

# 厌氧/缺氧并联的 AAO 工艺生物脱氮除磷试验研究

袁宏林, 王俊文, 王耀龙

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 针对传统 AAO 工艺因生物环境矛盾及碳源竞争而导致脱氮除磷效率不高的现象, 提出将厌氧段与缺氧段并联设置、后接好氧段形成“厌氧/缺氧并联的 AAO 工艺”思路。采用小型实验装置, 分别以人工配水和实际污水为原水进行连续运行实验, 探讨了厌氧池污泥回流比、缺氧池污泥回流比、混合液回流比等操作条件对该工艺脱氮除磷效果的影响, 研究了该工艺脱氮除磷特征及微生物群落变化特征。结果表明: 在实验最佳操作条件下, 该工艺对 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的平均去除率分别达到 94.1%、96.4%、96.2%; 厌氧段与缺氧段并联设置后, 各反应区的微生物群落发生明显变化, 与传统 AAO 工艺相比, 活性污泥中反硝化及除磷相关微生物群落的占比明显增大, 并联设置有效缓解了脱氮菌群与除磷菌群互相竞争的问题, 有利于功能菌群的积累和脱氮除磷效率的提高。

**关键词:** 厌氧/缺氧并联; AAO; 生物脱氮; 生物除磷; 微生物群落

中图分类号: X505

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0144-06

## Removal efficiency of nitrogen and phosphorus by an anaerobic/anoxic parallel AAO process

YUAN Honglin, WANG Junwen, WANG Yaolong

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** AAO is a traditional process for the removal of nitrogen and phosphorus from wastewater. However, the nitrogen and phosphorus removal efficiency of this technology is insufficient because of the biological environment conflicts and carbon source competition. Herein, a new anaerobic/anoxia parallel AAO process (P-AAO), the anaerobic stage is arranged in parallel with the anoxic stage and followed by the aerobic stage, was proposed for improving the removal efficiency of the nitrogen and phosphorus. The effect of anaerobic tank sludge reflux ratio, anoxic tank sludge reflux ratio, and mixture reflux ratio on the treatment efficiency was investigated using artificial and actual sewage as raw water, and the results showed that the average removal rate of TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TP was 94.1%, 96.4% and 96.1%, respectively, under the optimal operating conditions. High-throughput sequencing analysis revealed that the proportion of denitrifying and phosphorus-removing microbial communities was significantly increased both in the anaerobic and anoxic stage, compared with that in a traditional AAO process. In addition, the competition between the denitrifying and phosphorus-removing bacteria would be alleviated in the P-AAO process, which is beneficial to the accumulation of functional flora and the improvement of nitrogen and phosphorus removal efficiency.

**Key words:** anaerobic/anoxic parallel; AAO; biological nitrogen removal; biological phosphorus removal; microbial community

AAO 工艺同时具备生物脱氮和生物除磷的功能<sup>[1]</sup>, 在城镇污水等需要削减氮磷的污水处理工程中应用广泛<sup>[2-5]</sup>。传统 AAO 工艺的厌氧区与缺氧区在空间上是串联布置, 仅设置一套污泥回流系统至前端, 因此, 无论厌氧段还是缺氧段各类菌群都处于混合状态, 微生物所承受的环境条件和基质条件基本一致。但是, 由于反硝化菌群和聚磷菌群的代谢速率及对环境及基质条件的要求存

在差异<sup>[6-8]</sup>, 传统 AAO 工艺在工程中往往采用较宽泛的控制条件来满足不同菌群的要求, 从而引起系统的基质竞争和污泥龄矛盾等问题<sup>[9]</sup>, 这也是 AAO 工艺脱氮除磷效率难以进一步提高的原因。近年来提出的倒置 AAO 及多点进水进泥 AAO 在一定程度上改善了生物环境<sup>[10-11]</sup>, 但从实际运行情况看, 效果并不显著。鉴于以上原因, 本文提出将“厌氧段”与“缺氧段”并联设置后再接“好氧

收稿日期: 2019-04-22

修改稿日期: 2020-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778523)

