



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202111074 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

梁潇, 姚新运, 李亮, 等. 城镇污水 AAOA 高标准除磷脱氮技术开发与应用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 612-620. [LIANG Xiao, YAO Xinyun, LI Liang, et al. Development and application of AAOA high-standard phosphorus and nitrogen removal technology for urban sewage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 612-620.]

# 城镇污水 AAOA 高标准除磷脱氮技术开发与应用

梁潇<sup>1</sup>, 姚新运<sup>1</sup>, 李亮<sup>2</sup>, 龚本洲<sup>2</sup>, 徐奇奇<sup>1</sup>, 周炯<sup>1</sup>, 周健<sup>1,✉</sup>

1. 重庆大学环境与生态学院, 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, 武汉 430010

**摘要** 针对城镇污水在高标准除磷脱氮过程中碳源不足的问题, 提出了基于多路径协同的 AAOA 除磷脱氮技术, 探究了 AAOA 系统实现高标准除磷脱氮对进水 C/N 的要求, 并对实际城镇污水处理进行了实验研究。结果表明: 当进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时, 系统 TN 去除率分别为 74.12%、84.90%、90.05%, TP 去除率分别为 48.29%、97.68%、98.50%; 当进水 C/N $\geq$ 7.5 时, 系统可以实现高标准脱氮除磷。16S rRNA 高通量测序结果表明: 系统中脱氮除磷功能菌属主要有 *Aeromonas*、*Nitrospira*、*Aeromonas*、*Comamonadaceae\_unclassified*、*Uliginosibacterium*、*Saccharibacteria\_norank*、*Candidatus\_Accumulibacter*、*Aeromonas*、*Pseudomonas*、*Dechloromonas*, 系统通过自养硝化、异养硝化、异养反硝化、反硝化聚磷、好氧反硝化等多条路径协同作用实现了高标准除磷脱氮。同时, 采用 AAOA 系统处理城镇污水, 当城镇污水进水 C/N 为 7.5 时, 系统出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均质量浓度分别为 0.40、3.57、0.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别达到 98.76%、89.03% 和 95.55%, 即无需外加碳源可实现城镇污水的高标准除磷脱氮。

**关键词** 城镇污水; AAOA; 除磷脱氮; C/N; 高标准

随着我国大量城镇污水处理厂的建成运行, 排入水环境容量小的敏感受纳水体的城镇污水厂尾水排放量日益增加, 北京、昆明、河北、浙江<sup>[1]</sup>等地相继提出了《城镇污水处理厂污染物排放标准》地方排放标准, 这些标准中的高标准要求出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 限值分别为 1.0~1.5、5~10、0.05~0.3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 比现行国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级标准 A 标准更严格。因此, 对城镇污水进行高标准深度除磷脱氮成为当务之急。

传统 A<sup>2</sup>O 工艺的脱氮和除磷过程均需要碳源<sup>[2]</sup>, 对于 C/N 较低的城市污水难以实现氮、磷同步高标准深度去除。为解决传统 A<sup>2</sup>O 工艺中碳源不足的问题, 曹贵华采用分段多点进水方式降低碳源损耗, 以提高 A<sup>2</sup>O 工艺的碳源利用率<sup>[3]</sup>。此外, 有研究者提出通过新的脱氮除磷路径减少对碳源的需求。如短程硝化反硝化脱氮可节省 40% 的碳源, 但短程硝化反硝化效能易受 DO、温度、泥龄影响<sup>[4-5]</sup>, 不能实现稳定的短程硝化。而反硝化除磷技术则利用反硝化聚磷菌, 以硝态氮为电子受体分解胞内储存的 PHAs, 利用产生的能量吸磷, 通过“一碳两用”同时脱氮和除磷<sup>[6]</sup>, 可节省

收稿日期: 2021-11-13; 录用日期: 2021-12-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07307-002); 城市污水低耗型高标准脱氮技术研究 (CX2019Z28)

第一作者: 梁潇 (1994—), 男, 硕士研究生, 372228941@qq.com; ✉通信作者: 周健 (1964—), 女, 博士, 教授, 15523829081@126.com

碳源 50%。因此, 罗亚红在 A<sup>2</sup>O 工艺末端进行间歇曝气构建了反硝化除磷系统, 在除磷脱氮的同时可减少碳耗及能耗<sup>[7]</sup>, 但该系统对氮、磷去除效能的提升有限。陈永志<sup>[8]</sup>构建了 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺, 利用反硝化除磷路径减少碳源消耗, 但仍然难以实现高标准除磷脱氮。此外, 好氧反硝化是一种新型脱氮途径, 在好氧过程中进行好氧反硝化脱氮, 可以减少好氧过程中的碳源损耗<sup>[9]</sup>。

针对城镇污水 AAO 工艺进行高标准除磷脱氮存在的碳源不足问题, 本研究构建了城镇污水厌氧/缺氧/好氧/缺氧 (anaerobic-anoxic-aerobic-anoxic, 简称 AAOA) 的除磷脱氮技术, 在不补充碳源条件下, 通过多路径耦合的城镇污水脱氮除磷技术实现城镇污水的高标准除磷脱氮。重点探究了在进水 C/N 对城镇污水 AAOA 系统深度除磷脱氮效能的影响, 确定了 AAOA 系统实现高标准脱氮需要的 C/N; 解析了污染物沿程去除规律, 并利用 16S rRNA 高通量测序技术探究了系统微生物种群结构及微生物作用机制。在此基础上, 开展了实际城镇污水 AAOA 处理实验, 在不补充碳源条件下, 通过构建多路径除磷脱氮的 AAOA 系统, 实现城镇污水高标准脱氮除磷。本研究结果可为城镇污水高标准除磷脱氮以及传统 A<sup>2</sup>O 工艺的城镇污水厂的提标改造提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, AAOA 反应器小试装置有效容积为 40 L, 实际城镇污水处理实验装置有效容积为 200 L, 反应器由厌氧、缺氧、好氧、后缺氧工艺段构成, 各工艺段体积比 1:2:4:1。

