

卢瑞朋, 孙光溪, 徐文江, 等. 缺氧分段式 UCT 工艺的脱氮除磷效能[J]. 净水技术, 2023, 42(8):87-93,110.

LU R P, SUN G X, XU W J, et al. Performance of anoxic step-wise UCT process for nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8):87-93,110.

缺氧分段式 UCT 工艺的脱氮除磷效能

卢瑞朋^{1,2}, 孙光溪^{1,2}, 徐文江^{1,2}, 董娜^{1,2}, 李安峰^{1,2,*}

(1. 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家环境保护工业废水污染控制工程技术<北京>中心, 北京 100037)

摘要 在 UCT 工艺的基础上, 提出一种新型缺氧分段式 UCT 工艺用于高效脱氮除磷。试验考察了新工艺对模拟生活污水的处理效果, 并对各个功能单元的氮磷去除能力和微生物群落进行分析。工艺运行结果表明, COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 的平均去除率分别为 95.85%、99.37%、83.12% 和 87.13%。通过氮磷质量平衡发现, 前段缺氧池和后段缺氧池均呈现出明显的脱氮能力。同时分段式进水模式有利于系统脱氮能力的提升, 从而有效降低回流至厌氧池的 NO₃-N 浓度, 减小 NO₃-N 对厌氧释磷的不利影响。高通量测序结果揭示了变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota)为优势菌门。在新型 UCT 工艺中, *Candidatus_Competibacter* (18.75%~26.43%)、*OLB8* (7.81%~12.52%) 等反硝化菌为优势菌属, *Tetrasphaera* 和 *Dechloromonas* 是主要的聚磷菌, 有利于实现高效的脱氮除磷。

关键词 脱氮除磷 UCT 工艺 缺氧分段 分段进水 微生物群落

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)08-0087-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.08.011

Performance of Anoxic Step-Wise UCT Process for Nitrogen and Phosphorus Removal

LU Ruipeng^{1,2}, SUN Guangxi^{1,2}, XU Wenjiang^{1,2}, DONG Na^{1,2}, LI Anfeng^{1,2,*}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China;

2. State Environmental Protection Engineering <Beijing> Center for Industrial Wastewater Pollution Control, Beijing 100037, China)

Abstract Based on the UCT process, a novel anoxic step-wise UCT process was developed to nitrogen and phosphorus removal efficiently. The performance of novel UCT process during synthetic domestic wastewater treatment was evaluated in this paper. Meanwhile, the nitrogen and phosphorus removal ability and the microbial community characteristics of each functional tank were also studied. The operation results showed that average removal efficiencies of COD_{Cr}, ammonia nitrogen, TN and TP were 95.85%, 99.37%, 83.12% and 87.13%, respectively. The analysis of nitrogen and phosphorus mass balance demonstrated that the nitrogen removal capacity of both front-anoxic tank and back-anoxic tank were apparent. The step feed mode was beneficial for improving the performance of nitrogen removal, decreasing the concentration of NO₃-N returned to anaerobic tank and reducing the adverse effect of NO₃-N on anaerobic phosphorus release. High-throughput sequencing results revealed that Proteobacteria and Bacteroidota were the dominant phyla. Denitrifying bacteria such as *Candidatus_Competibacter* (18.75%~26.43%) and *OLB8* (7.81%~12.52%) were the dominant genus, and *Tetrasphaera* and *Dechloromonas* were the main phosphorus accumulating bacteria in the novel UCT process, which were conducive to efficient nitrogen and phosphorus removal.

Keywords nitrogen and phosphorus removal UCT process anoxic step-wise step water feed microbial community

[收稿日期] 2022-12-06

[基金项目] 北京市生态环境保护科学研究院基金(Y2020-004)

[作者简介] 卢瑞朋(1995—), 男, 硕士, 研究方向为水污染控制, E-mail: 15538812344@163.com。

[通信作者] 李安峰, 研究员, 主要从事污水污泥的低碳处理技术研发工作, E-mail: lianfeng@cee.cn。

污水中的氮磷如果无法得到有效控制直接排放到自然水体, 将会加剧水体的富营养化程度^[1]。《2021年中国生态环境状况公报》^[2]显示, 我国仍有27.3%的湖泊呈现富营养状态, 氮磷污染物是入海河流和渔业水域的主要超标指标。污水处理厂排水是水体氮磷污染的重要来源, 污水处理厂的氮磷污

染物控制对我国水生态环境保护至关重要。部分地区出台了更为严格的地方标准控制污水处理厂出水水质,出水水质要求超过了现行的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准^[3]。

以厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺为代表的传统生化处理技术由于成本低、运行简单、效果明显,是目前应用最为广泛的脱氮除磷工艺^[4]。然而该工艺存在污水碳源不足影响反硝化脱氮、污泥回流硝酸盐(NO_3^- -N)影响厌氧释磷、反硝化菌和聚磷菌的碳源竞争等问题,处理效果存在一定的局限性^[5]。因此,高效脱氮除磷工艺的研发对于污水处理行业的未来发展具有重要意义。

