



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202202124 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

吴芳磊, 贺航运, 陈博涵, 等. 低 C/N 进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2711-2719. [WU Fanglei, HE Hangyun, CHEN Bohan, et al. The efficiency and microbial community change of urban sewage plant with low C/N influent based on low DO strategy[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2711-2719.]

# 低 C/N 进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化

吴芳磊<sup>1</sup>, 贺航运<sup>1</sup>, 陈博涵<sup>2</sup>, 刘礼祥<sup>1</sup>, 李永<sup>2,✉</sup>, 杜培坦<sup>3</sup>, 陈肖<sup>3</sup>

1. 深圳市环水投资集团有限公司, 深圳 518000; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518000; 3. 滕州市深水深滕污水处理有限公司, 滕州 277500

**摘要** 低 C/N 进水污水厂通常需要外加碳源以保障脱氮除磷效能, 运行费用高。本研究以摆脱低 C/N 污水处理对外碳源依赖及降低运营成本为目的, 依托山东省某城镇污水厂(A<sup>2</sup>O 工艺)开展基于低 DO 调控策略的污水厂综合效能研究。结果表明, 在长期低 DO 运行策略下, 污水厂逐渐停止外加碳源, 在硝化液回流比由 370% 逐渐降至 90% 的过程中, TN 平均去除率由 76.3% 提升至 82.9%, 且除磷效率有所提升。对好氧区氮平衡进行分析发现, 在低 DO 运行条件下, 好氧区 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的转化逐渐以短程硝化和同步反硝化作用为主。微生物宏基因组学结果表明, 在低 DO 条件下, NOB 丰度由 0.15% 下降至 0.06%, 而具备反硝化功能的 PAOs 与 GAOs 的总体丰度由 2.06% 升高至 3.57%。长期低 DO、无外加碳源运行条件下, 脱氮效能的显著提升主要由于好氧区短程硝化和同步反硝化作用的比例升高所致。低 DO 对 AOB 抑制作用小, 对 NOB 抑制作用显著, 导致 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累, 保障了脱氮效能; PAOs 与 GAOs 利用厌氧期储存的内碳源在好氧区反硝化脱氮, 提升了脱氮效能; 而内碳源利用率的提升又促进了 PAOs 的生长, 提升了除磷效能。此外, 污水厂低 DO 运行策略下, 节省了运营成本, 吨水处理费用降低了 0.3 元。

**关键词** 低溶解氧; 低碳氮比; 碳源; 短程硝化; 同步反硝化

我国污水厂进水普遍具有低 C/N 的水质特征, 限制了污水厂的脱氮除磷效率<sup>[1-2]</sup>。为满足出水氮磷的达标排放, 通常选择在污水处理流程中投加有机碳源<sup>[3-4]</sup>。虽然提升了氮磷脱除效果, 但存在碳源药剂费用高昂、污泥产量增加、后续处理处置费用高、大部分有机物转化为 CO<sub>2</sub> (不符合碳达峰、碳中和的时代发展需求)<sup>[5]</sup>等诸多问题。因此, 急需找寻新的方法或策略以摆脱低 C/N 污水处理对外加碳源的依赖。

污水处理工艺中好氧区会消耗大量有机物, 造成碳源的浪费, 控制溶解氧能够节约碳源, 提高碳源在缺氧段的脱氮利用率。近几年, 较多研究提出通过控制污水处理工艺中好氧区溶解氧(DO)可实现低 C/N 污水的高效脱氮除磷, 无需外加碳源的同时可节省曝气能耗。JIN 等在低 C/N 进水条件下, 通过 2 步控制 DO<0.5 mg·L<sup>-1</sup>, 实现 87.9% 的 TN 去除率<sup>[6]</sup>。赵智超等在 AAO 反应器中通过间歇曝气降低好氧区 DO 浓度, 在无硝化液内回流条件下实现了同步硝化反硝化脱氮除磷, 出水 TN 和 TP 分别为 5.8 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.3 mg·L<sup>-1</sup><sup>[7]</sup>。此外, 低 DO 控制过程中微生物群落与功能基

收稿日期: 2022-02-24; 录用日期: 2022-07-18

第一作者: 吴芳磊(1990—), 男, 硕士, 工程师, 957478752@qq.com; ✉通信作者: 李永(1990—), 男, 博士研究生, 1039777428@qq.com

因的变化,也是实现低 C/N 进水条件下各工艺高效脱氮除磷的关键原因之一<sup>[8-9]</sup>。池玉蕾等<sup>[10]</sup>的研究表明,对于低 C/N 污水而言,好氧区 DO 的降低能显著提高系统内反硝化菌和聚磷菌的丰度,从而提高污水处理系统的脱氮除磷效率。

然而,在低 C/N 进水条件和低 DO 控制策略下污水处理效能及微生物群落结构的研究大多停留在小试及中试阶段,缺乏针对实际工程的应用研究。对于城镇污水处理厂而言,DO 的变化会对整个工艺系统产生较大影响,其准确调控至关重要。因此,有必要针对实际工程研究低 DO 调控策略下污水处理系统的综合效能。本研究选择山东某城镇污水处理厂(低 C/N 进水)进行实验,比较在无外加碳源并调控好氧区 DO 措施实施前后污水厂脱氮除磷效能及微生物种群结构的变化,并综合分析低 DO 控制策略产生的经济效益。面对碳达峰、碳中和的时代发展目标,本研究通过低 DO 调控,保障低 C/N 进水污水厂出水达标的同时,实现药耗(无需外加碳源)和能耗(降低曝气)的同步节省,不仅大大节约了运行费用,也为同类型实际工程的调控及改造提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 工程项目概况

