

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.012

植物-固定生物膜/活性污泥工艺处理污水效能评价

梁仁礼, 胡勇有, 梁东辉, 陈祖浩
(华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 以分别采用植物-固定生物膜/活性污泥(P-IFAS)工艺和传统AAO工艺的两座污水处理厂为研究对象,评估P-IFAS工艺的处理效能。长期运行数据显示,P-IFAS工艺对COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的平均去除率分别达到91.30%、60.88%、95.31%和91.66%,其中TN去除率较AAO工艺提升9.10个百分点。工艺沿程分析发现,AAO与P-IFAS工艺均以好氧硝化-缺氧反硝化为主要脱氮路径,但P-IFAS工艺好氧区呈现明显的同步硝化反硝化特征,其对TN的去除率达到15.01%,显著优于AAO工艺(5.07%)。微生物群落分析表明,填料与植物根系的引入并未改变系统中优势菌群的种类组成,但其丰度发生了明显变化,具体表现为Betaproteobacteria、Gammaproteobacteria和Planctomycetia等关键功能菌群的富集。进一步的功能基因解析显示,P-IFAS工艺中反硝化基因的丰度较高,说明其硝酸盐还原与亚硝酸盐转化能力得到增强。此外,*norB*和*nosZ*基因的富集反映出P-IFAS工艺更倾向于将氮转化为 N_2 ,减少了温室气体(N_2O)的生成与积累。

关键词: 植物-固定生物膜/活性污泥(P-IFAS)工艺; 脱氮除磷; 微生物群落结构; 功能基因; 经济性评价

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2026)15-0082-08

Evaluation of Performance of Plant-Integrated Fixed-film Activated Sludge Process for Wastewater Treatment

Liang Renli, Hu Yongyou, Liang Donghui, Chen Zuhao

(School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study evaluated the treatment performance of the plant-integrated fixed-film activated sludge (P-IFAS) process by comparing it with a conventional AAO process at two municipal wastewater treatment plants. Long-term operational data showed that the P-IFAS process achieved average removal rates of 91.30% for COD, 60.88% for TN, 95.31% for $\text{NH}_3\text{-N}$, and 91.66% for TP, with the TN removal rate being 9.10 percentage points higher than that of the AAO process. Profile analysis along the treatment process revealed that both the AAO and P-IFAS processes followed the main nitrogen removal pathway of aerobic nitrification-anoxic denitrification; however, the aerobic zone of the P-IFAS process exhibited pronounced simultaneous nitrification and denitrification (SND), achieving a TN removal rate of 15.01%, which was significantly superior to that of the AAO process (5.07%). Microbial community analysis indicated that the introduction of carriers and plant roots did not alter the taxonomic composition of dominant microbial species in the system, but their relative abundances changed

通信作者: 胡勇有 E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn

considerably, specifically with the enrichment of key functional bacterial groups such as Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria, and Planctomycetia. Further functional gene analysis revealed that the P-IFAS process had higher abundances of denitrification-related genes, suggesting enhanced capacity for nitrate reduction and nitrite transformation. Additionally, the enrichment of *norB* and *nosZ* genes indicated that the P-IFAS process was more inclined to convert nitrogen into N_2 , thereby reducing the generation and accumulation of greenhouse gas (N_2O).

Keywords: plant-integrated fixed-film activated sludge (P-IFAS) process; nitrogen and phosphorus removal; microbial community structure; functional gene; economic evaluation

固定生物膜-活性污泥(IFAS)工艺将固定载体作为生物膜生长的介质,并与活性污泥系统相结合,兼具生物膜法和活性污泥法的优点,可大幅度提高生物量,降低污泥负荷率,增加系统的耐冲击负荷能力,对有机物、氨氮和总磷均具有较好的去除效果,且污泥产量较低,近年来在污水处理厂的提标改造中受到广泛青睐^[1-4]。为了进一步增加系统的生物量和发挥景观效应,研究者在IFAS工艺中融入复合生态处理单元,形成植物-固定生物膜/活性污泥(P-IFAS)工艺。该工艺通过植物代谢、生物膜吸附和微生物降解等协同机制,强化系统的去碳脱氮除磷效能。此外,P-IFAS工艺还可通过水生植物除臭及减少二氧化碳的排放。

本文选取广东某市分别采用P-IFAS工艺和AAO工艺的两座生活污水处理厂为研究对象,通过为期1年的水质监测,系统评估两套系统的运行效

能及稳定性,考察各处理单元对污染物去除的贡献差异。同时,分析两种工艺的微生物群落结构特征和功能基因丰度,探讨两种工艺在脱氮机制上的差异。此外,采用多参数综合比较方法,对P-IFAS工艺的经济性进行评估,旨在为该工艺的优化应用与推广提供科学依据和技术支撑。