UCT(University of Cape Town)工艺作为改良型 AAO 工艺,通过调整回流方式,将污泥回流至缺氧池,同时增设了缺氧池到厌氧池的混合液回流,降低了 NO_3^- -N 对厌氧释磷的影响,缓解了反硝化细菌对聚磷菌的竞争^[6-8]。为了进一步提升 UCT 工艺的脱氮除磷效果,很多学者对该工艺进行了优化。贾军峰等^[9]利用五段回流的方式对 UCT 工艺进行改良,通过外加碳源和增设缺氧池内循环回流增强反硝化效果,同时额外设置了剩余污泥回流至好氧池。该工艺处理生活污水实现了 87% 的 TN 去除率。尤立等^[7]设置了预缺氧池,并将污泥回流至预缺氧池,硝化液回流至缺氧池,将污泥脱氮与混合液脱氮分开,在农村生活污水的应用中 TN 和 TP 的去除率分别达到 72.9% 和 83.9%,取得了稳定的脱氮除磷效果。考虑到增设回流数量会导致工艺运行复杂,缺氧池同时承担硝化液回流和缺氧至厌氧的回流依然

会有 NO_3^- -N 影响厌氧释磷的风险,同时对外加碳源的依赖还需要进一步降低,因此,如何解决上述问题是进一步优化 UCT 工艺的方向。

基于上述问题,本研究通过增设后段缺氧池将硝化液回流和缺氧池至厌氧回流分开,并结合分段进水的方式,构建了缺氧分段式 UCT 工艺。通过连续运行小试试验装置处理模拟生活污水,考察该工艺的运行效果,并基于氮磷质量平衡分析了各功能单元的脱氮除磷能力。同时利用高通量测序手段,对各功能单元的微生物群落进行分析。本研究考察了新型 UCT 工艺的脱氮除磷效果,以为污水处理行业提供新的选择。

1 试验材料和方法

1.1 工艺设计思路与试验运行方式

1.1.1 工艺设计思路

为了进一步强化 UCT 工艺的脱氮除磷效能,通过在缺氧池后增设后段缺氧池,并结合分段进水思路设计了缺氧分段式 UCT 工艺。与传统 UCT 工艺类似,新型 UCT 工艺设有两条内循环路径,一条是由增设的后段缺氧池回流至厌氧池(AA 内回流),用来维持厌氧环境,避免回流液中 NO_3^- -N 和 DO 对厌氧释磷的不利影响,同时维持厌氧池污泥浓度;另一条是由好氧池回流至缺氧池(AO 内回流),为反硝化提供电子受体。设置后段缺氧池的目的在于,一方面,通过将部分进水输送至后段缺氧池提供碳源,可以充分利用前段缺氧池残留的 NO_3^- -N,进一步强化 UCT 工艺缺氧系统的脱氮能力;另一方面,为 AA 内回流创造条件,从而保证整个系统的脱氮除磷效果。

1.1.2 试验运行方式

图 1 为缺氧分段式 UCT 试验装置示意图。该

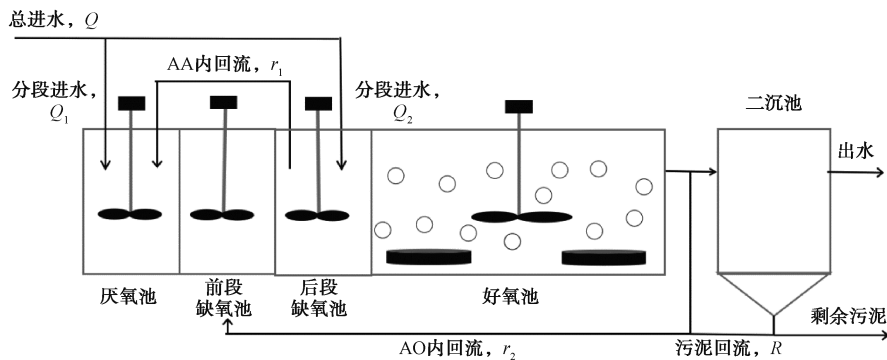


图 1 缺氧分段式 UCT 工艺试验装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Anoxic Step-Wise UCT Process

装置总有效容积为 21 L,其中厌氧池、前段缺氧池和后段缺氧池有效容积为 3 L,好氧池有效容积为 12 L。试验装置运行期间进水总量(Q)为 2 L/h,分段进水量配比 $Q_1:Q_2$ 为 5:3。厌氧池 DO 质量浓度控制在 0.2 mg/L 以下,前段缺氧池和后段缺氧池 DO 质量浓度控制在 0.5 mg/L 以下,好氧池 DO 质量浓度控制在 2~3 mg/L。温度维持在 25 ℃ 左右,污泥质量浓度(MLSS)为 3 000 mg/L 左右。整套试验装置运行过程中的总水力停留时间(HRT)为 10.5 h。AA 内回流比(r_1)和 AO 内回流比(r_2)设置为 200%,污泥回流比(R)为 100%。试验共连续运行 80 d,其中 1~18 d 为启动适应期,19~80 d 为稳定期。