第一作者: 袁宏林(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污水处理理论与技术。E-mail: hlyuan@xauat.edu.cn

段”形成“厌氧/缺氧并联的 AAO 工艺”思路, 理论上存在以下优势: 可根据聚磷菌群、反硝化菌群对碳源的不同需求分配原水量, 缓解碳源竞争矛盾; 聚磷菌厌氧释磷后直接进入好氧段进行吸磷可提高吸磷效率; 并联方式可缩减对脱氮低效的厌氧段及对除磷低效的缺氧段池容。本文通过实验考察了该工艺的操作条件及脱氮除磷效果, 并对微生物特征进行了分析, 以期为生物脱氮除磷工艺寻求合理的方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置主体为有机玻璃加工而成。按照总处理能力 5 L/h 设计实验装置系统, 各单元的最大有效容积: 厌氧池 5 L、缺氧池 15 L、好氧池 30 L、二沉池 15 L。厌氧池及缺氧池装有电动搅拌器; 好氧池装有微孔曝气头并采用电磁式空气泵结合转子流量计控制 DO; 厌氧池、缺氧池的污泥回流系统分别设置, 污泥回流比及混合液回流比采用可调蠕动泵分别控制; 管路系统设有水量控制阀。工艺流程如图 1 所示。

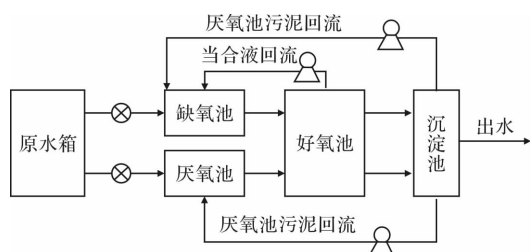


图 1 实验装置工艺流程图

Fig. 1 Sketch of the experimental device process

### 1.2 实验方案

#### 1.2.1 接种污泥及实验原水

接种污泥取自西安市某城市污水厂二沉池回流污泥, 该厂生物处理段为 AAO 工艺。实验原水采用人工配水和实际污水两种。人工配水参照一般生活污水的污染物浓度范围配制, 主要成分为乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾、氯化钙、硫酸镁、碳酸氢钠等, 配水污染物浓度范围: COD 180~200 mg/L、TN 30~35 mg/L、TP 4.7~5.1 mg/L、pH 在 7~7.5 之间; 实际污水取自与接种污泥同一厂的初沉池出水。

#### 1.2.2 实验方法

按照接种驯化法启动系统并连续运行, 取样检测沉淀池出水指标, 以沉淀池出水指标稳定作为系统运行稳定的参照。通过调整厌氧池污泥回流比、缺氧池污泥回流比、混合液回流比、进水

分配比例等, 对比分析运行条件的变化对脱氮除磷效果的影响。在不同工况的稳定运行情况下, 分别在厌氧池、缺氧池、沉淀池采集水样、泥样测定水质指标和生物学指标。

#### 1.2.3 分析方法

水质指标: COD、TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP 等参照《水和废水监测分析方法》(第四版)推荐方法取样测定, DO、pH 分别采用 HACH 溶解氧测定仪和 pH 测定仪测定。

生物学指标: 在反应池中取 5ml 静沉后污泥作为污泥样本, 立刻保存于灭菌容器中并冷冻( $-15^\circ\text{C}$ )后送至上海美吉生物医药科技有限公司分析, 通过 DNA 抽提和 PCR 扩增及测序, 分析反硝化及除磷相关微生物群落的特征。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 人工配水为原水的处理效果

#### 2.1.1 厌氧池污泥回流比对除磷的影响

以人工配水为原水, 厌氧池和缺氧池分别进水 2.5 L/h, 控制缺氧池运行参数不变(污泥回流比 50%, 混合液回流比 250%)、控制好氧池 DO 为  $3.0 \pm 0.3$  mg/L, 改变厌氧池污泥回流比为厌氧池进水的 40%、50%、60%、70%、85%、100% 分别运行, 每组工况稳定运行后取样测定水质指标。结果显示, 六种工况下沉淀池出水 TP 浓度分别为 0.91~1.17 mg/L、0.59~0.71 mg/L、0.14~0.18 mg/L、0.2~0.24 mg/L、0.32~0.38 mg/L、0.54~0.57 mg/L。图 2 是不同工况下系统各段的水样中 TP 平均浓度对比。