本研究依托于山东省某城镇污水处理厂,该厂设计处理规模为  $8 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,实际运行规模  $8 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,采用 A<sup>2</sup>O 工艺。进水 C/N 平均值为 4.2:1,属典型低 C/N 进水水质,常年大量投加有机碳源,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准。主要工艺流程见图 1,主要构筑物参数见表 1。

### 1.2 实验方法

本研究的运行周期分为 2 个阶段,第 1 阶段(P1)为 2020-01-01—2020-12-31,共 365 d,每天根据出水 TN 浓度投加碳源(乙酸钠);第 2 阶段(P2)为 2021-01-01—2021-05-22,共 143 d。其中 P2 阶段开始逐渐减少碳源投加量,在 416 d 后停止投加碳源。同时,P2 阶段硝化液回流比分 4 个阶段下调:366~399 d 维持在 370%;400~425 d 逐渐下调至 280%;426~455 d 逐渐下调至 180%;456~484 d 逐渐下调至 90%,之后不再改变。2 个阶段运行参数见表 2。

### 1.3 水质指标及微生物检测分析方法

1) 水质指标测定与分析。水样 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TN、TP、MLSS 等指标均根据国家标准方法测定<sup>[11]</sup>。水样 DO 浓度通过便捷式溶解氧仪(YSI-pro20)测量。

2) 微生物样品采集与保存。基于表观实验数据,分别于 P1(第 140 天)和 P2(第 499 天) 2 个阶段从污水厂采集 2 组活性污泥样品。采

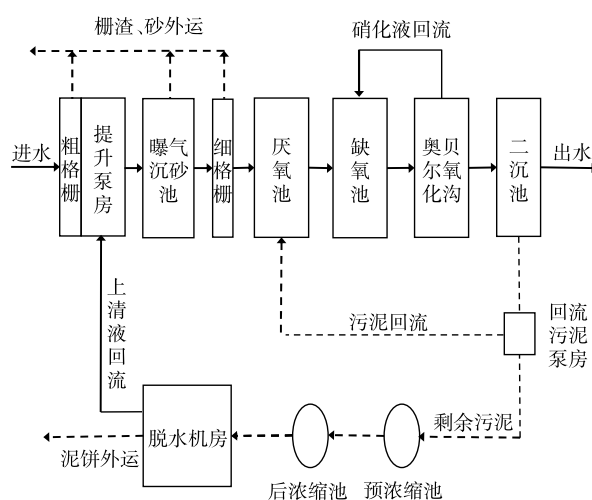


图 1 污水厂主要工艺流程

Fig. 1 Main process flow of sewage treatment plant

表 1 工艺构筑物参数

Table 1 Parameters of process structures

构筑物	HRT/h	池体数/个	容积/ $\text{m}^3$	水深/m
厌氧区	3.6	1	12 000	4.3
缺氧区	2.5	2	8 332	6.0
好氧区	5.0	2	16 664	6.0
二沉池	6.0	4	20 400	4.5

表 2 污水厂 2 个阶段运行参数

Table 2 Operating parameters of sewage treatment plant in two phases

阶段	乙酸钠投加量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	硝化液 回流比/%	污泥 回流比/%
P1	73~575	2~4	370	100
P2	0~284	0.5~1.4	370~90	100

样位置为奥贝尔氧化沟好氧区的前段、中段和后段，每段于液面下 1、3 和 5 m 处采集 3 个样品，将 9 个样品混合形成 1 组微生物样品。采集后样品保存于 -20 °C，用于后续微生物测序。

3) 宏基因组测序与分析。利用 E.Z.N.A.® Soil DNA Kit(Omega Bio-tek, 美国) 试剂盒对活性污泥微生物样品进行 DNA 抽提；使用 NEXTflex™ Rapid DNA-Seq(Bioo Scientific, 美国) 建库；使用 Illumina NovaSeq 测序平台进行宏基因组测序；使用上海美吉生物医药科技有限公司云平台进行数据分析。

### 1.4 计算方法

好氧区硝化比例、好氧区亚硝化比例、好氧区同步脱氮比例按式 (1)、式 (2)、式 (3) 计算。

$$R_1 = \frac{C_{NO_3^- - N, ef} - C_{NO_3^- - N, in}}{C_{NH_4^+ - N, in} - C_{NH_4^+ - N, ef}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{C_{NO_2^- - N, ef} - C_{NO_2^- - N, in}}{C_{NH_4^+ - N, in} - C_{NH_4^+ - N, ef}} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_3 = 100\% - R_1 - R_2 \quad (3)$$