1.2 试验用水与接种污泥

采用模拟生活污水作为装置进水,采用乙酸钠和丙酸钠作为混合碳源,质量配比为 4:3;氮源和磷源分别选用氯化铵和磷酸二氢钾,进水水质如表 1 所示。此外,投加氯化镁和氯化钙满足微生物对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的需求,添加微量元素营养液 0.6 mL/L 满足微生物生长繁殖需要,微量元素营养液成分如表 2 所示^[10-11]。接种污泥取自于某污水处理厂(AAO 工艺)的厌氧池活性污泥。

表 1 进水水质

Tab. 1 Influent Quality

水质指标	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
COD _{Cr}	319.00~413.00
氨氮	51.00~77.47
TN	51.45~78.49
TP	5.19~7.78

表 2 微量元素溶液成分

Tab. 2 Composition of Trace Elements Solution

成分	质量浓度/(g·L ⁻¹)
FeCl ₃	0.9
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
H ₃ BO ₄	0.15
KI	0.18
MnSO ₄	0.05
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
NaMo ₂ H ₂ O	0.06
CoCl ₂ ·7H ₂ O	0.15

1.3 水质测定方法

试验装置运行期间,每 3 d 进行一次水样检测。COD_{Cr} 使用罗威邦(Lovibond, ET99732) COD 测定仪测定;氨氮参考《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009);TN 测定参考《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012);TP 和磷酸盐(PO_4^{3-} -P)测定参考《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989);NO₃⁻-N 使用紫外分光光度法(HJ 346—2007);DO 采用哈希便携式溶解氧仪(HACH, HQ30d)测定;MLSS 测定参考《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—1989)。

1.4 氮磷质量平衡计算方法

为了明确缺氧分段式 UCT 工艺各功能单元的脱氮除磷能力,进行了氮磷质量平衡计算,具体计算如式(1)~式(4)。

$$\Delta M_{An(N \text{ or } P)} = Q_1 S_{inf(N \text{ or } P)} + r_1 Q S_{B-A(N \text{ or } P)} - (Q_1 + r_1 Q) \cdot S_{An(N \text{ or } P)} \quad (1)$$

$$\Delta M_{F-A(N \text{ or } P)} = (Q_1 + r_1 Q) S_{An(N \text{ or } P)} + r_2 Q S_{O(N \text{ or } P)} + R Q S_{eff(N \text{ or } P)} - [Q_1 + (r_1 + r_2 + R) \cdot Q] \cdot S_{F-A(N \text{ or } P)} \quad (2)$$

$$\Delta M_{B-A(N \text{ or } P)} = [Q_1 + (r_1 + r_2 + R) \cdot Q] \cdot S_{F-A(N \text{ or } P)} + Q_2 S_{inf(N \text{ or } P)} - [Q_1 + Q_2 + (r_1 + r_2 + R) \cdot Q] \cdot S_{B-A(N \text{ or } P)} \quad (3)$$

$$\Delta M_{O(N \text{ or } P)} = [Q_1 + Q_2 + (r_2 + R) \cdot Q] \cdot S_{B-A(N \text{ or } P)} - [Q_1 + Q_2 + (r_2 + R) \cdot Q] \cdot S_{O(N \text{ or } P)} \quad (4)$$

其中: $\Delta M_{An(N \text{ or } P)}$ ——厌氧池的 NO₃⁻-N 或 PO₄³⁻-P 去除量,mg/h;

$\Delta M_{F-A(N \text{ or } P)}$ ——前段缺氧池的 NO₃⁻-N 或 PO₄³⁻-P 去除量,mg/h;

$\Delta M_{B-A(N \text{ or } P)}$ ——后段缺氧池的 NO₃⁻-N 或 PO₄³⁻-P 去除量,mg/h;

$\Delta M_{O(N \text{ or } P)}$ ——好氧池的 NO₃⁻-N 或 PO₄³⁻-P 去除量,mg/h;

Q ——进水总量,L/h;

Q_1 、 Q_2 ——厌氧池、后段缺氧池分段进水量,L/h;

r_1 ——AA 内回流比;

r_2 ——AO 内回流比;

R ——污泥回流比;

$S_{inf(N \text{ or } P)}$ ——进水 NO₃⁻-N 或 PO₄³⁻-P 质量浓度,mg/L;

$S_{An(N\ or\ P)}$ ——厌氧池 NO_3^- -N 或 PO_4^{3-} -P 质量浓度,mg/L;

$S_{F-A(N\ or\ P)}$ ——前段缺氧池 NO_3^- -N 或 PO_4^{3-} -P 质量浓度,mg/L;

$S_{B-A(N\ or\ P)}$ ——后段缺氧池 NO_3^- -N 或 PO_4^{3-} -P 质量浓度,mg/L;

$S_{O(N\ or\ P)}$ ——好氧池 NO_3^- -N 或 PO_4^{3-} -P 质量浓度,mg/L;