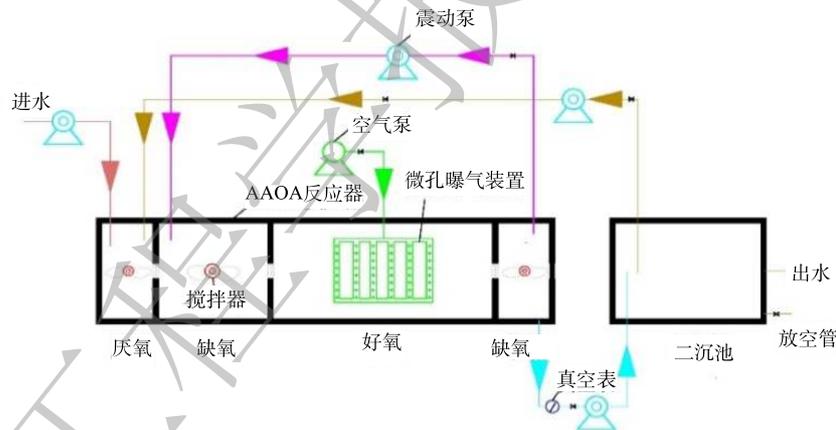


图 1 实验装置平面图

Fig. 1 Schematic diagram

### 1.2 实验水质

实验分 2 个阶段进行: 第 1 阶段小试实验废水采用人工配水模拟城镇污水, 主要由乙酸钠、淀粉、奶粉、氯化铵、磷酸二氢钾、氯化钙、硫酸铁配制而成, 根据当地城镇污水厂实际运行水质, 模拟了 3 种 C/N(6、7.5、9) 的城镇污水水质 (表 1); 第 2 阶段在城镇污水厂进行, 采用某污水厂生化池前配水井中的实际城镇污水, 实验水质如表 2 所示。

### 1.3 实验方法

通过模拟不同进水 C/N 的城镇污水, 探究 AAOA 系统实现城镇污水高标准除磷脱氮适宜的进水 C/N。在温度为 20 ℃、TN 负荷为

表 1 小试实验水质

Table 1 Quality of wastewater in lab test

C/N	COD和氮磷质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )			
	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
6	254±4	38.52±0.37	40.50±0.57	5.40±0.34
7.5	318±5	38.83±0.78	40.56±1.05	5.13±0.26
9	371±5	39.55±1.36	40.85±1.62	5.30±0.34

$0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  负荷为  $0.02 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、水力停留时间为 8 h(厌氧、缺氧 I、好氧、缺氧 II 段水力停留时间分别为 1、2、4、1 h)、好氧段 DO 为  $2.00 \sim 3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、混合液和污泥回流比 R1 和 R2 均为 200%、泥龄为 40 d 的条件下运行反应器, 采用阶段实验, 控制进水 C/N 分别为 6、7.5、9。

在城镇污水厂开展基于实际城镇污水的 AAOA 系统处理效能实验。在温度为  $23 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、有机负荷为  $0.40 \sim 0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、TN 负荷为  $0.08 \sim 0.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  负荷为  $0.01 \sim 0.02 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、泥龄为 40 d、水力停留时间为 8 h(厌氧、缺氧 I、好氧、缺氧 II 段水力停留时间分别为 1、2、4、1 h)、好氧段 DO 为  $1.50 \sim 2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、混合液和污泥回流比 R1 和 R2 均为 200%, 在不补充碳源条件下, 探究 AAOA 系统对实际城镇污水的深度除磷脱氮效能。

实验期间测试反应器进、出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  等水质指标。系统稳定运行后, 测试污染物在各工艺段的沿程降解规律。进行 16S rRNA 高通量测序的生物样品, 取自 C/N 为 7.5 反应器运行第 30 天时, AAOA 系统的二沉池, 采集的生物样品送至生物公司进行测试, 包括基因组 DNA 的提取、PCR 扩增、荧光定量、Miseq 文库构建、Miseq 测序、OTU 聚类、分类学分析。采用针对 16S rRNA 基因 V3~V4 高变区的引物 338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R (GGACTAC HVGGGTWTCTAAT) 进行扩增, PCR 扩增采用 Transstart fastpfu DNA 聚合酶, 所有 PCR 产物均使用 QuantiFluor-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega, 美国) 进行定量测定, 并通过 PacBio RS II 测序平台对文库进行测序, 测序数据利用 Mothur 软件对种群估计量进行计算和分析, 探究系统微生物种群。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同进水 C/N 条件下 AAOA 系统的处理效能

