

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.015

三维固定化生物膜反应器处理农村污水的中试研究

郑照勇^{1,2,3}, 史绪川², 刘淑杰^{1,2,3}, 李 贇², 陆兰兰², 彭嘉锐²

(1. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006;
2. 清研环境科技股份有限公司, 广东 深圳 518071; 3. 桂林理工大学 广西岩溶地区
水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006)

摘 要: 针对农村分散式生活污水的处理需求,设计开发了以聚酯纤维为填料的三维固定化生物膜反应器。中试结果表明,当填料填充率从 $57.2\text{ m}^2/\text{m}^3$ 提高至 $78.8\text{ m}^2/\text{m}^3$ 时,反应器内的生物量可提高 $1\ 010\text{ mg/L}$,氨氮容积负荷可提高 $0.02\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$;将缺氧区混合方式由搅拌器混合改为穿孔管曝气混合,可以保证缺氧区内稳定的缺氧环境和良好的传质效果,总氮去除率由 52.19% 提升到 70.84% ;优化水力停留时间(HRT)等运行参数,当HRT为 12 h 时,COD、 NH_4^+-N 、TN和SS平均去除率分别为 82.47% 、 92.81% 、 69.39% 、 88.78% ,总氮去除负荷为 $(0.15\pm0.04)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。分析反应器内的微生物群落结构发现,随着挂膜时间的增加,好氧区内主要硝化菌群*Nitrospira*和Ellin6067的相对丰度从 6.92% 提升至 10.77% ,缺氧区内*Rhodocyclaceae*和vadinHA17等反硝化细菌的相对丰度从 25.92% 提升至 31.28% 。三维固定化填料可有效富集与脱氮相关的菌属,从而提高生物脱氮效果。

关键词: 三维固定化生物膜反应器; 农村生活污水; 模块化装备; 生物脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0101-08

Pilot Study on Three-dimensional Immobilized Biofilm Reactor for Treatment of Rural Domestic Sewage

ZHENG Zhao-yong^{1,2,3}, SHI Xu-chuan², LIU Shu-jie^{1,2,3}, LI Yun², LU Lan-lan², PENG Jia-rui²

(1. Guangxi Key Laboratory of Theory and Technology for Environmental Pollution Control, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Qingyan Environmental Technology Co. Ltd., Shenzhen 518071, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: A three-dimensional immobilized biofilm reactor utilizing polyester fiber as the packing medium was designed and developed for the effective treatment of decentralized domestic sewage in rural areas. When the filler filling ratio increased from $57.2\text{ m}^2/\text{m}^3$ to $78.8\text{ m}^2/\text{m}^3$, the biomass in the pilot-scale reactor could be enhanced by $1\ 010\text{ mg/L}$, and the volumetric loading rate of ammonia nitrogen could be elevated by $0.02\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$. Changing the mixing mode in the anoxic zone from agitator mixing to perforated tube aeration mixing created a stable anoxic environment and enhanced the mass transfer efficiency. As a result, the TN removal efficiency increased significantly from 52.19% to 70.84% . The

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20200109150612249)

通信作者: 刘淑杰 E-mail: 10734452@qq.com

operational parameters, such as hydraulic retention time (HRT), were optimized to enhance process efficiency and performance. When the HRT was set to 12 hours, the average removal efficiencies of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and SS were 82.47%, 92.81%, 69.39%, and 88.78%, respectively. Additionally, the TN removal load was determined to be $(0.15 \pm 0.04) \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Analysis of the microbial community structure within the reactor revealed that the relative abundance of key nitrifying bacteria, including *Nitrospira* and Ellin6067 in the aerobic zone, increased from 6.92% to 10.77% with the increase of biofilm formation time. Additionally, the relative abundance of denitrifying bacteria, such as *Rhodocyclaceae* and vadinHA17, rose from 25.92% to 31.28%. The three-dimensional immobilized media can significantly enhance the enrichment of microorganisms associated with nitrogen removal, consequently improving the efficiency of biological nitrogen removal.