1 污水处理厂概况

P-IFAS工艺污水处理厂设计规模为 4.0×10^4 m³/d,占地2.66 hm²;采用2组并联的P-IFAS生化池,单座有效容积为6550 m³,按AAO流程布置[见图1(a)],总水力停留时间(HRT)为7.86 h,其中厌氧区、缺氧区和好氧区的HRT分别为0.90、2.16、4.80 h;污泥回流比为50%,硝化液回流比为50%~100%;好氧池内填充756组填料,池顶采用不锈钢挂篮种植美人蕉、菖蒲、散尾葵等植物725 m²,植物根系浸没水中。

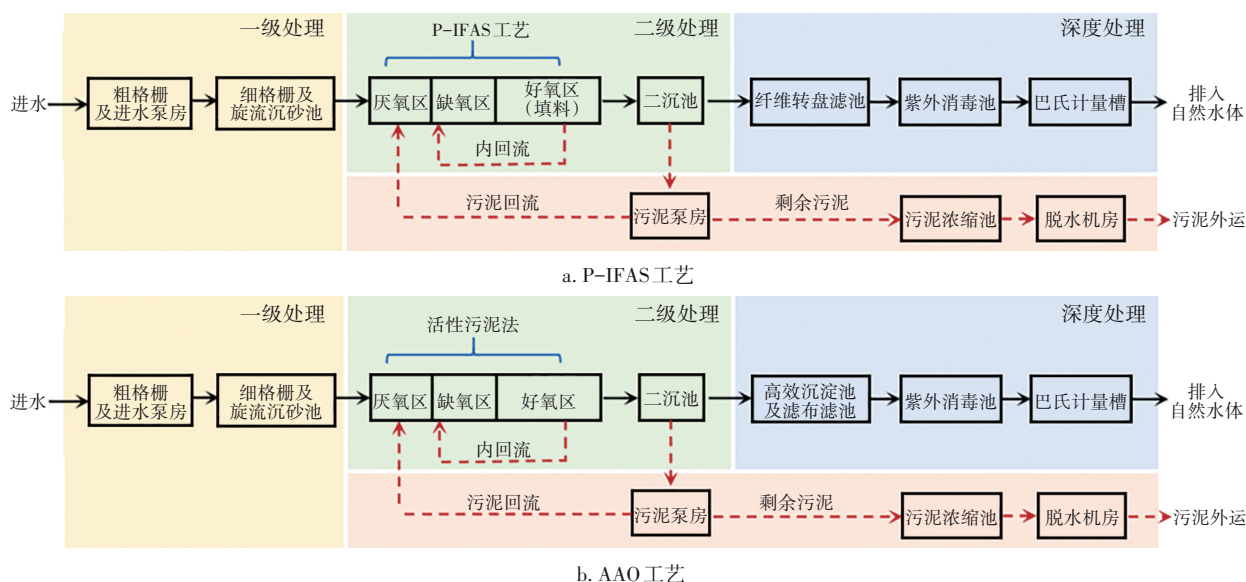


图1 P-IFAS工艺和AAO工艺污水处理厂流程

Fig.1 Process flow diagrams of P-IFAS and AAO wastewater treatment plants

作为对照,同一城市采用传统AAO工艺的污水处理厂设计规模为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地 3.45 hm^2 。该厂同样设置2组并联的AAO生化池,单座有效容积为 $11\,979 \text{ m}^3$,总HRT为 11.5 h ,其中厌氧区、缺氧区和好氧区的HRT分别为 1.5 、 3.5 、 6.5 h ,污泥回流比和硝化液回流比分别为 $50\% \sim 100\%$ 、 $100\% \sim 400\%$,具体工艺流程如图1(b)所示。

2023年P-IFAS工艺污水厂实际处理水量的日均值为 $4.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,峰值则达到 $4.98 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。进水为典型的低浓度生活污水,COD均值 $<200 \text{ mg/L}$ 、 BOD_5 均值 $<100 \text{ mg/L}$,水质呈现“一高两低”特征,即波动幅度较大、低浓度、低碳氮比;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标准和广东省《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准的较严值。AAO工艺污水厂实际处理水量的日均值为 $4.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,峰值为 $6.59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其进水水质特征与P-IFAS工艺污水处理厂基本一致,出水排放标准亦相同。两座污水处理厂的进水水质及设计标准详见表1。

表1 2023年两座污水处理厂的进水水质及出水水质标准

Tab.1 Influent quality and effluent discharge standards of two wastewater treatment plants in 2023 mg/L

项目	COD	BOD_5	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
P-IFAS厂设计进水	250	150	35	30	4
P-IFAS厂实际进水	189.96	94.69	25.21	23.01	3.28
AAO厂设计进水	240	120	30	25	3
AAO厂实际进水	122.10	54.46	19.63	15.12	2.04
两厂设计出水	≤ 40	≤ 10	≤ 15	≤ 5	≤ 0.5