在不同 C/N 进水条件下, AAOA 系统的处理效能见图 2。当系统进水 C/N 由 6 增加到 9 时, 系统出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度由  $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升到  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均去除率由 99.91% 下降到 99.66%, 系统对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率维持在 99% 以上。这是由于前置的厌氧、缺氧段充分利用进水中的碳源进行厌氧释磷和反硝化脱氮, 使得好氧段进水中有机物浓度较低; 同时, 较高的泥龄有利于好氧段自养硝化菌的增殖富集, 使系统保持高效硝化效能。当系统进水 C/N 由 6、7.5、9 时, 系统出水 COD 平均值分别为 16、18、 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , COD 净去除量分别为 238、300、 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 随着 C/N 增加, 系统对 COD 的净去除量增加。这是由于随着 C/N 增加, 系统除磷脱氮效能提高, 用于生物除磷脱氮的碳源增加, 有机碳源利用率增加, 使得系统对 COD 去除能力增强。进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时, 系统出水 TN 平均质量浓度分别为 10.49、6.13、 $4.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN 平均去除率分别为 74.12%、84.50%、90.05%。相关研究表明, 当城镇污水 C/N 为 6 和 7.5 时, AOA 工艺的 TN 去除率分别为 62%、65%<sup>[10]</sup>。相比之下, AAOA 系统对 TN 去除率有大幅提升。这是由于系统中成功富集了异养反硝化、内碳源反硝化、反硝化聚磷、好氧反硝化菌属 (第 2.3 节), 系统通过其多种反硝化路径协同作用, 实现了高效脱氮。当进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时, 系统出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均质量浓度分别为 3.15、0.12、 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率分别为 48.29%、97.68%、98.50%。这是由于 AAOA 系统在空间上依次以厌氧-缺氧-好氧-缺氧方式运行, 其厌氧、缺氧、好氧、缺氧交替状态为聚磷菌和反硝化聚磷菌提供了良好的增殖环境。当 C/N 为 6 时, 由于系统碳源不足, 系统脱氮效能较低, 回流污泥中携带较多硝态氮, 当原水进入厌氧段时, 反硝化菌会首先利用原水中的

表 2 城镇污水实验水质

Table 2 Experimental water quality of urban sewage

统计值	pH	COD和氮磷质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			
		COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
范围	7.00~8.00	148~306	19.00~43.00	21.00~44.00	2.10~5.60
均值	7.45	224	31.00	33.00	3.60

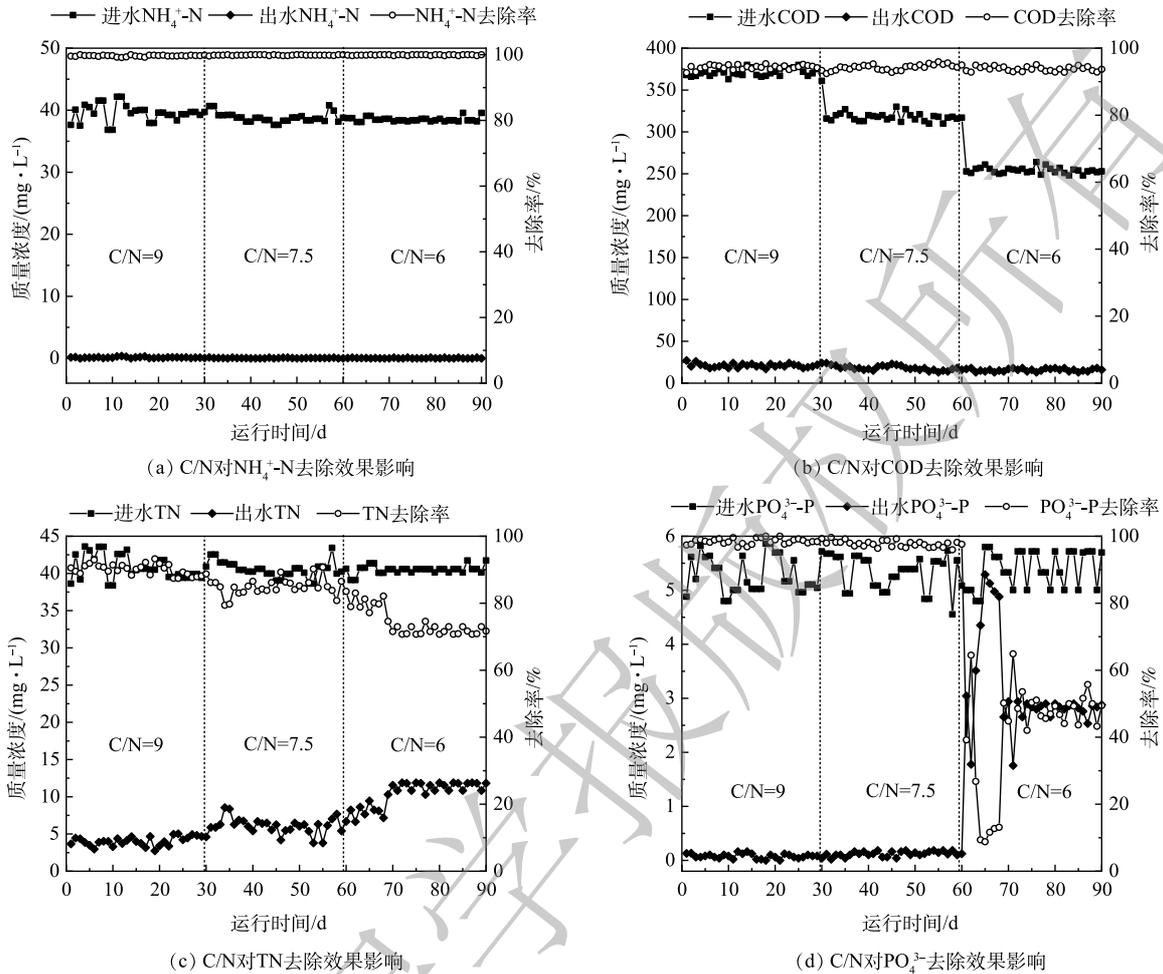


图2 不同进水C/N时系统处理效能逐日变化曲线

Fig. 2 Daily variation curves of system treatment efficiency at different C/N ratios of influent water