$S_{eff(N\ or\ P)}$ ——出水 NO_3^- -N 或 PO_4^{3-} -P 质量浓度,mg/L。

1.5 微生物群落分析

第 60 d 在各功能单元采取污泥样品后于 $-20\ ^\circ\text{C}$ 条件下冷冻保存。冻存的污泥样品委托上海美吉生物医药科技有限公司进行 DNA 提取并进行 16S rRNA 高通量测序分析。

2 结果与讨论

2.1 工艺运行状况分析

2.1.1 工艺运行效果

如图 2 所示,经过 18 d 的适应期后,试验装置出水水质基本保持稳定,进入稳定运行期。

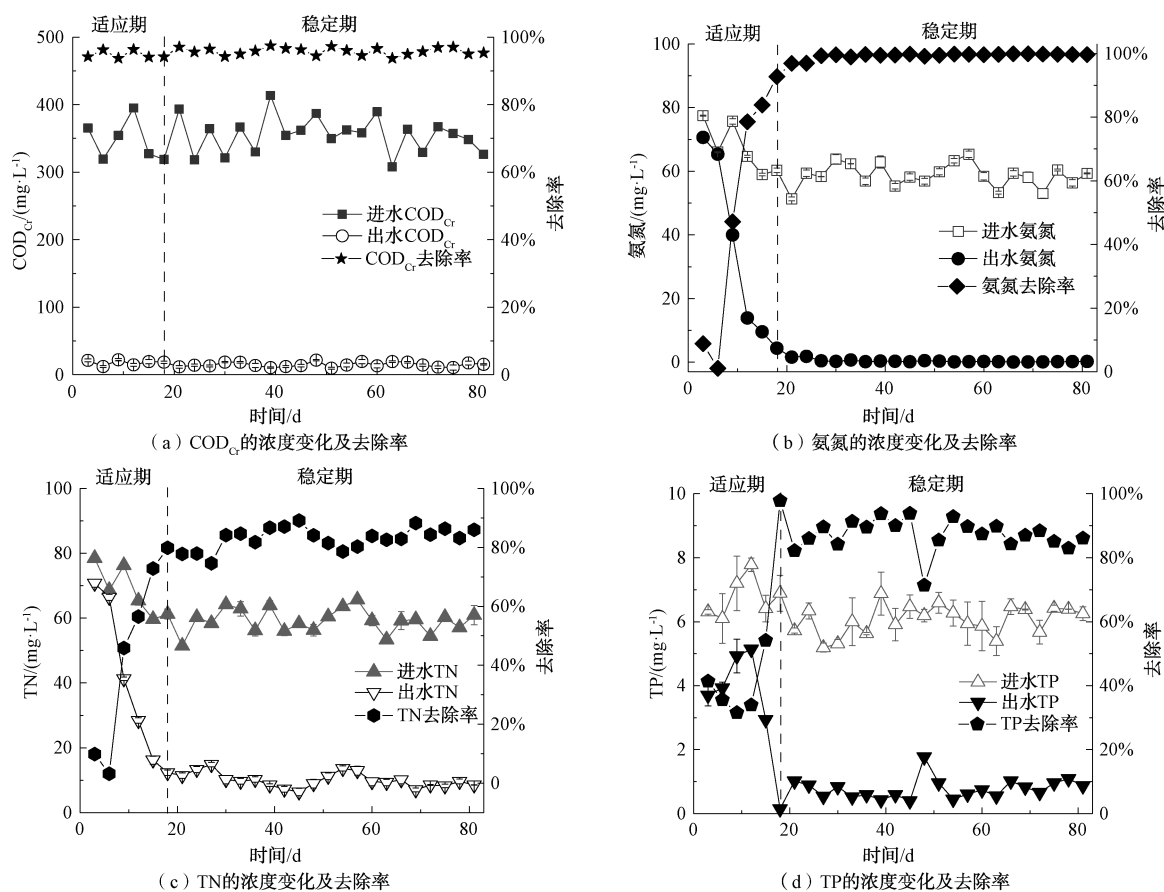


图 2 缺氧分段式 UCT 工艺的运行效果

Fig. 2 Operational Performance of Anoxic Step-Wise UCT Process

COD_{Cr} 的去除效果如图 2(a) 所示。在稳定期内, COD_{Cr} 平均去除率达到 95.85%, COD_{Cr} 平均质量浓度由进水的 355.76 mg/L 降低至出水的 14.76 mg/L, 低于北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) 中的 A 排放限值 (20 mg/L)。图 2(b) 和图 2(c) 分别为氨氮和 TN 的去除效果。氨氮和 TN 的平均进水质量浓度分别为 58.67 mg/L 和 59.13 mg/L。在适应期, 氨氮和

TN 的出水浓度逐渐降低, 处理效果趋于稳定。进入稳定期后, 氨氮平均出水质量浓度为 0.37 mg/L, 去除率为 99.37%; TN 平均出水质量浓度为 9.98 mg/L, 去除率为 83.12%。氨氮和 TN 的平均出水质量浓度均低于 DB 11/890—2012 中的 A 排放限值 (氨氮为 1.00 mg/L; TN 为 10 mg/L), 表明新型 UCT 工艺具有良好的脱氮效果。缺氧分段式 UCT 工艺具有良好的除磷效果[图 2(d)], 结果表明, 在工艺启动的