Key words: three-dimensional immobilized biofilm reactor; rural domestic sewage; modular equipment; biological nitrogen removal

我国农村人口规模庞大,经济发展水平偏低,当前农村居民产生的大量生活污水仍以直排为主。与城市相比,农村生活污水在水质和水量上存在明显差异,受经济条件、生活习惯、地域气候及地理环境等因素的影响,农村生活污水水质和水量具有较大的波动性。鉴于农村生活污水的特点及其处理设施运维管理水平低等现实情况,使用传统的活性污泥法工艺容易出现“水土不服”、污水处理设施“晒太阳”等问题,因此需要开发适合农村分散式污水处理的工艺技术与设备。

生物膜法具有抗冲击能力强、产泥量少和运维简单等优点,目前已有一些采用生物膜工艺处理农村生活污水的设施^[1],但在运行中仍存在问题,如生物接触氧化工艺容易出现曝气、布水不均和填料堵塞等问题;生物滤池需要定期反冲洗,运行管理较为复杂;生物转盘投资费用高、运行维护难度大。聚酯纤维是目前运用较多的一类生物膜填料材质,具有不容易被微生物降解、孔隙分布均匀、挂膜效果好等特点^[2]。选用聚酯纤维作为模块填料,将模块设计为三维固定化生物帘的形式,可使模块具有丰富的环流通道,避免发生堵塞,同时模块化、装配式的形式可实现快捷安装、建设周期短。据此,笔者开发了以聚酯纤维为填料的三维固定化生物膜反应器,基于中试考察了填料填充率、缺氧区混合方式及水力停留时间(HRT)对该工艺处理农村生活污水效能的影响,并从微生物学角度分析了反应器的脱氮机理,以为处理分散型农村生活污水提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验用水和接种污泥

试验采用深圳某水质净化厂的格栅出水模拟农村生活污水,试验期间反应器进水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、SS分别为96.08~492.90、16.70~46.10、20.13~49.19、40~352 mg/L,设计出水水质执行广东省地方标准《农村生活污水处理排放标准》(DB 44/2208—2019)的一级A标准。接种污泥取自该水质净化厂的脱水污泥(含水率为79.6%)。向反应器中加入脱水污泥,连续闷曝48 h后通水运行。

1.2 试验装置和运行方式

试验装置的设计处理量为6 m³/d。工艺流程如图1所示,在缺氧区安装一个模块、在好氧区安装两个模块。使用直流水泵将进水桶的污水抽入缺氧区,之后从顶部隔板翻越后进入好氧区底部,好氧区出水口设置在反应器末端,好氧区硝化液经回流管回流至缺氧区前端进行反硝化。反应器采用纯膜法运行,在反应器前后端设置排泥口定期排泥,不设置二沉池。

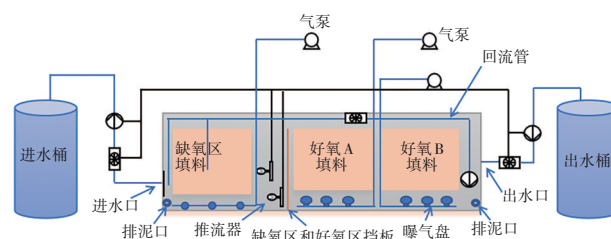


图1 中试工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process in pilot test

1.3 试验运行条件优化

试验考察了填料填充率、缺氧区混合方式、HRT等参数对三维固定化生物膜反应器处理效果的影响。反应器共运行6个月,分为6个阶段,各阶段的运行条件见表1。在阶段Ⅰ和Ⅱ,分别采用57.2和78.8 m²/m³的填料填充率,探究其对污染物去除效果的影响;在阶段Ⅱ和Ⅲ,在缺氧区分别使用搅拌器与穿孔管曝气混合,研究不同混合方式对缺氧区DO浓度以及污染物去除效果的影响;在阶段Ⅲ和Ⅳ,对比持续曝气和开10 min停10 min的循环运行混合方式对污染物的去除效果;在阶段Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ,调整总HRT分别为12、9、10.5 h,探究在保证出水水质达标的情况下反应器的最大处理量。运行期间,硝化液回流比均设置为200%。

表1 试验各阶段工艺条件

Tab.1 Process conditions of each stage

阶段	进水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	缺氧区HRT/h	好氧区HRT/h	填充率/(m ² ·m ⁻³)	缺氧搅拌方式
Ⅰ	0.25	4	8	57.2	搅拌器搅拌
Ⅱ	0.25	4	8	78.8	搅拌器搅拌
Ⅲ	0.25	4	8	78.8	持续曝气搅拌
Ⅳ	0.25	4	8	78.8	开10 min停10 min
Ⅴ	0.33	3	6	78.8	开10 min停10 min
Ⅵ	0.29	3.5	7	78.8	开10 min停10 min

1.4 检测项目与方法

1.4.1 常规指标测定

定期取进出水水样测定COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、SS等指标,并定期检测DO浓度和填料挂膜生物量。其中,COD采用标准重铬酸钾法测定,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,NO₃⁻-N采用紫外分光光度法测定,SS采用重量法测定。在缺氧区与好氧区的不同位置,多次取50 mm×50 mm的填料,使用超声波清洗器提取填料上的污泥,采用重量法测定单位面积填料上的生物量,以此换算得到反应器内的生物量。DO采用便携式溶解氧仪检测。