2 材料与方法

2.1 样品采集及检测方法

供试水样分别取自污水厂入水井、厌氧区、缺氧区、好氧区中段及生化池出水口等。COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP等指标均采用国家标准方法测定。

为了解析工艺的微生物学机制,采集P-IFAS污水处理厂好氧区、缺氧区、厌氧区活性污泥样品以及填料和植物根系生物膜样品,分别记作XH、XQ、XY、XT、XG;同时采集AAO污水处理厂好氧区、缺氧区、厌氧区活性污泥样品(分别记作JH、JQ、JY)作为对照。样品委托上海派森诺生物科技有限公司采用Illumina MiSeq平台进行高通量测序,测序数据

在Genescloud在线平台完成分类学分析。

2.2 评价方法

2.2.1 数据来源

以两座污水处理厂2023年全年运行数据为基础,共获取进、出水水样离线检测数据1460组,以及全年运行参数、污泥产量、电耗等数据。

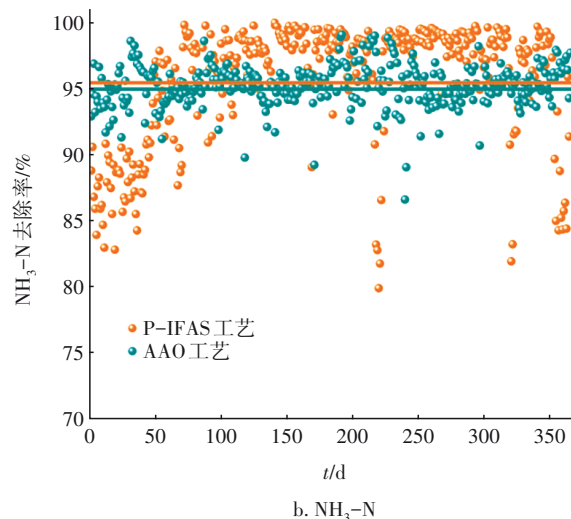
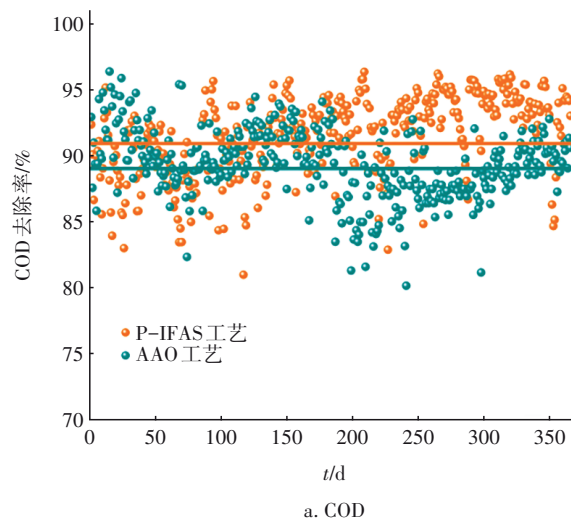
2.2.2 运行经济性评价方法

采用多参数综合比较方法对污泥产量、电耗等经济性数据进行统计分析。

3 结果与讨论

3.1 污水厂去碳、脱氮与除磷综合效能对比

两座污水处理厂全年去碳、脱氮与除磷效能对比情况如图2所示。P-IFAS工艺对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的年均去除率分别为91.30%、95.31%、60.88%和91.66%,而AAO工艺分别为89.70%、95.26%、51.78%和85.21%。