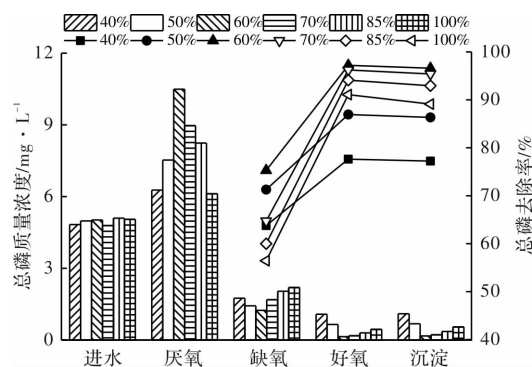


图 2 各反应段总磷浓度及去除率对比

Fig. 2 Total phosphorus concentration and removal rate in each stage

很明显, 污泥回流比变化影响除磷效果, 回流比为 60% 时厌氧释磷和好氧吸磷效果最好, 出水 TP 浓度最小; 回流比较低时(40%)厌氧释磷效果不明显、好氧吸磷效果大幅度降低, 原因是

聚磷菌数量不足;但随着回流比升高时(70%~100%)释磷效果反而降低、吸磷效果也有所降低,分析原因可能在于回流比的加大使得厌氧池的厌氧环境变差引起反硝化菌与聚磷菌发生了碳源竞争,后续实验确定厌氧池污泥回流比为60%。

### 2.1.2 缺氧池污泥回流比对脱氮的影响

以人工配水为原水,厌氧池和缺氧池分别进水2.5 L/h,控制厌氧池污泥回流比60%、缺氧池混合液回流比250%、好氧池DO为 $3.0 \pm 0.3$  mg/L,改变缺氧池污泥回流比分别为40%、50%、60%、70%、85%、100%,稳定运行后取样测定水质指标,六种工况下沉淀池出水TN浓度分别为2.75~2.96 mg/L、1.89~2.44 mg/L、1.67~2.12 mg/L、1.63~1.74 mg/L、1.52~1.68 mg/L、1.54~1.67 mg/L。图3是不同工况下系统各段的水样中TN平均浓度对比,图中显示,出水TN浓度随着污泥回流比的增加而降低,但污泥回流比大于60%后总脱氮效率提高并不显著。

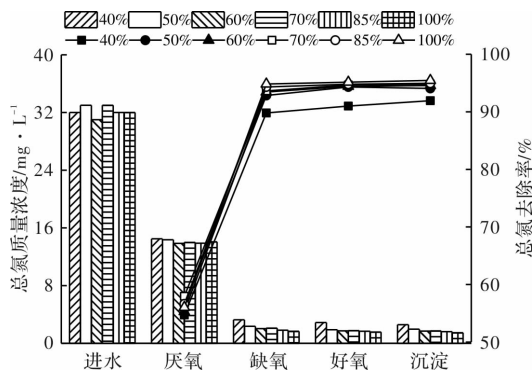


图3 不同污泥回流比的各反应段总氮浓度及去除率对比

Fig. 3 Total nitrogen concentration and removal rate in each stage under different sludge reflux ratio

前文的图2中显示缺氧池中存在总磷减少现象,为了分析缺氧池污泥回流比对除磷的影响,结合本小节实验对缺氧池进行总磷物料平衡计算:缺氧池进入的总磷量包括进水带入量、回流污泥带入量、混合液回流带入量三项,排出总磷量包括缺氧池出水残余量、缺氧池生物作用去除量两项,由进入总磷量减去排出总磷量得到缺氧池吸磷量。图4为根据计算结果绘制的缺氧池吸磷量与污泥回流比之间的关系图。

由图4可以看出,缺氧池内存在反硝化除磷作用,污泥回流比的增大有利于吸磷量提高,但当污泥回流比增大到60%以上时,缺氧池吸磷量增幅减缓,总磷去除效果良好,所以后续实验控制缺氧池污泥回流比为60%较为合理。