碳源进行反硝化，造成反硝化菌和聚磷菌竞争碳源，使得厌氧段释磷时碳源不足，从而影响系统对聚磷菌的富集，使得系统除磷效能较低；当C/N为7.5时，磷去除率大幅增加，但与C/N为9时相比，系统的磷去除率差异不大。这是由于充足的碳源增加促进了聚磷菌的厌氧释磷，有效富集了聚磷菌，有利于系统中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效能提升；同时，厌氧-缺氧-好氧-缺氧方式运行有利于反硝化聚磷菌的富集，在缺氧段中反硝化聚磷菌一碳二用，同时发生的反硝化脱氮和基于硝态氮下的吸磷节省了大量碳源，使系统的除磷效能大幅提高，进而实现高标准除磷。

在不同C/N下，AAOA系统沿程变化见图3。当进水C/N分别为6、7.5、9时，在厌氧段氮磷的变化为：一方面， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度因稀释作用下降，反硝化菌利用进水中的耗氧有机物(以COD计)为碳源进行反硝化脱氮， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被去除，TN质量浓度分别下降至11.64、11.58、11.87  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；另一方面，在该厌氧区，聚磷菌和反硝化聚磷菌(第2.3节)利用进水碳源释磷， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度分别升高至6.25、10.03、16.05  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

厌氧段出水后进入缺氧段I，此时，因混合液回流至缺氧段的稀释作用， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度进一步降低。当进水C/N分别为6、7.5、9时，其 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度几乎为零， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度分别上升至2.01、0.17、0.22  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，硝氮通过异养反硝化、反硝化聚磷菌(第2.3节)去除较为完全，TN质量浓度分别降低为10.91、6.32、5.31  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；同时，通过反硝化聚磷菌反硝化吸磷，在缺氧

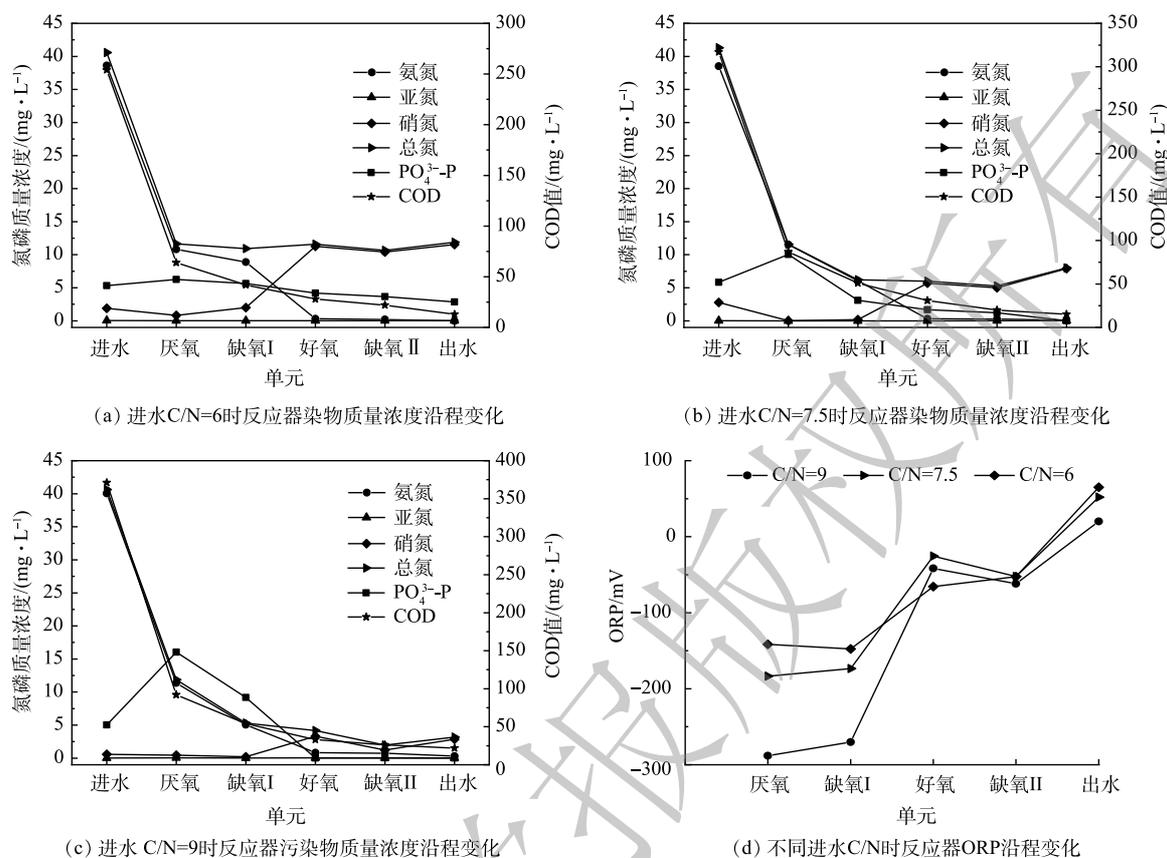


图3 不同进水C/N时系统处理效能沿程变化曲线

Fig. 3 Variation curve of system treatment efficiency along the process at different influent C/N