1.4.2 微生物学分析

在阶段Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ,分别从缺氧池和好氧池内随机取50 mm×50 mm的填料,使用超声波清洗器提

取填料上的生物膜。缺氧区样本分别命名为A1、A2、A3,好氧区样本分别命名为O1、O2、O3。将生物膜样本置于体积比为1:1的无水乙醇中,在1 h内送到实验室的-80℃超低温冰箱中保存。按照FastDNA™ Spin Kit for Soil试剂盒中说明书步骤提取生物膜中微生物的DNA,提取样品送至上海美吉生物医药科技有限公司进行测序分析。

2 结果与讨论

2.1 三维固定化生物膜反应器的处理效能

2.1.1 不同填充率对污染物去除效果的影响

在阶段Ⅰ和Ⅱ,好氧区的填料填充率从57.2 m²/m³提高到78.8 m²/m³,好氧区对应的生物量从2 885 mg/L提升到3 895 mg/L。反应器对COD、TN、NH₄⁺-N等污染物的去除效果如图2所示。在阶段Ⅰ和Ⅱ,进水COD浓度波动较大,但出水COD浓度整体保持在较低水平,出水COD平均浓度分别为45.09和48.78 mg/L,COD平均去除率分别为81.6%和79.6%,SS平均去除率分别为90.46%和88.70%,反应器呈现出较强的抗冲击能力。

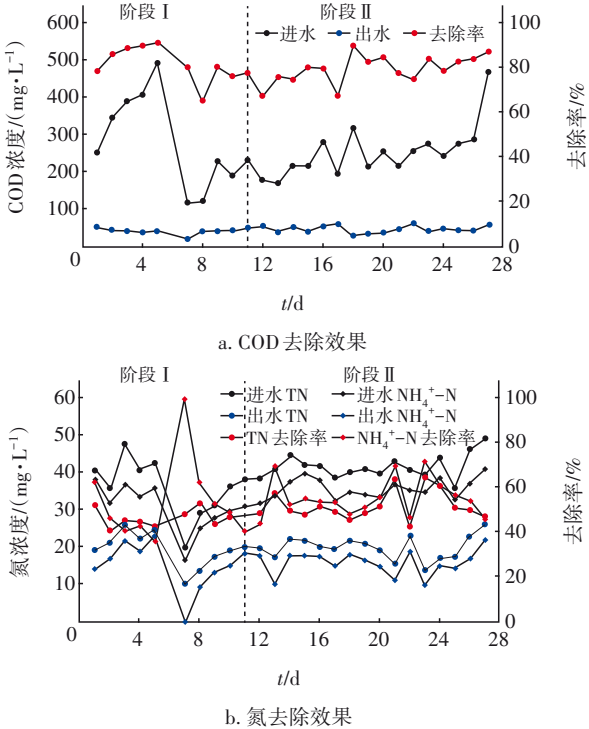


图2 不同填料填充率下各污染物的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of pollutants under different filler filling ratios

从阶段Ⅰ到阶段Ⅱ,NH₄⁺-N平均去除率从48.85%提升到56.30%,这表明提升反应器内的填

料填充率、增加生物量有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。刘勇^[3]采用固定床薄膜生物反应器处理农村生活污水,发现膜卷间隙为5 mm时比10 mm时的COD去除率提升6.7%、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率提升5.92%、TN去除率提升6.88%,说明在一定范围内缩小膜卷间隙、提高填充率有利于污染物的去除。朱海东^[4]在试验中发现,当填料填充率提升到一定值时,COD去除率会出现下降趋势,过高的填充率会削减水流传质,进而影响污染物的去除。在本试验中,阶段I到阶段II的填料间隙由6 mm缩小至3.6 mm,已处于较窄水平,继续增加填料,发现填料之间会重叠,造成堵塞而影响水流传质,将不利于水体中污染物的去除。因此本研究后续试验固定填充率为 $78.8\text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

2.1.2 不同混合方式对污染物去除效果的影响

在阶段III,缺氧区采用穿孔管连续曝气混合代替推流器搅拌,缺氧区DO浓度从0.13~0.49 mg/L提升至0.21~0.61 mg/L,此时COD和SS去除率依然都保持在80%以上,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN平均去除率分别从56.30%和52.19%提升至90.51%和69.18%,由此认为曝气混合方式带来了更均匀的混合和更好的传质效果,同时缺氧区发生了同步硝化反硝化反应^[5],使得脱氮效果提升,这表明穿孔管曝气作为缺氧区混合方式在实际应用中是有效的。