稳定期 TP 平均质量浓度由进水的 6.06 mg/L 降低至出水的 0.78 mg/L, TP 去除率可达到 87.13%。

2.1.2 工艺脱氮除磷能力分析

图 3(a) 表示该工艺的沿程 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 的质量浓度变化。好氧池的 NO_3^- -N 质量浓度最高, 为 9.32 mg/L; 厌氧池和后段缺氧池的 NO_3^- -N 质量浓度最低, 均为 0.16 mg/L。通过 PO_4^{3-} -P 的沿程浓度变化可知, 厌氧池 PO_4^{3-} -P 质量浓度达 9.50 mg/L, 随后前段缺氧池和后段缺氧池 PO_4^{3-} -P 质量浓度分别为 5.25 mg/L 和 5.58 mg/L, 进一步经过好氧池反应后 PO_4^{3-} -P 质量浓度降低至 0.61 mg/L。

图 3(b) 表示该工艺各功能单元的氮磷去除能力。 NO_3^- -N 主要是在缺氧池中被去除, 前段缺氧池

(33.27 mg/h) 和后段缺氧池 (22.16 mg/h) 均呈现出明显的脱氮能力。好氧池呈现出了良好的硝化能力 (-73.28 mg/h), AO 内回流高浓度的硝化回流液 [图 3(a)] 为前段缺氧池反硝化过程提供了充足的电子受体。前段缺氧池残留的 NO_3^- -N 进入后段缺氧池, 利用分段进水提供的碳源进行反硝化反应, 实现深度脱氮。后段缺氧池的 NO_3^- -N 浓度较前段缺氧池更低 [图 3(a)], 因此, 本工艺的 AA 内回流更有利于保证厌氧吸磷反应的顺利进行。在厌氧池中, PO_4^{3-} -P 得到了有效释放 (-19.10 mg/h), 使得厌氧池 PO_4^{3-} -P 浓度高 [图 3(a)]。而在好氧池内的 PO_4^{3-} -P 去除量为 41.52 mg/h, 实现了有效的磷去除。

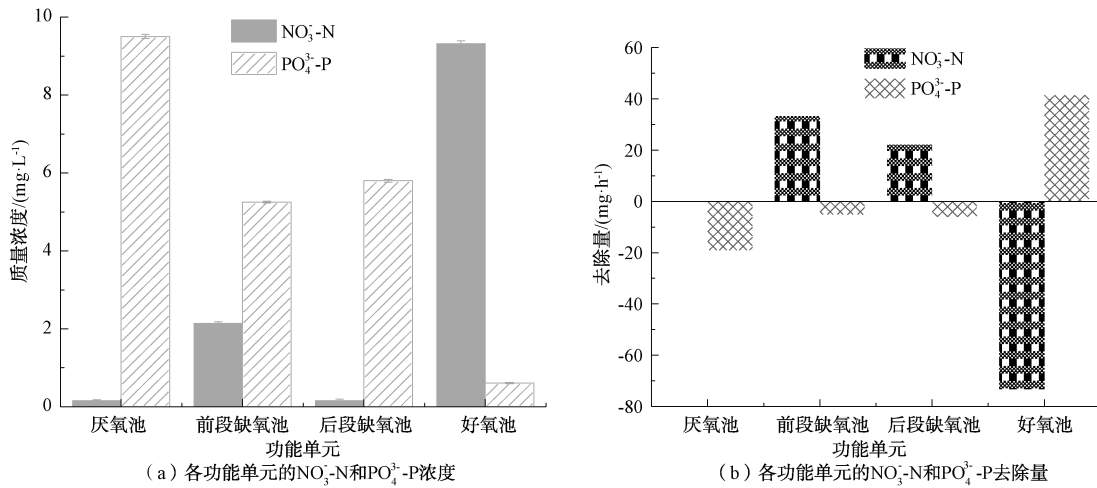


图 3 各功能单元 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 浓度及去除量

Fig. 3 Concentration and Amount of NO_3^- -N and PO_4^{3-} -P Removal in Each Functional Unit

2.2 微生物群落分析

2.2.1 微生物种群多样性分析

对污泥样品的测序结果进行抽平处理, 获得的操作分类单元 (OTU) 数量、多样性指数 (Shannon、Simpson 指数) 和丰富度指数 (Sobs、Ace、Chao 指数) 结果如表 3 所示。Shannon 指数数值与微生物多样

性为正相关关系, Simpson 指数与微生物多样性为负相关关系; Sobs、Chao 指数和 Ace 指数的数值越高表明微生物越丰富^[12]。由表 3 可知, 4 个功能单元微生物的丰富度和多样性相差不大, 前段缺氧池和后段缺氧池较厌氧池和好氧池的微生物多样性和丰富度更高。