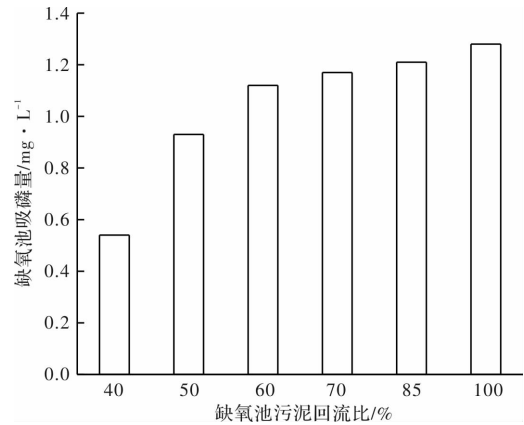


图4 缺氧池吸磷量分析

Fig. 4 Analysis of phosphorus uptake in the anoxic tank

### 2.1.3 缺氧池混合液回流比对脱氮的影响

以人工配水为原水,厌氧池和缺氧池分别进水2.5 L/h,控制厌氧池和缺氧池污泥回流比均为60%、好氧池DO为 $3.0 \pm 0.3$  mg/L,改变缺氧池混合液回流比分别为150%、200%、250%、300%、350%,稳定运行后取样测定水质指标,五种工况下沉淀池出水TN浓度分别为2.92~3.05 mg/L、2.42~2.77 mg/L、1.53~2.07 mg/L、1.56~2.11 mg/L、1.57~2.21 mg/L。图5是不同工况下系统各段水样中TN平均浓度对比,图中显示,随着混合液回流比的增大,出水TN浓度呈现先下降后升高的趋势,回流比在250%时出水总氮浓度最低,继续增大回流比,出水TN浓度维持在较低水平但略有升高。这说明混合液回流比不宜过大,原因是随着回流比的加大,回流液将更多的溶解氧带入缺氧池而造成缺氧环境变差(如图6所示),导致好氧菌与反硝化菌竞争碳源,使得反硝化效果变差。

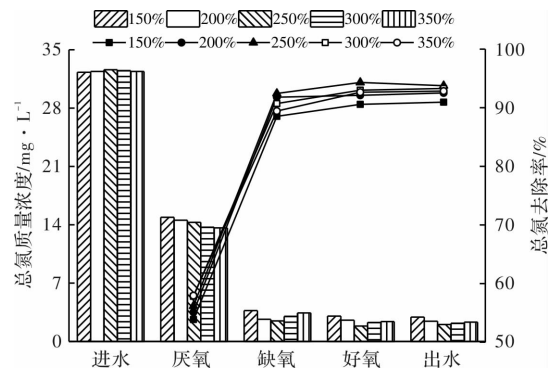


图5 不同混合液回流比的各反应段总氮浓度及去除率对比

Fig. 5 Total nitrogen concentration and removal rate in each stage under different mixture reflux ratio