式中： $R_1$  为好氧区硝化比例，%； $R_2$  为好氧区亚硝化比例，%； $R_3$  为好氧区同步脱氮比例，%； $C_{NH_4^+ - N, in}, C_{NH_4^+ - N, ef}$  分别为好氧区进出水  $NH_4^+ - N$  质量浓度， $mg \cdot L^{-1}$ ； $C_{NO_3^- - N, in}, C_{NO_3^- - N, ef}$  分别为好氧区进出水  $NO_3^- - N$  质量浓度， $mg \cdot L^{-1}$ ； $C_{NO_2^- - N, in}, C_{NO_2^- - N, ef}$  分别为好氧区进水  $NO_2^- - N$  质量浓度， $mg \cdot L^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行效能

针对 P1、P2 2 个阶段，考察系统在调控 DO 前后对有机物、氮、磷等污染物的转化去除效果。实验过程中污水厂进出水 COD 变化情况见图 2。P1 和 P2 阶段污水厂出水 COD 值无显著差异。P1 阶段实际进水 COD 平均值为  $215 mg \cdot L^{-1}$  (C/N=4.4:1)，外加碳源 COD 当量平均值为  $41 mg \cdot L^{-1}$  (总 C/N=5.2:1)；P2 阶段实际进水 COD 平均值为  $244 mg \cdot L^{-1}$  (C/N=4.2:1)。在 P2 阶段降低好氧池 DO 浓度后，污水厂出水 COD 值基本维持在  $25 mg \cdot L^{-1}$  以下，490 d 后出水 COD 略有上升，但仍然满足排放要求。COD 平均去除率由 P1 阶段的 91.5% 变为 P2 阶段的 92.5%，变化不明显，可见 DO 的降低对有机物的去除几乎无影响。

2 个阶段的  $NH_4^+ - N$ 、TN 去除及  $NO_2^- - N$  积累情况见图 3。P1 和 P2 阶段对  $NH_4^+ - N$  的去除效果无显著差异。2 个阶段污水厂进水  $NH_4^+ - N$  平均质量浓度分别为  $46.6 mg \cdot L^{-1}$  和  $49.6 mg \cdot L^{-1}$ ，降低好氧区 DO 浓度后，P1 和 P2 阶段污水厂

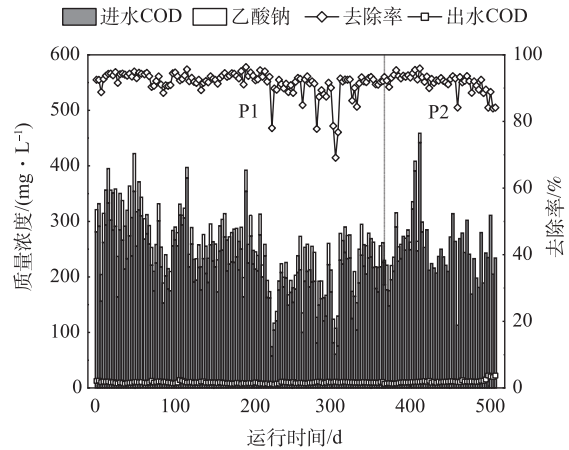


图 2 进出水 COD、乙酸钠投加量及 COD 去除率变化  
Fig. 2 Changes of influent and effluent COD, sodium acetate dosage and COD removal ratio

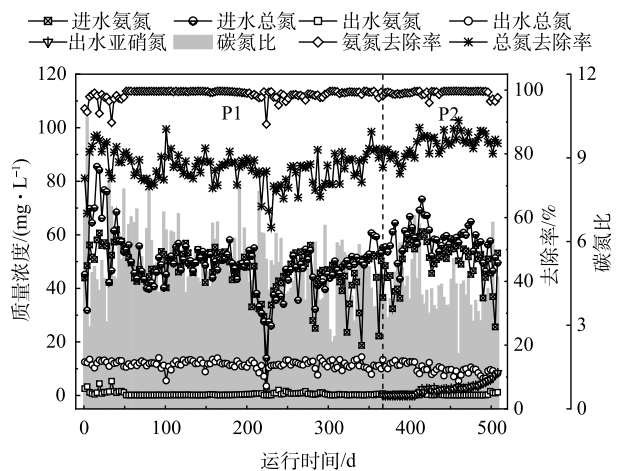


图 3 进出水氨氮、总氮、亚硝氮及碳氮比、氨氮去除率、总氮去除率变化  
Fig. 3 Changes of influent and effluent  $NH_4^+ - N$ , TN,  $NO_2^- - N$  and C/N, removal rate of  $NH_4^+ - N$ , TN

出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度基本都维持在  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 平均去除率在 97% 以上。可见 DO 浓度的降低对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除效果无显著影响。

P2 阶段污水厂对总氮的去除效果明显好于 P1 阶段。P1 阶段污水厂进水和出水 TN 平均质量浓度分别为  $48.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $11.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率为 76.3%; P2 阶段污水厂进出水 TN 平均质量浓度分别为  $57.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $9.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率升高至 82.9%。P2 阶段, 本研究在控制 DO 浓度、降低外加碳源的同时, 硝化液回流比从 P1 阶段的 370% 逐渐下调, 最终调整为 P2 阶段的 90%, 再加上 100% 的污泥回流比, TN 的理论去除率应从 82.5% 降至 65.5%。P1 阶段的 TN 平均去除率低于理论去除率; 然而, P2 阶段的 TN 去除率却明显高于理论去除率。控制溶解氧浓度及减少碳源投加控制策略下, 污水处理厂的脱氮能力非但没有降低, 反而显著提升。