连续曝气会造成缺氧区DO浓度持续升高,可能影响反硝化效果,因此后续试验采用间歇曝气。阶段III(连续曝气)和阶段IV(气泵开10 min停10 min循环运行)各污染物的去除效果见图3。两阶段对COD的去除率在72.80%~93.47%之间,当面临大水量冲击时,出水COD始终稳定在60 mg/L以下,出水SS稳定在20 mg/L以下,SS去除率为90.00%~96.51%,说明反应器对SS的截留效果较好,调整曝气频率并未影响其抗冲击能力。从阶段III到阶段IV,缺氧区DO浓度从0.45 mg/L降至0.29 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率从90.51%升至93.95%,出水TN稳定在15 mg/L以下,TN平均去除率达到70.84%,脱氮效果得到提升。将缺氧区混合方式改为间歇曝气后,对COD和SS的去除效果影响不大,但有效降低了缺氧区DO浓度,保障了出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN浓度满足多数地方农村生活污水一级排放标准^[6],也削弱了气体对生物膜的剪切力,有利于生物膜形成好氧/缺氧微环境,对同步硝化反硝化产生积

极影响^[7]。

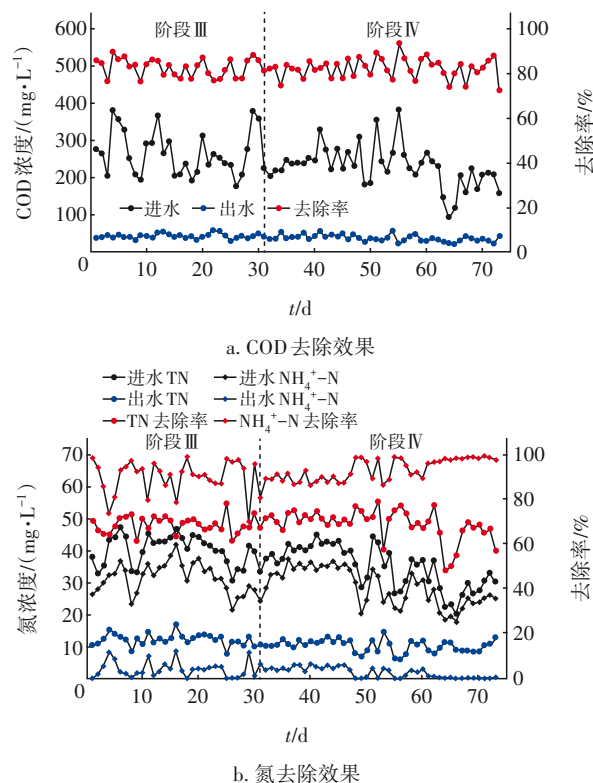


图3 缺氧区不同混合方式下各污染物的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of pollutants under different mixing modes in anoxic zone

2.1.3 不同HRT对污染物去除效果的影响

反应器在不同HRT条件下去除污染物的效果如图4所示。在阶段IV(HRT=12 h), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN平均去除率分别为92.81%和69.39%,TN去除负荷为 $(0.15\pm0.04)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$;COD和SS的平均去除率分别为82.47%和88.78%。在阶段V,将HRT缩短至9 h, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN平均去除率分别为91.85%和63.55%,但出现了出水TN浓度超过15 mg/L的情况。在阶段VI,延长HRT至10.5 h, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN平均去除率分别为95.01%和62.76%,出水TN可稳定在15 mg/L以下。同时,HRT的变化影响了COD的去除效果,当HRT为9、10.5和12 h时,出水COD平均浓度分别为51.01、42.86和38.99 mg/L,出水SS平均浓度分别为20.74、11.34和11.85 mg/L。试验结果表明,当HRT为9 h时,虽然提升了处理量,但进水COD和氨氮负荷超过了反应器的处理能力,导致出水水质不能稳定达标。为了保证反应器长效稳定运行,将HRT调整为10.5和12 h时,出水COD和TN浓度可满足当前地方农村生活污水一级