段  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度分别降低至 5.64、3.10、9.17  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当缺氧段 I 出水进入好氧段后且进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时，系统  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度分别大幅降低至 0.31、0.31、0.84  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，好氧段通过异养和自养硝化细菌（第 2.3 节）共同作用，硝化速率分别达到 19.15、19.10、19.59  $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ， $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度分别上升至 11.26、5.69、3.31  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TN 质量浓度分别为 11.59、6.00、4.18  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；同时，聚磷菌在好氧状态下吸磷， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度分别降低至 4.19、1.68、0.02  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当好氧段出水进入缺氧 II 段， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度基本保持不变；异养反硝化、反硝化聚磷菌利用内碳源进行反硝化脱氮， $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度分别下降至 10.42、4.99、1.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TN 质量浓度随之下降至 10.65、5.26、1.97  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；在通过反硝化聚磷后， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度进一步下降至 3.66、1.23、0.05  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。缺氧 II 段使得回流污泥中的硝氮质量浓度进一步降低，可减少硝氮对厌氧释磷的影响，有利于聚磷菌、内碳源反硝化菌及反硝化聚磷菌在系统中维持优势。

在不同 C/N 下, AAOA 系统各单元的 ORP 指标沿程变化如图 3(d) 所示。当进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时，厌氧段 ORP 分别为 -141.51、-183.51、-288.10 mV，缺氧 I 段 ORP 分别为 -147.60、-173.41、-270.20 mV，好氧段 ORP 分别为 -65.61、-25.60、-41.61 mV，缺氧 II 段 ORP 分别为 -52.50、-52.30、-61.80 mV。随着 C/N 的升高，厌氧段 ORP 大幅下降，液相呈现出的宏观还原性逐渐增强，C/N 越高则 ORP 越低，系统厌氧释磷越充分，有利于系统对磷的去除，这是在不同 C/N 下系统除磷具有差异的重要原因。进入缺氧段后，C/N 越高则 ORP 越低，越有利于反硝化。进入好氧段后 ORP 均大幅升高，系统中大多数还原性物质被氧化，较高的氧化还原电位使系统保持较高的氧化性。出水进入缺氧段 II，不同 C/N 反应器的 ORP 较好氧段略微降低，缺氧段 II 保持一定的缺氧还原态环

境, 可为系统进一步深度反硝化脱氮提供良好的环境。

上述实验结果表明, 进水 C/N 分别为 6、7.5、9 时, 系统 TN 平均去除率分别为 74.12%、84.90%、90.05%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率分别为 48.29%、97.68%、98.5%; 在 3 种 C/N 条件下, 出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  分别为 16、0.04、10.49、3.15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 18、0.05、6.13、0.12  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 20、0.14、4.06、0.08  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当进水 C/N  $\geq 7.5$  时, AAOA 系统出水水质可以达到城镇污水高标准除磷脱氮要求。杨雪莲<sup>[11]</sup>通过改变缺氧池容积强化了 AAO 系统除磷脱氮效率, 但进水 C/N 为 7 时, 其系统出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 质量浓度仍为 7.65  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 11.08  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 黄庆涛<sup>[12]</sup>通过外加碳源的方法提高了 AOA-SBR 工艺除磷脱氮的效果, 当进水 C/N 为 7.5 时, 其出水 TN 仍高达 11.08  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 李茂桥<sup>[13]</sup>通过延长缺氧停留时间改良了 A-AAO 工艺, 但其出水仅能达到现行城镇污水厂污染物排放一级 B 排放标准, 仍未实现高标准除磷脱氮。本研究研发的 AAOA 系统除磷脱氮效能得到了大幅提升。

为探究系统中的硝化途径, 取进水 C/N 为 7.5 反应器中的污泥进行批次实验, 通过在进水中添加碳源和自养硝化抑制剂 ATU 进行实验, 结果见图 4(a)。系统的硝化包括自养硝化与异养硝化, 且自养硝化占据主导。同时, 为探究系统中反硝化途径, 取 C/N 为 7.5 的反应器中 2 L 污泥进行批次实验。取出污泥离心分离后用纯水清洗去除残余 COD, 用纯水定容至 2 L, 以乙酸钠为碳源, 使 COD 为 200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 厌氧反应 120 min, 反应结束后, 将活性污泥离心分离, 再以纯水洗去残余 COD, 分为 2 份进行实验, 投加磷酸二氢钾维持其磷酸盐浓度。其中, 实验 1 为好氧曝气 (DO 为 2~3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 实验 2 加入初始质量浓度为 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  硝酸盐进行缺氧搅拌, 反应时间均为 120 min。缺氧最大除磷速率与好氧最大除磷速率的比值即为反硝化聚磷菌和聚磷菌的比例。结果如图 4(b) 所示, 反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占聚磷菌 (PAOs) 比例为 53%, 证实系统中反硝化除磷为系统主要脱