## 2.2 实际污水运行效果及分析

以污水厂取水为原水,厌氧池和缺氧池分别进水2.5 L/h,按照前面确定的最佳操作条件连续

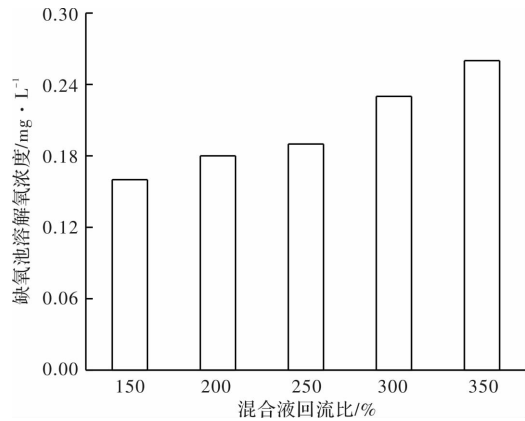


图 6 缺氧池中溶解氧浓度变化

Fig. 6 Changes of DO in the anoxic tank

运行实验系统, 即控制厌氧池和缺氧池污泥回流比均为 60%、缺氧池混合液回流比 250%、好氧池 DO 为  $3.0 \pm 0.3$  mg/L, 实验期间原水污染物浓度范围: COD 344~372 mg/L、BOD 161~173 mg/L、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  35~38 mg/L、TN 40~46 mg/L、TP 5.7~6.5 mg/L、pH 7.2~7.8。系统稳定运行期间, 沉淀池出水 COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的平均浓度分别为 27.7 mg/L、2.44 mg/L、0.93 mg/L、0.27 mg/L, 去除率分别达到 92.31%、94.10%、96.42%、96.16%, 图 7 是各个单元水样中总磷、总氮、氨氮指标及去除率对比。

与传统 AAO 工艺的脱氮除磷效果相比<sup>[12]</sup>, 厌氧池与缺氧池并联设置的 AAO 工艺的脱氮、除磷效果均有所提高。进水分别流入厌氧、缺氧段, 在

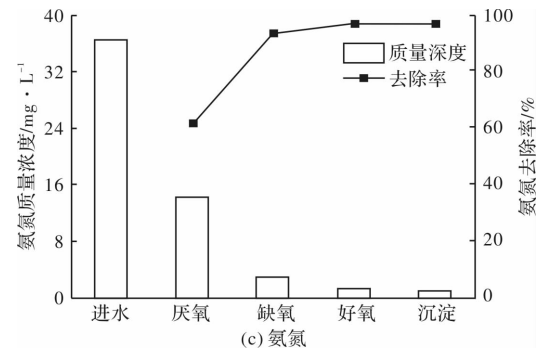
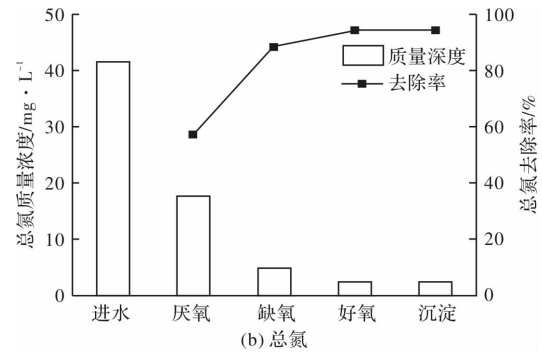
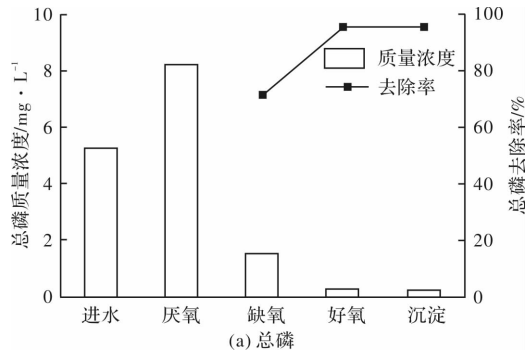


图 7 沿程浓度变化

Fig. 7 Changes of concentration in each stage

碳源分配上可缓解脱氮与除磷过程相关功能菌群对于有机物的竞争; 原水直接流入缺氧段, 可以硝态氮作为电子受体除磷<sup>[13]</sup>, 实现了反硝化微生物对碳源高效利用, 减少了碳源消耗<sup>[14]</sup>, 反硝化效果更佳; 由于厌氧段与缺氧段并联设置且同步进水, 各反应段所需容积要小一些, 所以系统总停留时间比串联布置的 AAO 工艺短。

### 3 微生物特征分析

当实际污水在最佳操作条件下稳定运行期间, 分别从厌氧池、缺氧池、好氧池中采集活性污泥样本, 进行微生物群落 DNA 抽提<sup>[15]</sup>: 使用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的提取质量, 使用 NanoDrop2000 测定 DNA 浓度和纯度, 抽提所用引物对如表 1 所示, 对 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增。

表 1 引物对信息

Tab. 1 Primer pair information

测序区域	引物名称	引物序列
PhoD-733F _ PhoD-1083R	PhoD-733F	TGGGAYGATCAYGARGT
	PhoD-1083R	CTGSGCSAKSACRTTCCA
cd3aF _ R3cdR	cd3aF	GTSAACGTSAAGGARACSGG
	R3cdR	GASTTCGGRTGSGTCTTGA