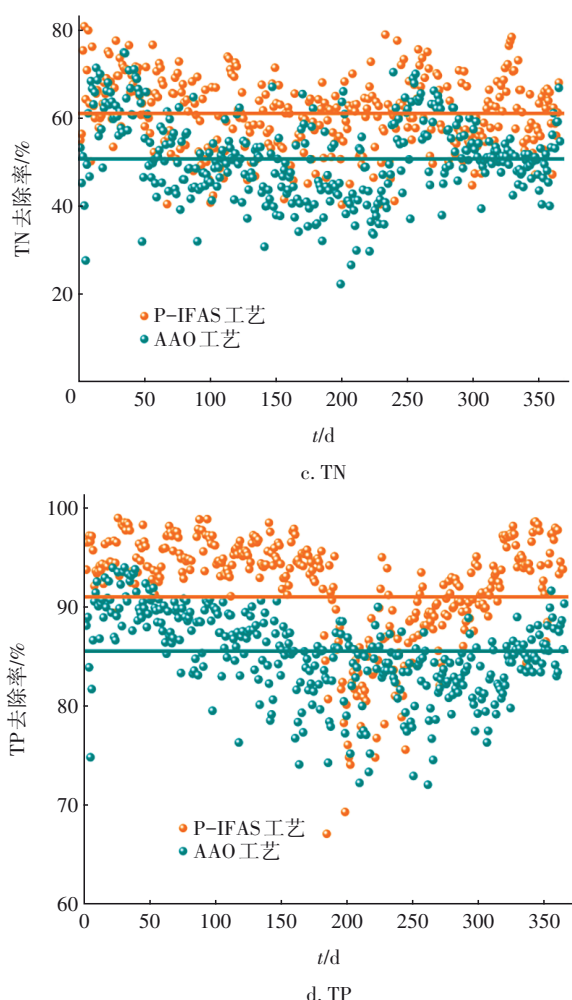


图2 P-IFAS和AAO工艺对污染物的去除效果

Fig.2 Removal efficiencies of pollutants by P-IFAS and AAO processes

两个系统在污水处理中均表现出良好的综合效能,但是P-IFAS整体效能更优,在脱氮方面优势明显,TN去除率提升了9.10个百分点。在运行负荷方面,P-IFAS工艺的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP负荷分别为0.630、0.077、0.084和0.011 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,分别为AAO工艺的2.52、2.48、2.05和2.75倍。以上说明P-IFAS系统在更高进水负荷下展现出更优且稳定的污染物去除能力。这种效能优势主要归因于P-IFAS系统中“活性污泥-固定生物膜-植物根系”三相协同作用的发挥。填料上附着的生物膜不仅提升了微生物总量与菌群多样性,其内部形成的缺氧/厌氧微环境还可促进好氧区的同步硝化反硝化(SND)作用,从而显著强化脱氮过程;同时,植物根系及其附着的生物膜进一步增强系统对有机物的吸附代谢能力^[5],并为聚磷菌提供高比表面积的

附着界面,再结合植物自身的吸收作用,构建“微生物-植物”协同除磷路径^[6]。值得指出的是,P-IFAS工艺对TN的去除率仍有提升空间,这可能与进水碳源不足及缺氧区水力停留时间较短有关,未来可通过补充碳源或运行调控进一步优化。

3.2 P-IFAS工艺沿程处理效果

为探究P-IFAS和AAO工艺的污染物去除路径与机制差异,在工艺沿程关键点位进行采样分析。

对于P-IFAS工艺,进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度均值分别为159.39、22.06、26.16和2.83 mg/L 。厌氧区对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率分别为29.49%、16.52%和12.67%;经缺氧区处理后,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN进一步分别被去除21.79%、6.71%和38.21%;好氧区对污染物的去除作用最为突出,其中对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率分别达到39.95%、70.85%和15.01%。TP浓度在厌氧区由2.83 mg/L 升至5.25 mg/L ,随后在好氧区中逐步降至0.84 mg/L 。在缺氧区, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度由2.41 mg/L 降至1.46 mg/L ,进入好氧区后逐步回升至4.96 mg/L 。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 全程稳定在0.20 mg/L 以下,未出现积累。系统最终出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度均值分别为17.94、2.04、9.60和0.82 mg/L ,总去除率分别为88.74%、90.75%、63.30%和71.02%。

对于AAO工艺,进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度均值分别为121.58、15.63、19.58和2.09 mg/L 。厌氧区对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率分别为31.02%、16.64%和11.88%,缺氧区的去除率分别为31.13%、10.09%和35.42%,好氧区的去除率分别为24.71%、67.47%、5.07%。TP在厌氧区由2.09 mg/L 升至4.91 mg/L ,在好氧区降至0.94 mg/L 。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度经缺氧区反硝化作用由4.41 mg/L 降至2.46 mg/L ,再经好氧区硝化作用上升至6.86 mg/L ; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度全程稳定在0.30 mg/L 以下。系统最终出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度均值分别为14.28、0.75、9.60和0.86 mg/L ,总去除率分别为88.25%、95.20%、50.97%和58.85%。

从上述数据可以看出,两种工艺均呈现典型的厌氧释磷、缺氧反硝化及好氧硝化/吸磷规律,但脱氮主导路径存在显著差异。AAO工艺缺氧区对TN的去除贡献显著(35.42%),但好氧区对TN几乎无去除(5.07%),显示其脱氮高度依赖前置缺氧区的传统反硝化路径。与之对比,P-IFAS工艺中好氧区

对TN的去除率高达15.01%,推测填料生物膜内部发生了SND,成为其在更高进水负荷下实现更优TN去除效果的关键。同时,P-IFAS工艺中填料和植物根系形成的复合生物膜系统增加了生物量,且植物根系分泌的糖类和酸类物质可提升微生物活性,从而促进了氮、磷的协同高效去除^[7-8]。