排放标准。对于总磷的去除,反应器并未设置厌氧区且以纯膜法运行,剩余污泥量少,目前只能去除部分非溶解性磷。但三维固定化生物膜反应器能有效去除污水中的有机污染物,并具备一定的抗冲击负荷能力,可以较好地应用于有脱碳除氮需求的项目中。黄伟平等^[8]采用以改性聚氨酯填料为载体的MBBR对城市污水进行深度脱氮处理,TN去除负荷为 $0.068 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;程贤良等^[9]利用负载 MnO_2 的改性聚氨酯棉作为生物滤池的载体,对生活污水进行强化脱氮处理,最佳的TN去除负荷为 $0.059 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;丁仁伟^[10]通过曝气强化人工湿地处理污水厂尾水,TN去除负荷为 $0.013 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;韩文杰等^[11]采用多级多段纯膜MBBR处理生活污水,TN去除负荷为 $(0.16 \pm 0.05) \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。对比不同工艺处理生活污水的TN去除负荷,三维固定化生物膜反应器相比生物滤池和人工湿地具有明显的脱氮优势,与MBBR具有相近的脱氮效果。

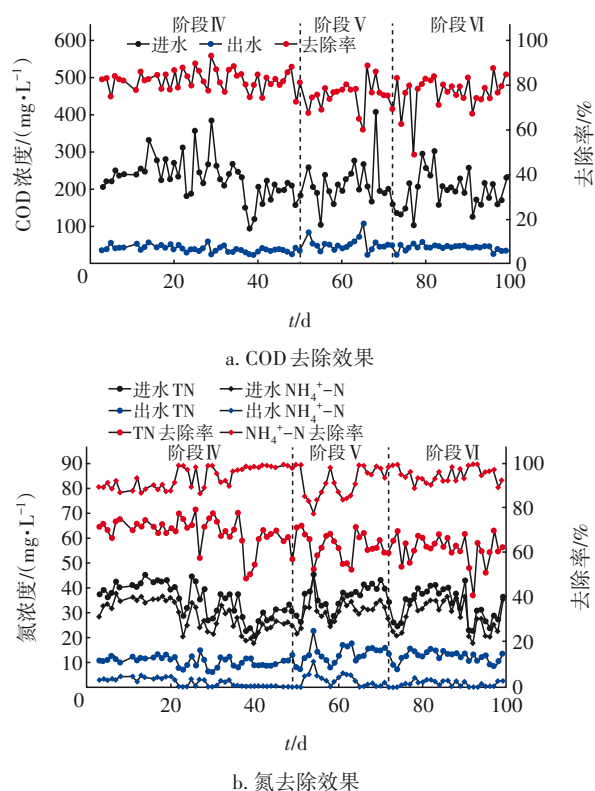


图4 不同HRT条件下各污染物的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of pollutants under different HRTs

2.2 微生物群落结构变化

2.2.1 Alpha多样性

在明确填充率的阶段Ⅱ、改变缺氧混合方式的

阶段Ⅲ和稳定运行的阶段Ⅳ,分别采集缺氧区和好氧区的生物膜样本,并命名为A1、A2、A3和O1、O2、O3。利用高通量测序对填料上生物膜的微生物群落丰富度和多样性进行分析,结果见表2。其中,Sobs指数值越高表示生物量越高,Chao1和Ace指数值越高表示群落丰富度越高,Shannon指数值越高表示微生物多样性越高,Simpson值越高表示微生物多样性越低。由表2可知,所有样本的Coverage均在99.5%以上,说明了测序结果的有效性。在缺氧区,从A1到A2,Chao1和Ace值下降,A2样本的Simpson指数是A1的近2倍,并且Shannon和Sobs指数亦下降,说明阶段Ⅲ更改缺氧区为曝气混合后,DO浓度的上升对缺氧区内生物量和丰富度产生了不利影响;从A2到A3,Chao1、Ace、Sobs和Shannon指数都有上升,表明在调整为间歇曝气后,DO浓度的下降有利于生物膜内形成稳定的微生物群落,微生物的丰富度提升,TN去除率增加,说明DO是影响反硝化效果的主要因素。在好氧区,从O1到O2,Chao1、Ace和Shannon指数上升,而Simpson指数明显下降,说明在曝气条件下异养菌大量繁殖,保证了COD的去除效果,提升了好氧区的生物多样性,但也造成硝化功能菌群优势地位不明显;而从O2到O3,Chao1、Ace指数均有下降,Shannon指数亦下降,Simpson指数略有上升,说明在长期运行后,生物膜上的微生物在不断进行生长和脱落,生物膜的结构相对稳定,生物多样性降低。