表 3 微生物多样性和丰富度

Tab. 3 Microbial Diversity and Abundance

功能单元	OTU	多样性		丰富度			覆盖率
		Shannon 指数	Simpson 指数	Sobs 指数	Ace 指数	Chao 指数	
厌氧池	577	4.383	0.037	585	642	647	99.69%
前段缺氧池	592	4.403	0.034	593	662	659	99.66%
后段缺氧池	598	4.462	0.032	595	658	675	99.66%
好氧池	579	4.353	0.037	579	649	667	99.65%

2.2.2 微生物群落结构分析

图 4 表明,变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota)是主要的优势菌门,相对丰度分别为 41.21%~49.63%和 26.76%~35.67%。多数的脱氮除磷功能性微生物都属于 Proteobacteria 和 Bacteroidota,是活性污泥系统中的典型菌门^[13-15]。

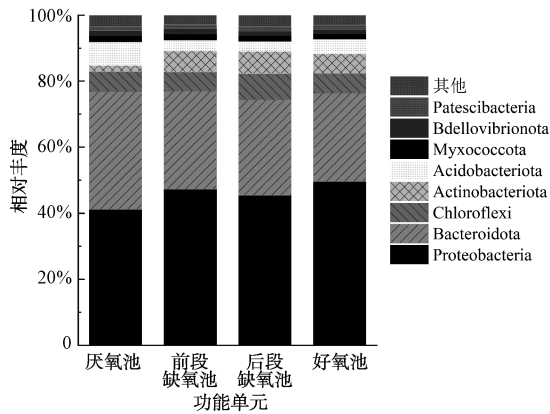


图 4 微生物门水平组成

Fig. 4 Composition of Microorganisms at Phylum Level

图 5 显示,各功能单元中微生物群落结构并无明显差异。*Candidatus _ Competibacter* (18.75% ~

26.43%)、*OLB8* (7.81% ~ 12.52%)、*Terrimonas* (3.41% ~ 4.51%)、*Norank _f_ 37-13* (3.41% ~ 4.31%)、*Norank _f_ Saprospiraceae* (3.10% ~ 3.96%)、*Tetrasphaera* (0.97% ~ 4.14%) 和 *Dokdonella* (2.97% ~ 3.80%) 具有较高的相对丰度,其中 *Candidatus _ Competibacter* 和 *OLB8* 相对丰度明显高于其他菌属,是主要的优势菌属。

Candidatus _ Competibacter 是具有反硝化能力的聚糖菌,可以还原 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ ^[16-17]。由图 5 可知,进入缺氧单元后,最主要的优势菌属 *Candidatus _ Competibacter* 相对丰度有着较为明显的上升,这可能是前段缺氧池和后段缺氧池能够有效脱氮的原因。在其他相对丰度较高的菌属中,*OLB8*、*Terrimonas*、*Norank _f_ Saprospiraceae* 和 *Dokdonella* 均具有脱氮功能^[13,18-20]。上述结果表明,缺氧分段式 UCT 工艺可以很好地富集脱氮功能微生物,从而使得该工艺具有良好脱氮效果。

Tetrasphaera 是一种具有发酵除磷功能的聚磷菌,已经在很多采用强化生物除磷工艺的污水厂中被检出^[21-22]。在新型 UCT 工艺中,*Tetrasphaera* 呈