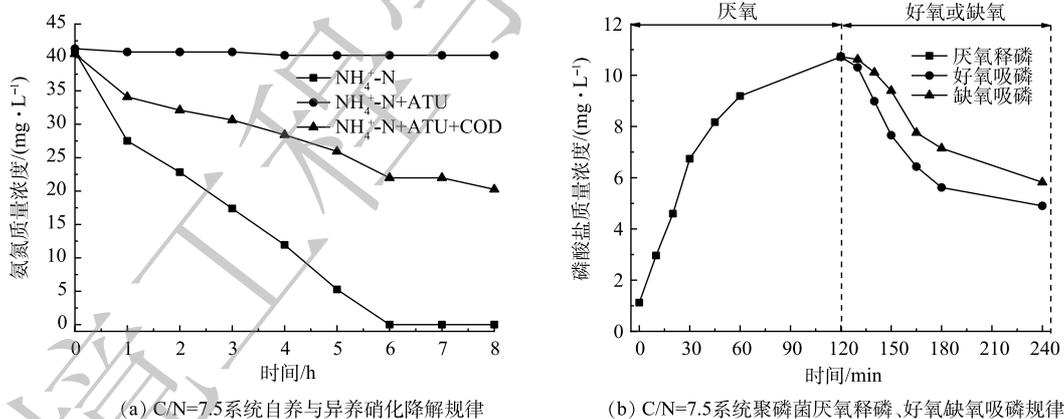


图 4 C/N=7.5 系统脱氮路径批次实验结果

Fig. 4 Batch test results of system nitrogen removal path at C/N of 7.5

氮路径之一。

## 2.2 城镇污水 AAOA 处理效能

实际城镇污水 C/N 为 7.5 左右时, AAOA 反应器处理效能实验结果见表 3 和图 5。

由图 5 可以看出, 当进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度分别为 38.82、40.60、4.92  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 在厌氧段,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度因污泥回流液稀释作用下降到 11.38  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 反硝化菌利用进水中的碳源对  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  进行反硝化脱氮, TN 质量浓度下降至 12.40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 同时, 聚磷菌利用进水中碳源进行释磷,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度升高至 10.88  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。随后在缺氧段 I, 因混合液回流稀释

作用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度降低至 $6.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在反硝化聚磷菌作用下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度降至 $4.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,通过异养反硝化菌和反硝化聚磷菌协同脱氮,TN质量浓度降低至 $6.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在好氧段,在硝化菌作用下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度大幅降低至 $0.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度升高至 $5.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在好氧反硝化菌作用下TN质量浓度下降至 $5.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,同时,通过聚磷菌吸磷, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度降低至 $0.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。进入缺氧段II后,反硝化聚磷菌、异养反硝化菌利用内碳源进行反硝化除磷脱氮, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度进一步分别下降至 $3.51$ 、 $4.07$ 、 $0.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度基本保持不变。反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均质量浓度分别为 $0.40$ 、 $3.57$ 、 $0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均去除率分别达到 $98.76\%$ 、 $89.03\%$ 和 $95.55\%$ ,出水水质达到北京市《城镇污水处理厂污染物排放标准》A标准<sup>[1]</sup>,说明AAOA系统可实现城镇污水高标准除磷脱氮。

[1]

### 2.3 系统微生物种群

将采集的生物样品送至生物公司进行高通量测序测试。包括基因组DNA的提取、PCR扩增、荧光定量、Miseq文库构建、Miseq测序、OTU聚类、分类学分析,使用Mothur软件将样品的Unique Reads序列比对到RDP数据库中,进行物种注释,通过和数据库进行比对,进行物种分类,并分别在门、属水平统计污泥样品的群落组成。如图6所示,系统优势菌门分别为变形菌门*Proteobacteria* (33.16%)、绿弯菌门*Chloroflexi* (28.62%)、拟杆菌门*Bacteroidetes* (18.43%)、迷踪菌门*Elusimicrobia* (12.75%)、*Saccharibacteria* (1.30%)、硝化螺旋菌门*Nitrospirae* (1.20%)。其中,变形菌门*Proteobacteria*相对丰度最高,大多数脱氮除磷菌属均归属于变形菌门<sup>[14]</sup>;拟杆菌门中某些菌属具有好氧反硝化和除磷功能,硝化螺旋菌门中某些菌属具有硝化功能<sup>[15]</sup>。系统内优势硝化功能菌属主要有*Aeromonas* (3.34%)、*Nitrospira* (1.20%);优势反硝化功能菌属主要有好氧反硝化菌属*Aeromonas* (3.34%)、反硝化聚磷菌属*Comamonadaceae\_unclassified* (3.03%)、好氧反硝化菌属*Uliginosibacterium* (1.85%);优势除磷功能菌属主要有聚磷菌属*Candidatus\_Accumulibacte* (4.39%)、反硝化聚磷菌属*Comamonadaceae\_unclassified* (3.03%)、*Dechloromonas* (0.59%)。

其中,气单胞菌*Aeromonas*是一种新型的

表3 实际城镇污水AAOA脱氮除磷效能

Table 3 Nitrogen and phosphorus removal efficiency of AAOA treating actual urban sewage

检测指标	进水检测值/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		出水检测值/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		平均去除率/%
	范围	平均值	范围	平均值	
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	24.10~39.29	32.37±3.78	0.16~0.68	0.40±0.15	98.76
TN	24.81~39.65	32.92±3.71	2.44~4.91	3.57±0.61	89.03
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	3.21~5.63	4.85±0.58	0.05~0.36	0.21±0.07	95.55