P2 阶段开始对污水厂出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度进行跟踪检测, 结果如图 3 所示。长期低 DO 运行条件下, 出水 TN 逐渐以  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  为主。第 367~406 天, 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度几乎为 0, 之后逐渐升高, 在 508 d 时达到最高值  $8.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 有明显的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  积累。这与姚丽婷等在小试实验中的研究结果一致。在低 DO 条件下, 会出现显著的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  积累现象, 主要原因为亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 受到抑制, 氨氧化菌 (AOB) 逐渐成为优势菌, 最终实现短程硝化<sup>[12]</sup>。P2 阶段开始逐渐停止外加碳源, C/N 从 5.2:1(含外加碳源) 降至 4.2:1, 而 TN 去除效果却明显有提升。其原因之一可能是降低 DO 后, 好氧区发生短程硝化, 而反硝化去除  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  所需电子供体仅为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的 60%, 大大降低了污水厂脱氮对碳源的需求<sup>[13]</sup>, 也是保障低碳源条件下脱氮效能的关键因素之一。

污水厂 2 个阶段 TP 去除效果见图 4。P2 阶段污水厂对 TP 的去除效果优于 P1 阶段。降低好氧区 DO 浓度后, TP 的去除效果有明显提升, 沉淀池出水平均质量浓度从  $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降至  $0.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率由 87.0% 上升至 92.7%, 说明 DO 浓度的降低提升了污水处理系统的除磷效果。池玉蕾等在小试实验研究中得出同样的结果, 认为低 DO 条件促进了系统中除磷功能微生物的生长, 从而表现出更好的除磷效能<sup>[10]</sup>。

为探究低 DO 条件下污水厂脱氮能力提升的原因, 分别于 P2 阶段的第 392、475、493、499 天监测各生化单元的出水水质情况, 结果如图 5 所示。COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与 TP 在各池体单元的去除规律无显著变化。其中, 在厌氧池中的 COD 显著下降。分析主要原因为非溶解性有机物在厌氧池被活性污泥快速吸附及污泥回流 (100%) 的稀释作用<sup>[14-15]</sup>。

P2 阶段降低 DO 后, 短程硝化作用逐渐显现。第 392、475、493、499 天,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在好氧池的转化量基本无差异; 然而, 随着时间的增加, 好氧池末端出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度逐渐降低, 分别为 11.1、7.8、1.7 和  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 好氧池末端出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度逐渐升高, 分别为 0、2.6、5.0、 $5.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。长期低 DO 运行条件下, 好氧池对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的转化逐渐从全程硝化变为短程硝化。此外, 第 475、493、499 天, 好氧池出现了明显的 TN 脱除现象。

P2 阶段低 DO 运行条件下, 针对好氧区的氮转化平衡问题进行分析, 结果如图 6 所示。P2 阶段好氧区全程硝化逐渐转化为短程硝化, 且表现出明显的脱氮效果。392 d 时, 好氧区主要发生全程硝化, 之后好氧区全程硝化比例不断下降, 由 392 d 的 94.1% 降至 499 d 的 0.7%, 而短程硝化的比例从 0 增加到 38.0%。然而, 值得注意的是, 在长期低 DO 运行条件下, 除了全程硝化和短程硝