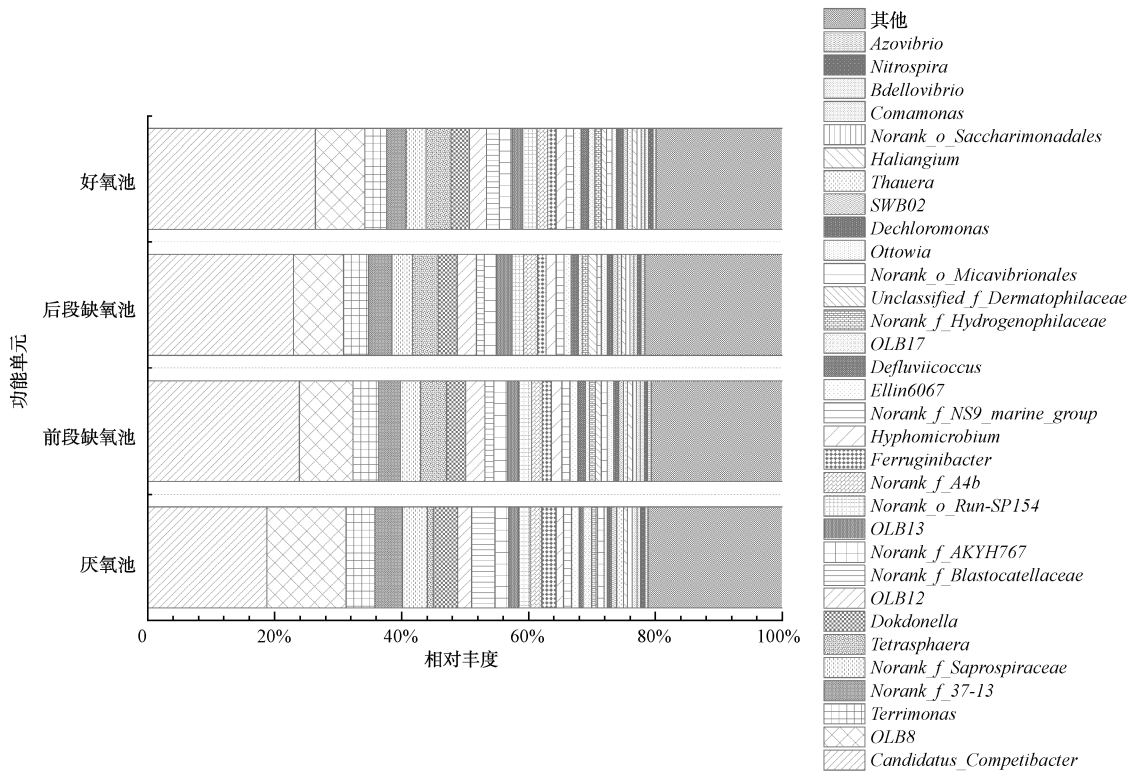


图 5 微生物属水平组成

Fig. 5 Composition of Microorganisms at Genus Level

现出较高的相对丰度。进入缺氧单元后, *Tetrasphaera* 相对丰度由 0.97% 增加到 4.14%, 并在随后的处理单元中保持稳定。 *Tetrasphaera* 可以发酵有机物且不释放磷, 同时还可以在好氧条件下消耗糖原发生吸磷反应, 这可能是新型 UCT 工艺能够有效除磷的原因^[16,23]。另外, 在新型 UCT 工艺中还存在着具有反硝化除磷功能的聚磷菌 *Dechloromonas*^[22]。许多研究^[5,10]证实了在 UCT 工艺中往往存在反硝化除磷菌。虽然本研究中反硝化除磷过程并不明显, 但 *Dechloromonas* 的存在表明新型 UCT 工艺具有反硝化除磷的潜能。

3 结论

(1) 缺氧分段式 UCT 工艺具有稳定的脱氮除磷效果, COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 的平均出水质量浓度分别为 14.76、0.37、9.98 mg/L 和 0.78 mg/L, 平均去除率分别为 95.85%、99.37%、83.12% 和 87.13%。

(2) 前段缺氧池和后段缺氧池是反硝化脱氮的主要功能单元, NO₃⁻-N 去除量分别为 33.27 mg/h 和 22.16 mg/h。分段进水使得后段缺氧池可以进一步去除前段缺氧池残留的 NO₃⁻-N, 实现了深度脱氮, 从而使得后段缺氧池至厌氧池的回流更有利于保证厌氧释磷反应的顺利进行。

(3) 在缺氧分段式 UCT 工艺体系中, Proteobacteria 和 Bacteroidota 为优势菌门。该工艺可以很好地富集反硝化菌, 反硝化菌 *Candidatus_Compitibacter* (18.75%~26.43%) 和 *OLB8* (7.81%~12.52%) 为主要的优势菌属。 *Tetrasphaera* 和 *Dechloromonas* 是缺氧分段式 UCT 工艺体系中主要的聚磷菌。

参考文献

- [1] JIN B D, LIU Y, LI X, et al. New insights into denitrification and phosphorus removal with degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in two-sludge system[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126610. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126610.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2021 年中国生态环境状况公报[R/OL]. (2022-05-26) [2022-09-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China ecological environment status bulletin 2021 [R]. (2022-05-26) [2022-09-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>.
- [3] 刘亦凡, 陈涛, 李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(16): 36-41.
LIU Y F, CHEN T, LI J. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(16): 36-41.
- [4] 韦琦, 罗方周, 徐相龙, 等. A²/O 工艺处理低温低碳氮比生活污水的脱氮效率及反应动力学[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(4): 1367-1376.
WEI Q, LUO F Z, XU X L, et al. Nitrogen removal efficiency and kinetics of A²/O process treating low temperature and low C/N ratio municipal wastewater [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1367-1376.
- [5] MAJDI NASAB A R, SOLEYMANI S M, NOSRATI M, et al. Performance evaluation of a modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic process for organic and nutrient removal [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(3): 394-403.
- [6] 乔宏儒, 孙力平, 吴振华, 等. 倒置 A²/O 工艺和 UCT 工艺脱氮除磷效能比较[J]. *水处理技术*, 2015, 41(12): 118-121.
QIAO H R, SUN L P, WU Z H, et al. The comparison of nitrogen and phosphorus removal between inverted A²/O process and UCT process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(12): 118-121.
- [7] 尤立, 刘平, 胡春明. 改良型 UCT 工艺在农村生活污水中的应用[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 651-658.
YOU L, LIU P, HU C M. Application of modified UCT process in decentralized rural sewage treatment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(2): 651-658.
- [8] TIAN J B, CHENG X, DENG S Y, et al. Inducing in situ crystallization of vivianite in a UCT-MBR system for enhanced removal and possible recovery of phosphorus from sewage [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15): 9045-9053.
- [9] 贾军峰, 吴俊奇, 王真杰, 等. 改良 UCT 工艺处理高氨氮生活污水的实验研究[J]. *应用化工*, 2020, 49(3): 661-664.
JIA J F, WU J Q, WANG Z J, et al. Experimental study on improved UCT process for treatment of high ammonia nitrogen domestic sewage [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(3): 661-664.
- [10] HAO X D, LOOSDRECHT M C M, MEIJER S C F, et al. Model-based evaluation of two BNR process-UCT and A₂N [J]. *Water Research*, 2001, 35(12): 2851-2860.
- [11] 孙梦, 张培玉, 张晨. 城市污水的除磷技术分析[J]. *水处理技术*, 2010, 36(8): 16-20.
SUN M, ZHANG P Y, ZHANG C. Analysis of urban wastewater phosphorus removal technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(8): 16-20.