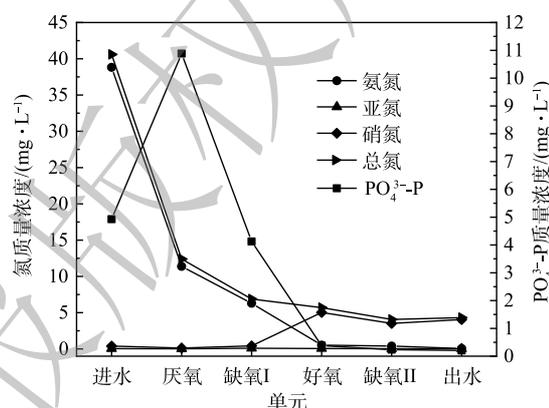


图5 AAOA反应器沿程氮、磷质量浓度变化

Fig. 5 Variation of nitrogen and phosphorus concentration along the AAOA reactor

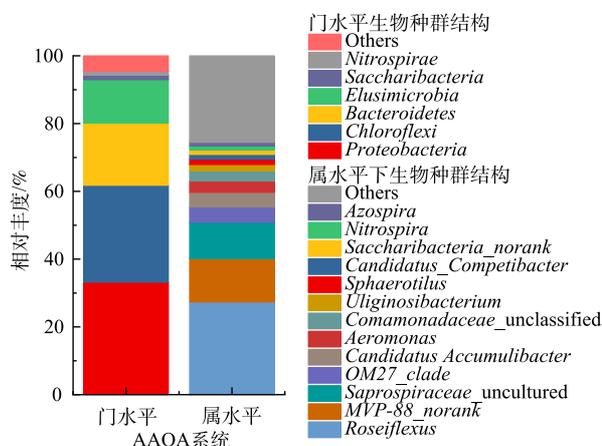


图6 AAOA系统微生物种群结构

Fig. 6 Microbial population structure in the AAOA system

异养氨氧化细菌(AOBs)<sup>[16]</sup>,同时具有好氧反硝化功能,系统脱氮性能与此物种密切相关;硝化螺旋菌属 *Nitrospira* 是一种常见的硝化菌属 (*Nitrifier*), 可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐; *Comamonadaceae\_unclassified* 通常为好氧细菌, 部分 *Comamonadaceae* 被确定为反硝化细菌<sup>[17-18]</sup>, 有研究者发现其具有短程硝化、反硝化聚磷功能<sup>[19]</sup>; *Uliginosibacterium* 为具有好氧反硝化能力的菌群, 能直接将亚硝态氮反硝化<sup>[20]</sup>; *Candidatus\_Accumulibacter* 为聚磷菌<sup>[21]</sup> 是一种  $\beta$ -变形菌; *Accumulibacter phosphatis* 是污水处理厂常见的细菌, 能提高生物除磷能力, 是一种聚磷酸盐积累的有机体<sup>[22]</sup>; *Dechloromonas* 为反硝化聚磷菌属<sup>[23]</sup>。上述结果表明: 在碳源有限的条件下, AAOA 系统通过异养、自养硝化, 异养反硝化、反硝化聚磷、好氧反硝化协同作用可实现高标准脱氮, 通过聚磷菌属和反硝化聚磷菌属协同作用可实现高标准除磷。

### 3 结论

1) 当进水 C/N 为 6、7.5、9 时, AAOA 系统 TN 平均去除率分别为 74.12%、84.90%、90.05%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率分别为 48.29%、97.68%、98.5%; AAOA 系统出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  分别为 16、0.04、10.49、3.15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、18、0.05、6.13、0.12  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 20、0.14、4.06、0.08  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当进水  $\text{C/N}\geq 7.5$  时, AAOA 系统出水水质可以达到城镇污水高标准除磷脱氮要求。

2) 在温度为 23~30  $^{\circ}\text{C}$  时, 有机物、氮、磷负荷分别为 0.40~0.76、0.08~0.12、0.01~0.02  $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , 水力停留时间为 8 h; 在不投加碳源条件下, 城镇污水 AAOA 中试系统出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均质量浓度分别为 0.40、3.57、0.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别达到 98.76%、89.03% 和 95.55%。AAOA 中试系统可以实现对城镇污水高标准除磷脱氮。

3) AAOA 系统内硝化功能菌属主要有 *Aeromonas*、*Nitrospira*, 反硝化功能菌属主要有 *Aeromonas*、*Comamonadaceae\_unclassified*、*Uliginosibacterium*; 除磷功能菌属主要有 *Candidatus\_Accumulibacter*、*Comamonadaceae\_unclassified*、*Dechloromonas*。在碳源有限条件下, AAOA 系统通过异养、自养硝化, 异养反硝化、反硝化聚磷、好氧反硝化多路径协同作用实现了高标准除磷脱氮。