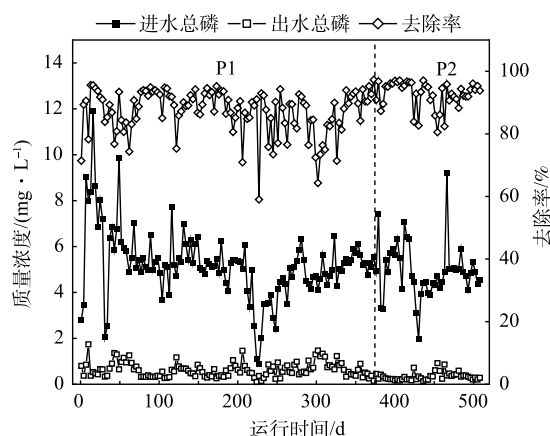


图 4 进出水总磷及去除率变化

Fig. 4 Changes of influent and effluent TP and removal ratio

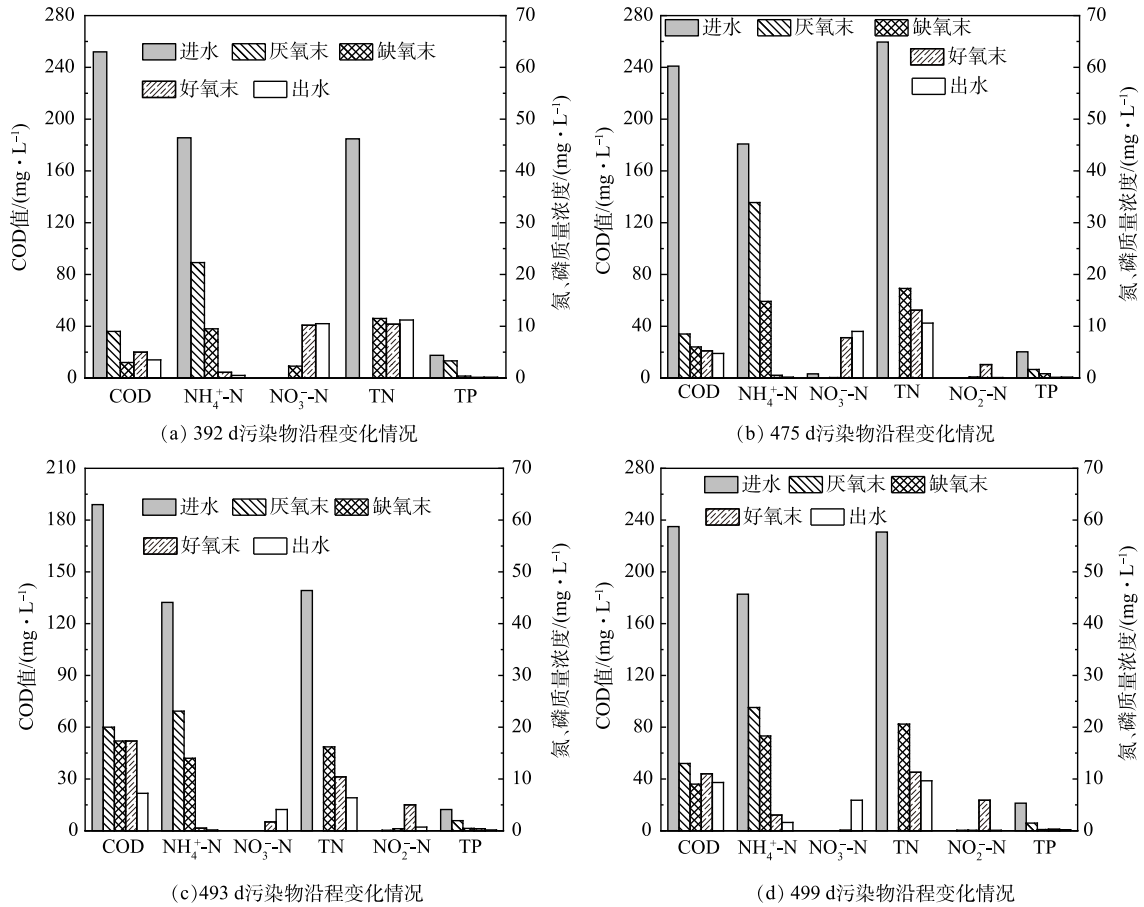


图 5 各工艺阶段 COD、氮、磷质量浓度

Fig. 5 COD, N, P mass concentration at each process stages

化外，仍有部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  既未转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  也未转化为  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。该部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的比例由 392 d 的 0 逐渐上升至 499 d 的 61.3%。基于好氧区的低 DO 及  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  持续积累状态，推测本研究在好氧区发生了同步脱氮作用，可能为同步硝化(也可能短程硝化)反硝化或者厌氧氨氧化作用。

### 2.2 微生物种群结构分析

为进一步探索 P1 和 P2 阶段污水厂表观差异的内部机制，对 2 个阶段污水厂好氧区的微生物进行宏基因组学测序并对比分析。微生物在门水平的群落结构如图 7(a) 所示。长期低 DO 运行条件造成污水处理系统内微生物在门水平上差异性显著。P1 阶段系统内的优势菌为 *Proteobacteria*(36.3%)，其次为 *Chloroflexi*(20.0%) 与 *Actinobacteria*(17.7%)；P2 阶段系统中丰度最高的仍为 *Proteobacteria*(40.8%)，而 *Chloroflexi*(15.1%) 明显下降 *Actinobacteria*(23.0%) 显著升高。此外，值得注意的是，*Nitrospirae*(亚硝酸盐氧化相关菌门)的丰度由 P1 阶段的 2.2% 下降至 P2 阶段的 0.6%。

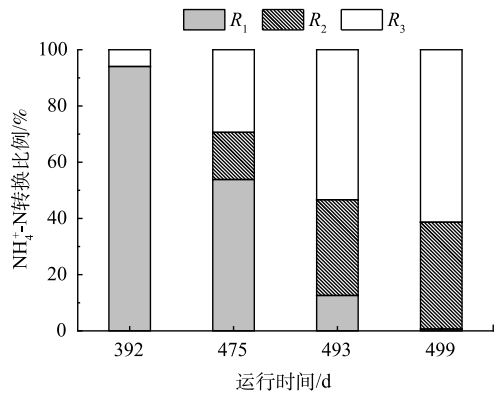


图 6 好氧区氨氮硝化率、亚硝化率、同步脱氮率的变化  
Fig. 6 Variation of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  nitrification ratio, nitrosation ratio and simultaneous denitrification ratio in aerobic zone