(下转第 110 页)

- Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 7(8): 72-75.
- [9] 袁旭峰, 李杰, 李佳佳, 等. 载体种类和密度对固定床厌氧反应器抗冲击能力的影响[C]. 大连: 第十五次全国环境微生物学学术研讨会, 2012.
- YUAN X F, LI J, LI J J, et al. Influence of carrier type and density on shock resistance of fixed bed anaerobic reactor[C]. Dalian: The 15th National Symposium on Environmental Microbiology, 2012.
- [10] 刘远. 叠片展开式悬浮生物载体接触氧化法地表水源预处理的研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- LIU Y. Study on surface source water pretreatment by contact oxidation of laminated expanded suspended biological carrier [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [11] ZHONG H Y, WANG H, TIAN Y, et al. Treatment of polluted surface water with nylon silk carrier-aerated biofilm reactor (CABR) [J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121617. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121617.
- [12] 孙慧, 董俊宇, 王呈, 等. 人工漂流河弯道内漂流筏运动的数值模拟[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 59-65.
- SUN H, DONG J Y, WANG C, et al. Numerical simulation of raft movement in the artificial drifting river bend [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(5): 59-65.
-
- (上接第 93 页)
- [12] HUANG X, DONG W Y, WANG H J, et al. Biological nutrient removal and molecular biological characteristics in an anaerobic-multistage anaerobic/oxic (A-MAO) process to treat municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 969-978. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.161.
- [13] XIANG J H, WANG C, LÜ W Z, et al. Differences of bacterial communities in two full-scale A²/O municipal wastewater treatment plants and their effects on effluent total nitrogen removal [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 21: 101317. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101317.
- [14] 赵诗惠, 吕亮, 蒋志云, 等. ABR-MBR 组合工艺短程硝化过程的微生物种群[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 566-573.
- ZHAO S H, LÜ L, JIANG Z Y, et al. Analysis of microbial population of shortcut nitrification in ABR-MBR process [J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 566-573.
- [15] 蒋志云, 韦佳敏, 缪新年, 等. ABR-MBR 工艺反硝化除磷微生物群落特征分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(7): 1653-1661.
- JIANG Z Y, WEI J M, MIAO X N, et al. Analysis of microbial community characteristics of denitrifying phosphorus removal in the ABR-MBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(7): 1653-1661.
- [16] GAO X J, XUE X F, LI L Y, et al. Balance nitrogen and phosphorus efficient removal under carbon limitation in pilot-scale demonstration of a novel anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. Water Research, 2022, 223: 118991. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118991.
- [17] HOSSAIN M I, CHENG L, CORD-RUWISCH R. Sustained and enhanced anaerobic removal of COD and nitrogen in a zeolite amended glycogen accumulating organism dominated biofilm process [J]. Science of the Total Environment, 2021, 807: 150602. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150602.
- [18] CAO L, SUN R, DONG W, et al. A novel multistage anoxic/aerobic process with sludge regeneration zone (R-MAO) for advanced nitrogen removal from domestic sewage [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 124: 758-768. DOI: 10.1016/j.jes.2022.02.008.
- [19] HUANG X, YAO K, YU J H, et al. Nitrogen removal performance and microbial characteristics during simultaneous chemical phosphorus removal process using Fe³⁺ [J]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127972. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127972.
- [20] YANG N, ZHAN G Q, LI D P, 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: 271-280. DOI: 10.1016/j.cej.2018.04.200.
- [21] SINGLETON C M, PETRIGLIERI F, WASMUND K, et al. The novel genus, 'Candidatus Phosphoribacter', previously identified as *Tetrasphaera*, is the dominant polyphosphate accumulating lineage in EBPR wastewater treatment plants worldwide [J]. The ISME journal, 2022, 16(6): 1605-1616.
- [22] ZHAO W H, BI X J, PENG Y Z, et al. Research advances of the phosphorus-accumulating organisms of *Candidatus Accumulibacter*, *Dechloromonas* and *Tetrasphaera*: Metabolic mechanisms, applications and influencing factors [J]. Chemosphere, 2022, 307: 135675. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135675.
- [23] LIU R B, HAO X D, CHEN Q, et al. Research advances of *Tetrasphaera* in enhanced biological phosphorus removal: A review [J]. Water Research, 2019, 166: 115003. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115003.