3.3 沿程微生物群落结构特征

为了揭示P-IFAS工艺效能提升的微生物学机制,分别采集P-IFAS工艺厌氧区(XY)、缺氧区(XQ)、好氧区(XH)的活性污泥和好氧区生物膜(XT)、植物根系生物膜(XG)样品,以及AAO工艺厌氧区(JY)、缺氧区(JQ)、好氧区(JH)的活性污泥样品,进行了高通量测序分析。微生物群落在门水平和纲水平上的分布如图3所示。

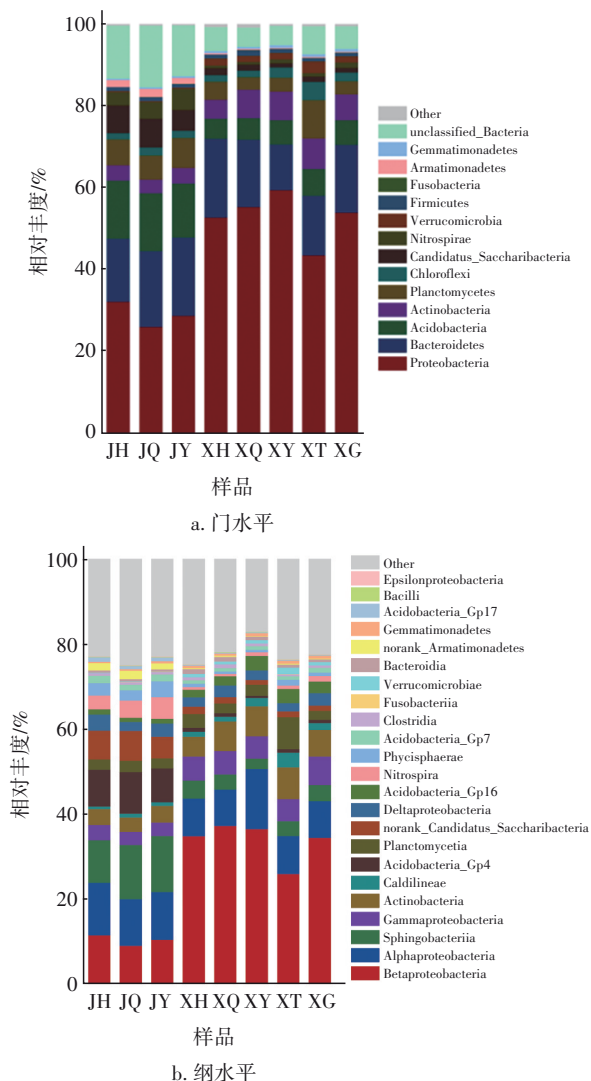


图3 P-IFAS工艺中的微生物群落结构

Fig.3 Microbial community structure in P-IFAS process

在门水平上,两种工艺的微生物结构组成相似,但优势菌门的相对丰度存在显著差异。变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)和浮霉菌门(Planctomycetes)在两个系统的所有样品中均占主导地位,这与常规污水生物处理系统的群落结构一致^[9-10]。上述菌门中包含大量参与碳、氮循环的功能菌群。值得关注的是,P-IFAS工艺中变形菌门的相对丰度(43.65%~55.40%)显著高于AAO工艺(26.16%~32.34%)。变形菌门是地球上功能最多样的菌群之一,在有机物降解、硝化、反硝化及磷的转化中均扮演核心角色^[11],其在P-IFAS系统中的富集,直观反映了生物填料与植物根系的投加对功能微生物群落的富集作用,为系统承受更高的污染物负荷、实现更优综合处理效能提供了微生物学基础。

在纲水平上,两种工艺的群落结构呈现出更清晰的功能分化。两个系统中丰度较高的菌纲均包括 β -变形菌纲(Betaproteobacteria)、 α -变形菌纲(Alphaproteobacteria)、 γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)、鞘脂杆菌纲(Sphingobacteriia)和放线菌纲(Actinobacteria)。在P-IFAS工艺中, β -变形菌纲(25.94%~37.26%)、 γ -变形菌纲(5.19%~6.71%)和放线菌纲(4.65%~7.46%)的丰度明显更高。其中 β -变形菌纲和 γ -变形菌纲广泛参与有机物降解、反硝化以及硫循环^[12]。放线菌纲的富集可能与难降解有机物的分解以及系统生物稳定性的增强有关^[13]。

值得注意的是,浮霉菌纲(Planctomycetia)在填料生物膜(XT)中的丰度高达7.45%,远高于其他样品。该菌纲包含具有厌氧氨氧化(Anammox)和反硝化功能的菌种,其在填料表面的特异性富集,印证了生物膜内部存在强化脱氮的独特微环境。相比之下,AAO工艺中鞘脂杆菌纲(9.97%~13.14%)和硝化螺旋菌纲(Nitrospira, 3.22%~5.12%)的丰度更高。前者擅长降解复杂有机物,后者则是将亚硝酸盐氧化为硝酸盐的关键硝化菌^[14],这与AAO工艺依赖传统硝化-反硝化路径的特征相符。