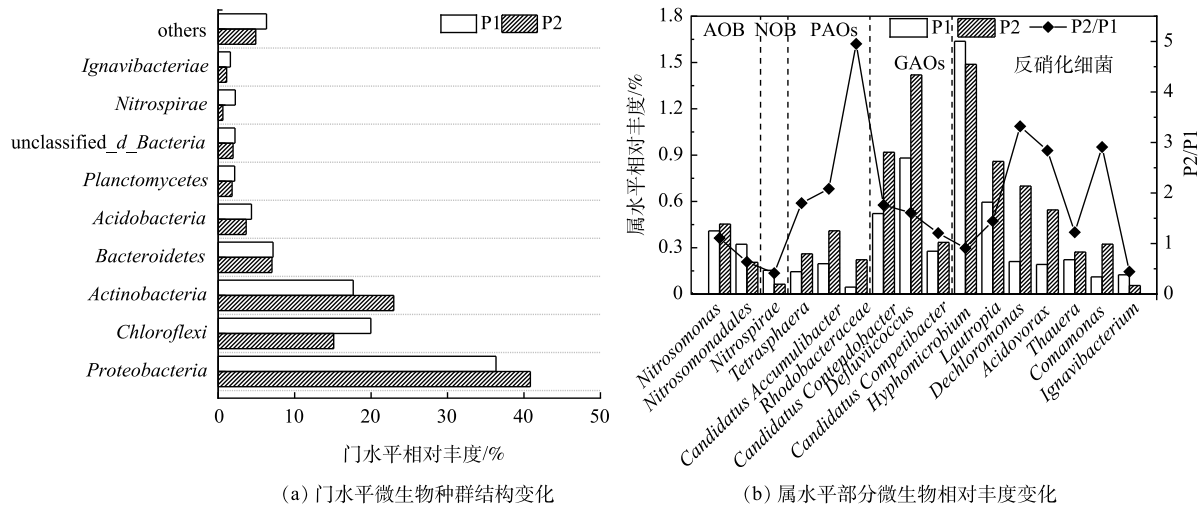


图7 微生物相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of microorganism

微生物在属水平的丰度如图7(b)所示。P1和P2阶段系统内脱氮除磷主要功能微生物在属水平的差异性同样显著。硝化作用相关功能微生物变化为：氨氧化菌(AOB)*Nitrosomonas*和*Nitrosomonadales*的丰度分别由P1阶段的0.41%、0.32%变化至P2阶段的0.45%、0.21%，总丰度略有下降；而亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)*Nitrospirae*的丰度却从P1阶段的0.15%大幅下降至P2阶段的0.06%<sup>[16]</sup>。由此可见，低DO运行条件对NO<sub>B</sub>的明显抑制作用，可能是造成好氧区NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累的主要因素。

长期低DO运行条件下，P2阶段系统内反硝化功能微生物*Hyphomicrobium*、*Lautropia*、*Dechloromonas*、*Acidovorax*、*Thauera*、*Comamonas*、*Ignavibacterium*总体较P1阶段有所增加<sup>[17-19]</sup>，相对丰度为原来的1.4倍。此外，P2阶段系统中除磷菌(PAOs)*Candidatus Accumulibacter*、*Rhodobacteraceae*和聚糖菌(GAOs)*Defluviicoccus*、*Candidatus Competibacter*均较P1阶段有显著提升，总的相对丰度为P1阶段的1.7倍。有研究表明，这4种功能菌能够利用厌氧期储存的内碳源进行反硝化脱氮<sup>[20-21]</sup>。由此可见，低DO条件下系统内各反硝化功能微生物的增加同样是保障低碳源脱氮的关键。

长期低DO运行条件下，好氧区氮平衡的分析结果表明，好氧区有明显的氨氮(总氮)缺失，推测其原因可能为好氧区发生同步硝化反硝化或者厌氧氨氧化。ZHANG等的研究表明，在低DO条件下部分GAOs、PAOs在厌氧段储存的内碳源未被完全消耗，微氧条件下仍然能够进行反硝化脱氮<sup>[22]</sup>。而对于微生物的分析中，未发现厌氧氨氧化相关的功能微生物，认为未发生厌氧氨氧化作用。因此，本研究认为长期低DO运行条件促使具备反硝化功能的PAOs与GAOs丰度升高，在好氧区形成了基于内碳源的同步反硝化(包括亚硝氮反硝化)作用，从而在无外加碳源及降低内回流的条件下提高了污水厂对低碳源污水的脱氮效能。

此外，上节研究结果表明在长期低DO运行条件下，系统除磷效果有明显提升。基于此，对系统内除磷相关功能微生物进行分析。结果表明，低DO运行条件下，除具备反硝化除磷功能的*Candidatus Accumulibacter*、*Rhodobacteraceae*(能利用DO或NO<sub>3</sub><sup>-</sup>作为电子受体的PAOs)外，系统内另外一种除磷菌*Tetrasphaera*(仅能利用DO作为电子受体的PAOs)的丰度也有显著提升，P2阶段3种菌属在系统中的总丰度为P1阶段的2.3倍。分析其原因可能为，低DO运行条件下，提高了有机物作为内碳源用于生物除磷的利用率，促进了除磷相关功能微生物的生长，从而提升了系统的除磷效能<sup>[10]</sup>。

