, LI B K, *et al.* Step-feeding organic carbon enhances high-strength nitrate and ammonia removal via DEAMOX process [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 360: 501–510.
- [12] DU R, CAO S B, WANG S Y, *et al.* Performance of partial denitrification (PD)–ANAMMOX process in simultaneously treating nitrate and low C/N domestic wastewater at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 420–429.
- [13] DU R, CAO S B, ZHANG H Y, *et al.* Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: advances in enhancing process stability [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6353–6364.
- [14] DU R, PENG Y Z, CAO S B, *et al.* Mechanisms and microbial structure of partial denitrification with high nitrite accumulation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(4): 2011–2021.
- [15] DU R, PENG Y Z, CAO S B, *et al.* Characteristic of nitrous oxide production in partial denitrification process with high nitrite accumulation [J]. Bioresource Technology, 2016, 203: 341–347.
- [16] CAO S B, DU R, LI B K, *et al.* Nitrite production from partial-denitrification process fed with low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater: performance, kinetics and microbial community [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 1186–1196.
- [17] SPEIRS L B M, RICE D T F, PETROVSKI S, *et al.* The phylogeny, biodiversity, and ecology of the *Chloroflexi* in activated sludge [J]. Frontiers in Microbiology, 2019. DOI:10.3389/fmicb.2019.02015.
- [18] ZHANG T, SHAO M F, YE L. 454 pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants [J]. The ISME Journal, 2012, 6: 1137–1147.
- [19] 高晨晨, 郑兴灿, 游佳, 等. 城市污水脱氮除磷系统的活性污泥菌群结构特征 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 37–42.
- GAO Chenchen, ZHENG Xingcan, YOU Jia, *et al.* Structure characteristics of activated sludge microbial communities in nitrogen and phosphorus removal system of municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 37–42 (in Chinese).

作者简介: 郭露(1997–), 女, 湖南湘西人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail: 1007898774@qq.com

收稿日期: 2021-04-29

修回日期: 2021-06-10

(编辑: 任莹莹)