综上所述,生物填料和挺水植物的引入,并未根本改变微生物群落的种类构成,但通过提供多样化的栖息载体(悬浮污泥、固定生物膜、根系表面),显著调控并富集了具有特定代谢功能的关键菌群。P-IFAS系统形成了以高丰度变形菌门为核心,反硝

化菌、放线菌及浮霉菌等多功能菌群协同富集的群落结构。这种“功能互补型”的群落构架,与其“活性污泥-生物膜-植物”多相协同的物理结构相匹配,从微生物学层面解释了该系统能够在更高负荷下实现同步硝化反硝化并提升脱氮除磷综合效能的内在原因。

3.4 关键功能基因检测

为进一步解析P-IFAS工艺与AAO工艺在氮转化机制上的差异,对两种工艺中关键氮代谢功能基因进行了定量分析。这些基因涵盖硝化过程(包括氨单加氧酶基因 $amoA$ 、 $amoB$ 、 $amoC$ 及羟胺氧化酶基因 hao 等)^[15]和反硝化过程(涉及硝酸盐还原酶基因 $narG$ 、 $napH$ 、 $napG$,亚硝酸盐还原酶基因 $nirA$ 、 $nirB$ 、 $nirS$,一氧化氮还原酶基因 $norB$,以及一氧化二

氮还原酶基因 $nosZ$ 等)^[16]。

基因检测结果显示,P-IFAS与AAO工艺系统均具备完整的硝化反硝化代谢途径。硝化相关功能基因($amoA$ 、 $amoB$ 、 $amoC$ 、 hao 等)在P-IFAS与AAO工艺中的丰度相当,表明生物填料和植物的添加并未显著提升系统的硝化能力,即硝化过程主要依赖活性污泥中的功能菌群。两个系统中亚硝化基因($nirA$ 、 $nirB$ 、 $nirD$ 、 $nirC$ 、 $nirK$)及部分反硝化基因($narG$ 、 $narH$ 、 $napA$)均以较高丰度检出,且丰度水平在两个系统间无明显差异,表明两个系统均具备完整的亚硝酸盐转化途径,能够及时将亚硝酸盐还原,避免其出现积累。值得注意的是,P-IFAS工艺中多种反硝化基因的丰度显著高于AAO工艺,具体如图4所示。