微生物分析结果显示,各反应段均含有的菌属有9种:Dechloromonas、Rubrivivax、Rhodanobacter、Thauera、Candidatus-Accumulibacter、Burkholderiales、Betaproteobacteria、Rhodocyclaceae、Proteobacteria,都属于高效脱氮除磷系统中常见的优势菌种<sup>[16-17]</sup>。

图8(a)是各反应段中反硝化过程相关微生物群落组成情况,占比均较高的优势菌种有Dechloromonas、Alicyclophilus、Rubrivivax,其在缺氧段所占比例分别为9.26%、1.50%、1.02%,而传统AAO工艺中这三种优势菌所占比例分别为5.80%、0.21%、0.72%<sup>[16]</sup>。说明并联设置后的缺氧池中更有利于反硝化过程相关微生物群落的积累增长,是该工艺生物脱氮效率提高的原因。

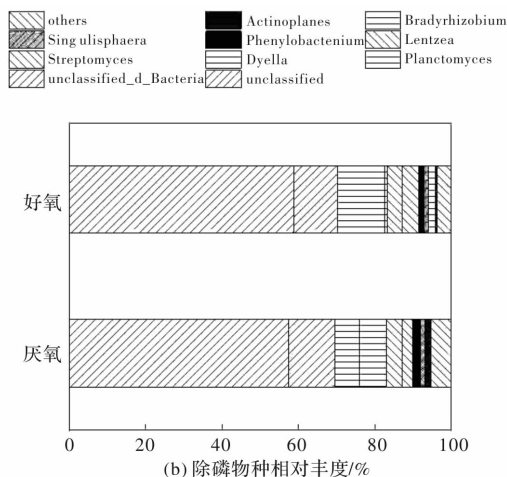
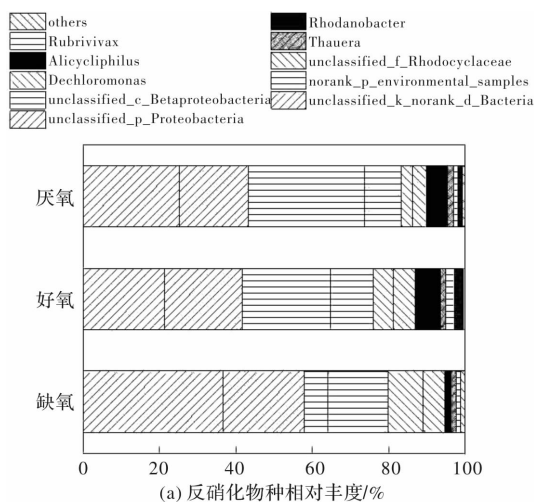


图8 反硝化、除磷物种组成

Fig. 8 Species composition of denitrifying and dephosphorization

图8(b)是厌氧池与好氧池所含除磷过程相关微生物群落组成情况,在各反应段中均含有的优势菌种有Dyella、Planctomyces、Streptomyces、Lentzea、Phenyllobacterium、Singulisphaera、

Bradyrhizobium,其在厌氧段中所占比例分别为7.06%、6.41%、4.32%、2.71%、1.95%、1.08%、0.41%,在好氧段所占比例分别为0.67%、12.51%、3.74%、4.43%、1.34%、1.26%、1.78%。而传统AAO工艺中,Planctomyces、Streptomyces、Phenyllobacterium、Singulisphaera、Bradyrhizobium分别占比为1.29%、0.21%、0.05%、0.45%、0.37%,Dyella、Lentzea的检出几率很低<sup>[16]</sup>。说明并联设置后的厌氧池中更有利于相关除磷微生物群落的积累增长,是其除磷效果更优的原因。

## 4 结论

(1)厌氧、缺氧并联设置的AAO工艺有利于脱氮、除磷效率的进一步提高,实验系统的最佳操作条件为:厌氧池污泥回流比60%、缺氧池污泥回流比60%、混合液回流比250%。