表2 不同时期细菌群落丰富度和多样性指数

Tab.2 Bacterial community richness and diversity index in different periods

项目	Sobs	Shannon	Simpson	Ace	Chao1	Coverage
A1	3 045	6.868 6	0.002 5	3 127.8	3 064.1	0.995 9
O1	2 205	6.129 2	0.015 4	2 276.7	2 236.3	0.996 4
A2	2 043	6.372 2	0.004 5	2 072.5	2 050.8	0.998 3
O2	2 780	6.612 8	0.006 3	2 843.9	2 795.2	0.996 8
A3	2 578	6.594 3	0.004 3	2 578.0	2 578.0	1.000 0
O3	2 250	6.481 8	0.008 9	2 303.4	2 279.5	0.997 0

2.2.2 门水平上的微生物群落结构变化

缺氧区和好氧区中微生物群落结构在门水平上的变化如图5所示。可以看出,在不同运行阶段,缺氧区和好氧区生物膜样本中的功能微生物种类丰富度存在差异,但优势微生物种类具有相似性。在门水平上,微生物以变形菌门(*Proteobacteria*)、拟

杆菌门(*Bacteroidota*)、硝化螺旋菌门(*Nitrospirota*)、酸杆菌门(*Acidobacteriota*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)为主。其中变形菌门是由亚硝化单胞菌属组成的门,能在好氧条件下稳定去除氨氮和降解有机物及营养物^[12],也被认为是活性污泥和生物膜中与氮、磷污染物去除密切相关的优势微生物^[13],如丛毛单胞菌科(*Comamonadaceae*)、红环菌科(*Rhodocyclaceae*)、嗜氢菌科(*Hydrogenophilaceae*)。变形菌门的相对丰度由A1中的37.89%升至A2中的46.07%,然后又回落至A3中的33.16%,而在好氧区,由O1中的29.33%升至O2中的38.14%和O3中的35.88%,这与多样性分析中各参数的变化一致,DO浓度的升高,有利于变形菌门成为优势菌门,缺氧区调整为间歇曝气后,DO浓度下降,变形菌门的相对丰度亦出现下降。拟杆菌门是一种发酵细菌,在厌氧条件下对颗粒有机物和蛋白质具有去除作用^[14],在缺氧区,拟杆菌门的相对丰度由A1的14.91%逐渐升至A3的22.15%,保障了对COD的稳定去除,试验数据亦表明改变填料填充率和缺氧区混合方式并没有对COD的去除产生较大影响;在好氧区,拟杆菌门的相对丰度由O1的10.95%升至O2的17.70%,再降至O3的13.76%,说明生物膜在生长,但随着反应器的运行,生物膜上的一些微生物出现脱落现象。对比O1和O3样本,好氧区的硝化反应特征微生物,例如硝化螺旋菌门的相对丰度由6.06%升至10.01%,显著高于缺氧区的相对丰度(由A1的3.02%下降至A3的0.86%),具有长污泥龄的硝化菌在不断富集,王永磊等^[15]构建的A²O复合填料生物膜工艺运行75 d后,硝化螺旋菌门在好氧区域的相对丰度为5.86%,表明本工艺在硝化菌群的富集培养方面具有优势。

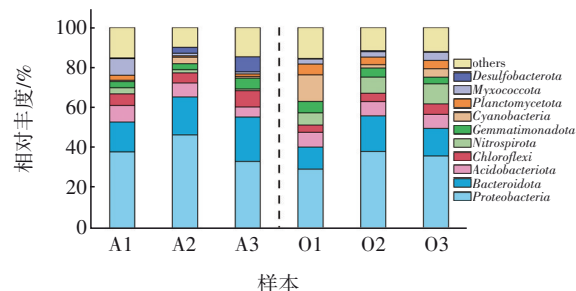


图5 不同运行阶段微生物群落在门水平上的相对丰度

Fig.5 Relative abundance of microbial communities at phylum level under different operation stages