### 参考文献

- [1] 蔡木林, 卢延娜, 刘琰, 等. 城镇污水处理厂出水排放限值分级及提标成本研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1562-1568.
- [2] 李思敏, 杜国帅, 唐锋兵. 改良 A-2/O 工艺对低碳源污水的脱氮除磷性能分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(12): 25-29.
- [3] 曹贵华. 改良 A-2/O 分段进水工艺处理低 C/N 市政废水的性能与优化控制[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [4] CAO Y, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(4): 1365-1383.
- [5] BOUGARD D, BERNET N, CHÈNEBY D, et al. Nitrification of a high-strength wastewater in an inverse turbulent bed reactor: Effect of temperature on nitrite accumulation[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(1): 106-113.
- [6] KERRN-JESPERSEN J P, HENZE M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions[J]. *Water Research*, 1993, 27(4): 617-24.
- [7] 罗亚红, 李冬, 曾辉平, 等. 末端间歇曝气 A-2/O 工艺处理低碳氮(磷)比生活污水[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 79-86.
- [8] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. A-2/O-曝气生物滤池工艺处理低 C/N 比生活污水脱氮除磷[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 1957-1963.
- [9] 杨婷, 杨娅, 刘玉香. 异养硝化-好氧反硝化的研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(9): 2213-2222.
- [10] 刘钢, 谌建宇, 黄荣新, 等. 新型后置反硝化工艺处理低 C/N(C/P) 比污水脱氮除磷性能研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2979-2986.
- [11] 杨雪莲, 陈莹, 杨文娟, 等. 改变缺氧池容积强化 A-2/O 工艺脱氮除磷效率[J]. 水处理技术, 2021, 47(1): 125-129.
- [12] 黄庆涛, 宋秀兰. 外加碳源对 AOA-SBR 工艺脱氮除磷效果的影响[J]. 工业水处理, 2017, 37(9): 26-29.
- [13] 李茂侨, 陈志强, 温沁雪. 延长缺氧水力停留时间对 A-AAO 工艺氮磷去除影响的研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(1): 102-107.
- [14] 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.
- [15] 彭永臻, 钱雯婷, 王琦, 等. 基于宏基因组的城市污水处理厂生物脱氮污泥菌群结构分析[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(1): 95-102.
- [16] CHEN M, WANG W, FENG Y, et al. Impact resistance of different

- factors on ammonia removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium *Aeromonas* sp. HN-02[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167: 456-461.
- [17] CHEN X, QIAN W, KONG L, et al. Performance of a suspended biofilter as a new bioreactor for removal of toluene[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 98: 56-62.
- [18] CALDERER M, MARTI V, DE PABLO J, et al. Effects of enhanced denitrification on hydrodynamics and microbial community structure in a soil column system[J]. *Chemosphere*, 2014, 111: 112-119.
- [19] 周莉, 李正魁, 王易超, 等. 纯种氨氧化菌短程反硝化特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1219-1224.
- [20] SONG J, KIM M, PARK M. S, et al. *Uliginosibacterium aquaticum* sp. nov., Isolated from a Freshwater Lake[J]. *Current Microbiology*, 2021, 78: 3381-3387.
- [21] ZENG W, LI B, WANG X, et al. Influence of nitrite accumulation on "*Candidatus Accumulibacter*" population structure and enhanced biological phosphorus removal from municipal wastewater[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1018-1025.
- [22] KOLAKOVIC S, FREITAS E, REIS M, et al. *Accumulibacter* diversity at the sub-clade level impacts enhanced biological phosphorus removal performance[J]. *Water Research*, 2021, 199: 117210-117210.
- [23] TERASHIMA M, YAMA A, SATO M, et al. Culture-dependent and independent identification of polyphosphate-accumulating *Dechloromonas* spp. predominating in a full-scale oxidation ditch wastewater treatment plant[J]. *Microbes & Environments*, 2016, 31(4): 449-455.
- (责任编辑: 曲娜)

## Development and application of AAOA high-standard phosphorus and nitrogen removal technology for urban sewage

LIANG Xiao<sup>1</sup>, YAO Xinyun<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, GONG Benzhou<sup>2</sup>, XU Qiqi<sup>1</sup>, ZHOU Jiong<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>1,\*</sup>

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

\*Corresponding author, E-mail: 15523829081@126.com

**Abstract** Aiming at the problem of insufficient carbon source in the process of high standard phosphorus and nitrogen removal in urban sewage, an AAOA phosphorus and nitrogen removal technology based on multi-path coordination was proposed. The requirements of influent C/N in AAOA system for high standard phosphorus and nitrogen removal and the actual urban sewage treatment were studied. The results showed that when the influent COD/TN were 6, 7.5 and 9, the TN removal rates were 74.12%, 84.90% and 90.05%, respectively, and the TP removal rates were 48.29%, 97.68% and 98.50%, respectively; when the influent C/N increased to 7.5 and higher values, the system could realize the high-standard removal of phosphorus and nitrogen. The results of 16SrRNA high-throughput sequencing indicated that the functional bacteria for nitrogen and phosphorus removal in the system mainly included *Aeromonas*, *Nitrospira*, *Aeromonas*, *Comamonadaceae* \_ unclassified, *Uliginosibacterium*, *Saccharibacteria\_norank*, *Candidatus\_Accumulibacter*, *Aeromonas*, *Pseudomonas* and *Dechloromonas*. The system realized high-standard removal of nitrogen and phosphorus through autotrophic nitrification, heterotrophic nitrification, synergistic action of denitrifying phosphorus accumulation, heterotrophic denitrification and aerobic denitrification. At the same time, when AAOA was used to treat municipal wastewater with the influent C/N of 7.5, the average concentrations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in the effluent of AAOA system were 0.40, 3.57, 0.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the average removal rates were 98.76%, 89.03% and 95.55%, respectively. High standard phosphorus and nitrogen removal of urban sewage can be achieved without additional carbon source.

**Keywords** urban sewage; AAOA; phosphorus and nitrogen removal; C/N; high standard