基于功能微生物数据，对P1、P2 2个阶段污水处理系统内氮代谢相关功能基因进行分析，结

果如图8所示。2个阶段微生物脱氮相关的主要功能基因丰度有显著性差异。P2阶段降低DO后，氨氧化相关功能基因AmoCAB总丰度几乎未变，亚硝酸盐氧化还原酶功能基因NxrAB和硝酸盐还原酶功能基因NarGHI/NapAB总丰度分别下降了6.7%和4.2%，亚硝酸盐还原酶功能基因NirKS总丰度升高了13.5%<sup>[23-24]</sup>。结合表观效能及功能微生物丰度数据，推测系统中存在的一个内部机制为：长期低DO运行条件可抑制NOB，导致Nxr基因相对丰度下降，造成NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N生成量减少、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累；而长期低NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、高NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N条件下，Nar/Nap基因相对丰度降低，Nir基因相对丰度升高，也是保障无外加碳源条件下低C/N进水城镇污水厂脱氮效能的关键因素之一。

### 2.3 经济效益分析

长期低DO运行条件下，为污水厂带来的经济效益主要体现在3个方面：1) 节省外加碳源，药剂费用大大降低；2) 曝气量降低，电耗费用减少；3) 低DO、低/无外加碳源条件下，污泥产量降低，污泥处理处置成本降低。污水采用低DO运行策略所带来的主要经济效益计算见表3，其中乙酸钠(含量20%)750元·t<sup>-1</sup>，电费0.52元·(kWh)<sup>-1</sup>，污泥处理费(80%含水率)270元·t<sup>-1</sup>，P2阶段的污水厂运行费用比P1阶段降低2.44万元·d<sup>-1</sup>，吨水处理费用减少0.3元。

## 3 结论

1) 长期低DO运行策略下，低C/N进水城镇污水厂(A<sup>2</sup>O工艺)逐渐停止外加碳源，在硝化液回流比由370%降低到90%的过程中，TN去除效果不降反升，平均去除率由76.3%提升至82.9%。这主要由于好氧区短程硝化和同步反硝化作用比例的升高所致。

2) 短程硝化作用的内在原因为长期低DO条件对AOB抑制作用小，对NOB抑制作用明显，NOB的丰度从0.15%下降至0.06%，亚硝酸盐氧化还原酶功能基因NxrAB丰度显著下降，造成NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累。

3) 好氧区同步反硝化作用的内在原因为低DO条件下具备反硝化功能的PAOs与GAOs比例升高，总丰度从2.06%提升至3.57%，好氧区低DO条件下利用厌氧期储存的内碳源完成反硝化脱氮；而内碳源利用率的提升又促进了PAOs的生长，提升了除磷效能。

4) 低DO运行策略下，污水厂外加碳源、曝气电耗、污泥处理等费用大大降低，吨水处理费用节省0.3元。

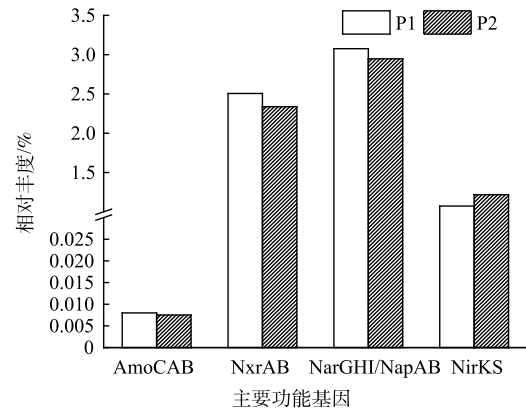


图8 部分脱氮基因相对丰度

Fig. 8 Relative abundance of partial denitrification genes

表3 污水厂经济效益表

Table 3 The economic benefit calculation of sewage treatment plant

项目	乙酸钠用量/ (t·d <sup>-1</sup> )	曝气电耗/ (kWh·d <sup>-1</sup> )	污泥产量/ (t·d <sup>-1</sup> )	费用/ (万元·d <sup>-1</sup> )
P1阶段	20	9 600	76	4.05
P2阶段	0	3 960	52	1.61