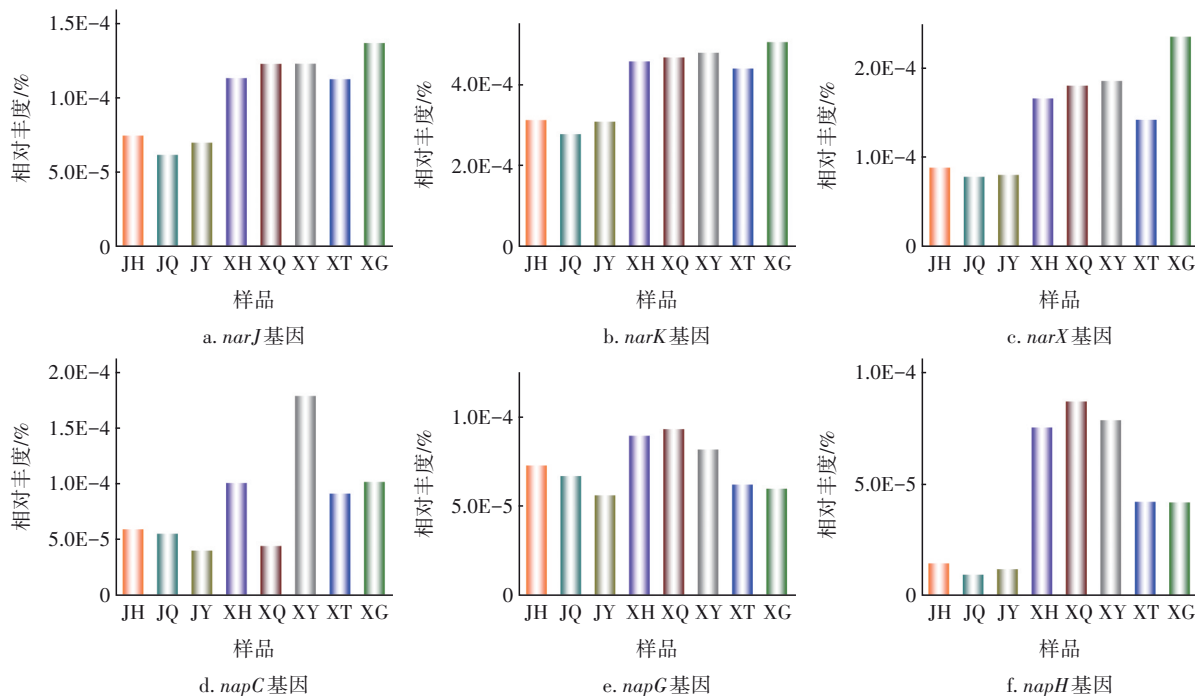


图4 部分氮代谢相关基因的相对丰度

Fig.4 Relative abundances of selected nitrogen metabolism genes

从图4可以看出, $narJ$ 基因在P-IFAS工艺各分区中的丰度为AAO工艺的1.21~2.00倍,而 $narX$ 基因的富集则更为显著,达到AAO工艺的1.42~2.33倍; $napH$ 基因的丰度升幅最大,达到AAO工艺的3.64~9.66倍,而 $napG$ 的丰度则相对稳定,为AAO工艺的1.11~1.46倍。此外, $napC$ 基因在P-IFAS系统中各分区的丰度差异显著,为AAO工艺的0.80~4.52倍。上述差异表明,P-IFAS工艺中反硝化功能基因(如 $narJ$ 、 $narX$ 、 $napC$ 、 $napG$ 、 $napH$)的显

著富集,直接强化了该工艺的反硝化能力。其中, $napC$ 、 $napG$ 和 $napH$ 基因的高丰度进一步证实,P-IFAS工艺好氧区中存在活跃硝酸盐还原过程,为SND提供了关键底物。这一机制使得P-IFAS工艺能够在好氧条件下高效完成氮素转化,表现出更高的脱氮效能,并有效抑制硝酸盐氮的积累。另外, $norB$ 及 $nosZ$ 在P-IFAS工艺中的丰度也均高于AAO工艺,这类基因的富集意味着反硝化过程更趋向于完全还原为 N_2 ,有助于减少温室气体 N_2O 的排放,提升

了脱氮过程的环保性与彻底性^[17]。

上述功能基因分析从分子水平揭示了P-IFAS工艺强化脱氮的内在机制,即在维持与AAO工艺相当的硝化能力的同时,通过“填料-植物根系”复合载体显著富集反硝化功能基因(尤其是与周质硝酸盐还原相关的*nap*基因簇),强化好氧区的同步硝化反硝化能力,促进氮元素向 N_2 彻底转化,为P-IFAS工艺在承受更高氮负荷下实现更优的脱氮效能提供了直接的遗传学证据。

3.5 P-IFAS工艺经济性评价

对P-IFAS工艺与AAO工艺污水处理厂的经济性评价表明,两者在能耗及剩余污泥产量方面存在显著差异。两种工艺处理单位污水的电耗水平相当,分别为 0.220 、 $0.221 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,均优于行业标准($0.28 \sim 0.40 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)^[18];但在去除单位COD的平均电耗方面,P-IFAS工艺为 $1.52 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$,较AAO工艺($2.37 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$)节约35.86%,节能效果明显。同时,P-IFAS工艺的单位产泥量平均为 $0.046 \text{ kg}/\text{m}^3$,较AAO工艺($0.075 \text{ kg}/\text{m}^3$)减少38.67%,污泥减量优势突出。

4 结论

① 在进水污染物负荷是AAO工艺2倍以上的条件下,P-IFAS工艺对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的全年平均去除率分别达到91.30%、95.31%、60.88%和91.66%,处理效能整体优于AAO工艺,其中脱氮方面优势尤为明显。

② P-IFAS工艺好氧区在维持高效硝化的同时,通过“填料-植物根系”生物膜形成的微环境,实现了显著的同步硝化反硝化,该区对TN的去除率达到15.01%,强化了脱氮路径,提升了反硝化效能。

③ P-IFAS系统富集了更高丰度的变形菌门(Proteobacteria)及Betaproteobacteria等反硝化相关的关键菌群,强化了脱氮能力。系统中反硝化途径基因(如*napH*、*narX*等)的丰度显著高于AAO工艺,而且一氧化二氮还原酶基因(*nosZ*)的高表达表明P-IFAS系统更趋向于将氮转化为 N_2 ,减少了温室气体 N_2O 的生成与排放。

④ 相比AAO工艺,P-IFAS工艺在节能降耗与污泥减量方面具备双重优势,去除单位COD的电耗可降低35.86%,单位产泥量可减少38.67%。

参考文献:

- [1] Waqas S, Bilal M R, Man Z, et al. Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110718.
- [2] 张妍,杨慎华,段羽佳,等. A^2O -IFAS工艺生物膜微生物群落的演替及分布特性[J]. 环境科学, 2022, 42(4): 18-25.
Zhang Yan, Yang Shenhua, Duan Yujia, et al. The colonization, succession and distribution characteristics of microbial community in biofilm of the mainstream A^2O process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 18-25 (in Chinese).
- [3] Kim H S, Schuler A J, Gunsch C K, et al. Comparison of conventional and integrated fixed-film activated sludge systems: attached- and suspended-growth functions and quantitative polymerase chain reaction measurements [J]. Water Environment Research, 2011, 83(7): 627-635.
- [4] 宋相通,徐祖武,董滨. 固定生物膜-活性污泥脱氮工艺研究进展与应用[J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 29-33.
Song Xiangtong, Xu Zuwu, Dong Bin. Research progress and application of fixed biofilm activated sludge process for nitrogen removal [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(2): 29-33 (in Chinese).
- [5] 王学华,沈耀良,张娜,等. 季节变化对人工湿地与生态塘组合工艺脱氮除磷性能影响[J]. 环境工程, 2014, 32(6): 20-23.
Wang Xuehua, Shen Yaoliang, Zhang Na, et al. The effects of seasonal change on biological nutrient removal in combined process of constructed wetland and ecological pond [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(6): 20-23 (in Chinese).
- [6] 刘永,张诗涵,肖雅元,等. 红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1788-1799.
Liu Yong, Zhang Shiha, Xiao Yayuan, et al. Efficiency of mangrove wetlands in nitrogen and phosphorus removal from wastewater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1788-1799 (in Chinese).
- [7] 彭剑峰,王宝贞,南军,等. 多级生态塘/湿地系统底泥中磷的归趋模式[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 712-716.
Peng Jianfeng, Wang Baozhen, Nan Jun, et al.

- Transferring and attribution model of phosphorus in the multi-stage eco-ponds/wetlands system sediment [J]. China Environmental Science, 2004, 24(6): 712-716 (in Chinese).
- [8] Westholm L J. Substates for phosphorus removal: potential benefits for on-site wastewater treatment [J]. Water Research, 2006, 40(1): 23-36.
- [9] Kim H S, Lee S H, Jo H Y, et al. Diversity and composition of soil *Acidobacteria* and *Proteobacteria* communities as a bacterial indicator of past land-use change from forest to farmland [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797: 148944.
- [10] Sha H Q, Liu Z H, Sun Y, et al. Leachate leakage enhances the microbial diversity and richness but decreases *Proteobacteria* and weakens stable microbial ecosystem in landfill groundwater [J]. Water Research, 2023, 243: 120321.
- [11] Pan D D, Shao S C, Zhong J F, et al. Performance and mechanism of simultaneous nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal in long-term moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Bioresource Technology, 2022, 348: 126726.
- [12] Zhang L, Fan J, Nguyen H N, et al. Effect of cadmium on the performance of partial nitrification using sequencing batch reactor [J]. Chemosphere, 2019, 222: 913-922.
- [13] He T, Guan W, Luan Z Y, et al. Spatiotemporal variation of bacterial and archaeal communities in a pilot-scale constructed wetland for surface water treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100: 1479-1488.
- [14] 闵文慧, 石亮亮, 委燕, 等. 羟胺对短程硝化的促进及硝化微生物的差异化响应 [J]. 工业水处理, 2025, 45(12): 74-80.
- Min Wenhui, Shi Liangliang, Wei Yan, et al. Promotion of partial nitrification by hydroxylamine and differential responses of nitrifying microorganisms [J]. Industrial Water Treatment, 2025, 45(12): 74-80 (in Chinese).
- [15] Feng Y, Zhao Y P, Guo Y Z, et al. Microbial transcript and metabolome analysis uncover discrepant metabolic pathways in autotrophic and mixotrophic anammox consortia [J]. Water Research, 2018, 128: 402-411.
- [16] Song D, Liu C, Sun Z, et al. Tailoring the distribution of microbial communities and gene expressions to achieve integrating nitrogen transformation in a gravity-driven submerged membrane bioreactor [J]. Water Research, 2020, 187: 116382.
- [17] Lei X, Jia Y, Chen Y, et al. Simultaneous nitrification and denitrification without nitrite accumulation by a novel isolated *Ochrobactrum anthropic* LJ81 [J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 442-450.
- [18] 建标 198—2022 城市污水处理工程项目建设标准 [S]. Construction standards 198—2022 Construction standards for urban sewage treatment engineering projects [S] (in Chinese).
- 作者简介: 梁仁礼 (1979—), 男, 广东开平人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水污染控制技术应用。
E-mail: yeslrl@126.com
收稿日期: 2025-01-17
修回日期: 2025-03-26

(编辑: 刘贵春)

用生命之水, 筑美丽中国