(2)在最佳操作条件下运行时,并联设置的AAO工艺沉淀池出水COD、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP的去除率分别达到92.3%、94.1%、96.4%、96.2%。

(3)厌氧池与缺氧池并联设置后,活性污泥中反硝化过程相关微生物群落和除磷过程相关微生物群落的积累增长明显,功能菌群的占比增大是该工艺脱氮除磷效果提高的原因。

## 参考文献 References

- [1] ZHU Z, CHEN W, TAO T, et al. A novel AAO-SB-SPR process based on phosphorus mass balance for nutrient removal and phosphorus recovery from municipal wastewater[J]. Water Research, 2018,144:763-773.
- [2] RAJ S E, BANU J R, KALIAPPAN S, et al. Effects of side stream, low temperature phosphorus recovery on the performance of anaerobic/anoxic/oxic systems integrated with sludge pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2013,140:376-384.
- [3] LU Q, WU H, LI H, et al. Enhanced biological nutrient removal in modified carbon source division anaerobic anoxic oxic process with return activated sludge pre-concentration[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015,23(6):1027-1034.
- [4] ZHANG W, PENG Y, REN N, et al. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system[J]. Chemosphere, 2013,93(11):2859-2863.
- [5] ZHANG Q H, JIN P K, NGO H H, et al. Transformation and utilization of slowly biodegradable organic matters in biological sewage treatment of anaerobic an-

- oxic oxic systems[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218:53-61.
- [6] WEN X, ZHOU J, LI Y, et al. A novel process combining simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) with denitrifying phosphorus removal (DPR) to treat sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 222:309-316.
- [7] LU H, CHANDRAN K, STENSEL D. Microbial ecology of denitrification in biological wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2014, 64:237-254.
- [8] LI C, YANG J, WANG X, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a phosphate accumulating bacterium *Pseudomonas stutzeri* YG-24 [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 182:18-25.
- [9] GUERRERO J, GUIASOLA A, BAEZA J A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Research*, 2011, 45(16):4793-4802.
- [10] HAN H, MIAO H, ZHANG Y, et al. Carbonaceous and nitrogenous disinfection byproduct precursor variation during the reversed anaerobic-anoxic-oxic process of a sewage treatment plant[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 65:335-346.
- [11] FANG F, QIAO L, CAO J, et al. Quantitative evaluation of  $A^2/O$  and reversed  $A^2/O$  processes for biological municipal wastewater treatment using a projection pursuit method[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 166:164-170.
- [12] 金鹏康, 郑未元, 王先宝, 等. 倒置  $A^2/O$  与常规  $A^2/O$  工艺除磷效果对比[J]. *环境工程学报*, 2015 (2):501-505.
- JIN Pengkang, ZHENG Weiyuan, WANG Xianbao, et al. Comparison of phosphorus removal efficiency between reversed and conventional  $A^2/O$  processes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015 (2):501-505.
- [13] ZHANG M, YANG Q, ZHANG J, et al. Enhancement of denitrifying phosphorus removal and microbial community of long-term operation in an anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation system[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2016, 122(4):456-466.
- [14] XU X, QIU L, WANG C, et al. Achieving mainstream nitrogen and phosphorus removal through Simultaneous partial Nitrification, Anammox, Denitrification, and Denitrifying Phosphorus Removal (SNADPR) process in a single-tank integrative reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 284:80-89.
- [15] HIGDON L E, CAIN C J, COLDEN M A, et al. Optimization of single-cell plate sorting for high throughput sequencing applications[J]. *Journal of Immunological Methods*, 2019, 466:17-23.
- [16] 田美. 基于新一代测序技术的 BIOLAK 和  $A^2/O$  活性污泥宏基因组研究[D]. 徐州, 中国矿业大学, 2016.
- TIAN Mei. Comparative metagenomics of BIOLAK and  $A^2/O$  activated sludge based on next-generation sequencing technology. [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [17] SI Z, SONG X, WANG Y, et al. Intensified heterotrophic denitrification in constructed wetlands using four solid carbon sources: Denitrification efficiency and bacterial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267:416-425.

(编辑 沈 波)