## 参考文献

- [1] 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/A/O泥膜耦合工艺脱氮除磷的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15: 1744-52.
- [2] ZHANG M, WANG Y, FAN Y, et al. Bioaugmentation of low C/N ratio wastewater: effect of acetate and propionate on nutrient removal, substrate transformation, and microbial community behavior[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 306: 122465.
- [3] 朱启荣, 操家顺, 张腾, 等. 污水厂反硝化传统及可供替代碳源研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50: 1600-6.
- [4] 尹亚云, 蒲文鹏, 陈永娟, 等. 污水处理厂外加碳源模拟优化研究[J]. *给水排水*, 2021, 57: 156-9.
- [5] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37: 65-74.
- [6] JIN P, CHEN Y, XU T, et al. Efficient nitrogen removal by simultaneous heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium in a purification tank bioreactor amended with two-stage dissolved oxygen control[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 392-400.
- [7] 赵智超, 黄剑明, 李健, 等. 间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷[J]. *环境科学*, 2019, 40: 799-807.
- [8] LIU X, HU S, SUN R, et al. Dissolved oxygen disturbs nitrate transformation by modifying microbial community, co-occurrence networks, and functional genes during aerobic-anoxic transition[J]. *Science of The Total Environment*, 2021: 790.
- [9] XU G, ZHANG Z, GAO F. 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).
- [10] 池玉蕾, 石焯, 任童, 等. 溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42: 4374-82.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 第4版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 姚丽婷, 梁瑜海, 陈漫霞, 等. 高溶解氧条件下不同曝气量对短程硝化性能及微生物特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41: 3258-67.
- [13] 陈思宇, 张绍青, 陈鹏, 等. 基于短程反硝化的生物脱氮技术研究进展[J]. *环境工程*, 2021, 39: 38-44.
- [14] 王东, 王小东, 朱引, 等. 生物吸附-多级A/O-活性焦组合工艺对污水中氮磷及有机污染物的去除[J]. *环境工程学报*, 2018, 12: 1907-16.
- [15] 朱明璇, 李梅, 王洪波, 等. 污泥对有机物的去除效果及荧光特性研究[J]. *应用化工*, 2020, 49: 1457-62.
- [16] WANG J, RONG H, ZHANG C. Evaluation of the impact of dissolved oxygen concentration on biofilm microbial community in sequencing batch biofilm reactor[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2018, 125(5): 532-42.
- [17] XIN X, QIN J. Rapid start-up of partial nitritation in aerobic granular sludge bioreactor and the analysis of bacterial community dynamics[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2019, 42(12): 1973-81.
- [18] YANG N, ZHAN G, LI D, et al. Performance and microbial community of a novel non-aeration-based up-flow bioelectrochemical filter (UBEF) treating real domestic wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 348: 271-80.
- [19] 徐翩翩, 孟佳, 汪聪, 等. 限氧废水处理系统的再启动与ANAMMOX功能恢复[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51: 32-8.
- [20] OEHMEN A, CARVALHO G, LOPEZ-VAZQUEZ C M, et al. Incorporating microbial ecology into the metabolic modelling of polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2010, 44(17): 4992-5004.
- [21] CHU G, YU D, WANG X, et al. Comparison of nitrite accumulation performance and microbial community structure in endogenous partial denitrification process with acetate and glucose served as carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Pt B): 124405.
- [22] ZHANG F, PENG Y, LIU Z, et al. Development of a novel partial nitrification, fermentation-based double denitrification bioprocess (PN-F-Double/DN) to simultaneous treatment of mature landfill leachate and waste activated sludge[J]. *Water Research*, 2021, 203: 117540.
- [23] 王朱珺, 王尚, 刘洋炎, 等. 宏基因组技术在氮循环功能微生物分子检测研究中的应用[J]. *生物技术通报*, 2018, 34: 1-14.
- [24] ASAMOTO C K, REMPFERT K R, LUU V H, et al. Enzyme-specific coupling of oxygen and nitrogen isotope fractionation of the nap and nar nitrate reductases[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 5537-46.

(责任编辑: 曲娜)



## The efficiency and microbial community change of urban sewage plant with low C/N influent based on low DO strategy

WU Fanglei<sup>1</sup>, HE Hangyun<sup>1</sup>, CHEN Bohan<sup>2</sup>, LIU Lixiang<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2,\*</sup>, DU Peitan<sup>3</sup>, CHEN Xiao<sup>3</sup>

1. Shenzhen Huanshui Investment Group Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. School of civil and environmental engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China; 3. Tengzhou Shenshui Shenteng Wastewater Treatment Co. Ltd., Tengzhou 277500, China

\*Corresponding author, E-mail: 1039777428@qq.com

**Abstract** Low C/N influent wastewater plants usually need additional carbon source to ensure nitrogen and phosphorus removal efficiency, leading to the high operation cost. In order to get rid of external carbon sources for low C/N wastewater treatment and reduce operation cost, a comprehensive efficiency study was carried out in an urban wastewater treatment plant with A<sup>2</sup>O process in Shandong Province based on low DO regulation strategy. The results showed that under the long-term low DO operation strategy, when the wastewater plant gradually stopped additional carbon sources and decreased the reflux ratio of nitrification liquid from 370% to 90%, TN average removal rate increased from 76.3% to 82.9%, and phosphorus removal effect also increased. The analysis of nitrogen balance in aerobic zone showed that the transformation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in aerobic zone was gradually dominated by partial nitrification and simultaneous denitrification under low DO condition. Microbial metagenomics results showed that under low DO condition, the abundance of NOB decreased from 0.15% to 0.06%, while the total abundance of PAOs and GAOs with denitrifying function increased from 2.06% to 3.57%. The significant improvement of nitrogen removal efficiency under long-term low DO and no external carbon source was mainly due to the increased proportion of partial nitrification and simultaneous denitrification in aerobic zone. Low DO had slight inhibitory effect on AOB, while inhibited NOB significantly, resulting in NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N accumulation and ensuring TN removal efficiency. PAOs and GAOs used the internal carbon source stored in the anaerobic stage for denitrification in the aerobic zone, which improved the denitrification efficiency. The improvement of internal carbon source utilization rate promoted the growth of PAOs and raised phosphorus removal efficiency. In addition, under the low DO operation strategy of the sewage plant, the operating cost was saved and the wastewater treatment cost was reduced by 0.3 yuan per ton wastewater.

**Keywords** low dissolved oxygen; low carbon nitrogen ratio; carbon source; partial nitrification; simultaneous denitrification