2.2.3 属水平上的微生物群落结构变化

缺氧区 and 好氧区中微生物群落结构在属水平上的变化如图6所示。在好氧区,生物膜中具有硝化作用的微生物主要为硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)和Ellin6067,二者在O3中的相对丰度分别为10.00%和0.77%,有研究表明^[16],*Nitrospira*能够将 NH_4^+-N 直接氧化为 NO_3^--N ,对硝化过程影响显著,而且Ellin6067是氨氧化菌(AOB)、*Nitrospira*是亚硝酸盐氧化菌(NO_B),二者可以加快硝化反应的进程。在缺氧区,具有反硝化作用的*Rhodocyclaceae*^[17]和vadinHA17^[18]的相对丰度,分别从A1的3.47%和0.05%提升到A3的10.15%和4.42%,反硝化功能微生物的总相对丰度从25.92%提升到31.28%,保证了反应器对TN的去除效果。在A2中,脱氯单胞菌属(*Dechloromonas*)和陶厄氏菌属(*Thauera*)的相对丰度分别可达到6.07%和3.90%,是A1中的4.7和15.4倍,Zhen等^[19]通过分子生物学分析表明,*Dechloromonas*和*Thauera*的共存可保证缺氧阶段氮和磷的高效去除,也可在较高溶解氧环境下产生同步硝化反硝化反应,同时两者也是分泌胞外聚合物(EPS)的典型菌属,有助于系统形成稳定的生物膜,可以使挂膜均匀、保证传质效果,在水质变化大的生活污水冲击下依然能保持良好的脱氮效果,这也是阶段Ⅲ比阶段Ⅱ的DO浓度高,但其TN去除率仍比阶段Ⅱ高的原因之一。

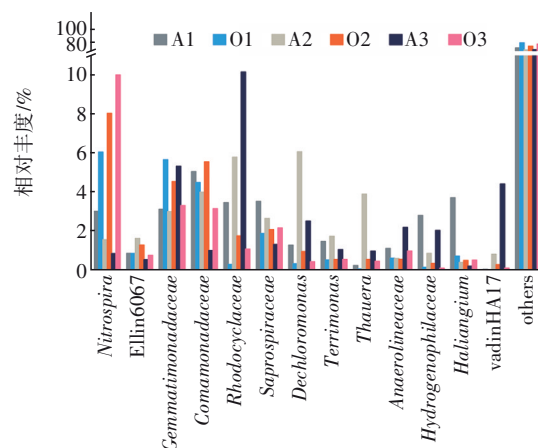


图6 不同运行阶段微生物群落在属水平上的相对丰度

Fig.6 Relative abundance of microbial communities at genus level under different operation stages

3 结论

① 三维固定化生物膜反应器在缺氧区和好氧区均安装三维固定式生物帘结构的模块,以纯膜

法运行,当填料填充率从 $57.2\text{ m}^3/\text{m}^3$ 增至 $78.8\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时,氨氮容积负荷提高 $0.02\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$;将缺氧区的搅拌器混合改为穿孔管曝气混合时,TN去除率从52.19%提升到70.84%;再缩短HRT为10.5 h时, NH_4^+-N 和TN平均去除率分别为95.01%、62.76%,相应的出水指标可以满足当前地方农村污水一级排放标准。

② 在HRT为12 h、回流比为200%的条件下,三维固定化生物膜反应器对模拟农村生活污水中COD、 NH_4^+-N 、TN、SS的平均去除率分别可达到82.47%、92.81%、69.39%、88.78%,出水SS浓度稳定在 20 mg/L 以下,TN去除负荷为 $(0.15\pm 0.04)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,反应器抗冲击性能强、处理效果稳定。

③ 微生物多样性和群落结构分析结果表明,随着反应器的运行,好氧区硝化与缺氧区反硝化相关功能微生物的相对丰度均有明显提升,好氧区中*Nitrospira*和Ellin6067的相对丰度从6.92%提升至10.77%,缺氧区中*Rhodocyclaceae*和vadinHA17等反硝化菌的相对丰度从25.92%提升至31.28%,这些功能微生物共同促进了反应器的生物除碳脱氮效果。

参考文献:

- [1] 林明,刘雷,王磊,等. A/O-MBBR组合工艺处理生活污水实验研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 129-133, 137.
LIN Ming, LIU Lei, WANG Lei, *et al.* Experimental study on A/O-MBBR combined process for domestic sewage treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(9): 129-133, 137 (in Chinese).
- [2] 李昀婷. 农村生活污水AAO-接触氧化一体化处理装置设计与处理效果研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
LI Yunting. On the Design and Treating Effect of AAO-Bio-contact Oxidation Integrated Treatment Plant for Rural Domestic Sewage [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021 (in Chinese).
- [3] 刘勇. 固定床薄膜生物反应器处理农村生活污水生产性试验研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
LIU Yong. Experimental Study on the Treatment of Rural Domestic Sewage by Fixed Bed Membrane Bioreactor [D]. Chengdu: University of Western China, 2022 (in Chinese).
- [4] 朱海东. 无纺布填料FBBR处理城市生活污水的试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
ZHU Haidong. Research on Urban Domestic Sewage Treatment by FBBR Packed with the Non-woven Filler [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020 (in Chinese).
- [5] 王颖楠, 郁金星, 刘克成, 等. 填料对膜生物反应器处理高氨氮废水的影响[J]. 水处理技术, 2023, 49(8): 137-140.
WANG Yingnan, YU Jinxing, LIU Kecheng, *et al.* Effect of fillers on the treatment of high ammonia wastewater in membrane bioreactor [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(8): 137-140 (in Chinese).
- [6] 朱世泰, 申丽芬, 王广华. 农村生活污水排放标准统计分析思考[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 113-118.
ZHU Shitai, SHEN Lifan, WANG Guanghua. Statistical analysis on discharge standard of rural sewage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 113-118 (in Chinese).
- [7] 王永才, 陈卫, 郑晓英, 等. 生物接触氧化法的同步硝化反硝化影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(7): 22-25.
WANG Yongcai, CHEN Wei, ZHENG Xiaoying, *et al.* Influencing factors of simultaneous nitrification and denitrification in biological contact oxidation process [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(7): 22-25 (in Chinese).
- [8] 黄伟平, 郎俊曜, 范志强, 等. 中低温改性聚氨酯填料移动床生物膜反应器深度脱氮研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(3): 83-88.
HUANG Weiping, LANG Junyao, FAN Zhiqiang, *et al.* Advanced nitrogen removal in moving bed biofilm reactor with modified polyurethane carrier at normal and low temperature [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(3): 83-88 (in Chinese).
- [9] 程贤良, 王宇晖, 宋新山, 等. 一种改性生物填料强化生活污水脱氮效果研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 222-230.
CHENG Xianliang, WANG Yuhui, SONG Xinshan, *et al.* A modified packing material filler enhanced biological nitrogen removal from domestic sewage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(1): 222-230 (in Chinese).
- [10] 丁仁伟. 曝气强化人工湿地深度处理污水厂尾水试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
DING Renwei. Experimental Study on Advanced

- Treatment of Tail Water from Wastewater Treatment Plant by Aeration Enhanced Constructed Wetland [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021 (in Chinese).
- [11] 韩文杰, 徐康康, 杨忠启, 等. 多级多段纯膜 MBBR 工艺的脱氮稳定性与微生物菌落结构分析 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3066-3078.
- HAN Wenjie, XU Kangkang, YANG Zhongqi, *et al.* Analysis of denitrification stability and microbial structure in multi-stage pure MBBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3066-3078 (in Chinese).
- [12] ZHANG H, WANG H, JIE M, *et al.* Performance and microbial communities of different biofilm membrane bioreactors with pre-anoxic tanks treating mariculture wastewater [J]. Bioresource Technology, 2020, 295: 122302.
- [13] WANG L, LI B, LI Y, *et al.* Enhanced biological nitrogen removal under low dissolved oxygen in an anaerobic-anoxic-oxic system: kinetics, stoichiometry and microbial community [J]. Chemosphere, 2021, 263: 128184.
- [14] XIA L, LI X, FAN W, *et al.* Denitrification performance and microbial community of bioreactor packed with PHBV/PLA/rice hulls composite [J]. Science of the Total Environment, 2022, 803: 150033.
- [15] 王永磊, 刘宇雷, 王尚, 等. A²O 生物膜工艺强化生物脱氮和污泥减量研究 [J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 72-76.
- WANG Yonglei, LIU Yulei, WANG Shang, *et al.* Enhanced biological nitrogen removal and sludge reduction by A²O biofilm process [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(3): 72-76 (in Chinese).
- [16] DAIMS H, WAGNER M. *Nitrospira* [J]. Trends in Microbiology, 2018, 26(5): 462-463.
- [17] DE ALMEIDA FERNANDES L, PEREIRA A D, LEAL C D, *et al.* Effect of temperature on microbial diversity and nitrogen removal performance of an anammox reactor treating anaerobically pretreated municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 208-219.
- [18] ZHOU H, XU G. Biofilm characteristics, microbial community structure and function of an up-flow anaerobic filter-biological aerated filter (UAF-BAF) driven by COD/N ratio [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134422.
- [19] ZHEN J Y, ZHAO Y Y, YU X F, *et al.* Feasibility of partial nitrification combined with nitrite-denitrification phosphorus removal and simultaneous nitrification-endogenous denitrification for synchronous chemical oxygen demand, nitrogen, and phosphorus removal [J]. ACS ES&T Water, 2022, 2(6): 1119-1131.

作者简介: 郑照勇(1997-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术。

E-mail: zzy183981407@163.com

收稿日期: 2024-01-25

修回日期: 2024-02-29

(编辑: 刘贵春)

加强生态保护和修复,
提升生态系统多样性、稳定性、持续性