

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.010

# IFAS工艺用于污水处理厂提标改造的运行效果分析

戴杨叶<sup>1</sup>, 朱健<sup>1</sup>, 商佳吉<sup>2</sup>, 薛艳<sup>1</sup>, 张大鹏<sup>2</sup>, 卞小锋<sup>3</sup>,  
洪士杰<sup>1</sup>

(1. 上海市净化技术装备成套有限公司, 上海 200120; 2. 上海市机械设备成套<集团>有限公司, 上海 200060; 3. 亚同环保水处理江阴有限公司, 江苏 无锡 214423)

**摘要:** 某污水处理厂采用固定生物膜-活性污泥(IFAS)工艺对原有的AAO工艺进行强化脱氮处理(投加固定填料),出水水质执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放标准》(DB 32/1072—2018)中表2标准。对提标改造后的运行效果进行分析,并分别测定活性污泥和生物膜的硝化和反硝化效能,发现好氧池中填料表面生物膜的硝化速率是活性污泥的1.71倍,表明投加固定填料后硝化能力显著提高。采用Illumina MiSeq高通量测序技术分析系统中的微生物群落结构,发现在门水平上主要富集了Proteobacteria、Bacteroidota、Actinobacteria及Chloroflexi,在属水平上主要富集了Thauera、Ferruginibacter、Thermomonas、Rhodobacter、norank\_f\_Caldilineaceae和norank\_f\_Saprospiraceae。对污泥进行微生物菌群LEfSe线性判别分析,发现填料表面生物膜内富集了大量脱氮功能菌,固定填料强化了硝化和反硝化作用。

**关键词:** 提标改造; 填料; 固定生物膜-活性污泥工艺; 生物脱氮; 微生物菌群

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0066-07

## Operation Effect of IFAS Process in Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plant

DAI Yang-ye<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, SHANG Jia-ji<sup>2</sup>, XUE Yan<sup>1</sup>, ZHANG Da-peng<sup>2</sup>,  
BIAN Xiao-feng<sup>3</sup>, HONG Shi-jie<sup>1</sup>

(1. Shanghai Purification Technology Equipment Co. Ltd., Shanghai 200120, China;  
2. Shanghai Machinery Equipment <Group> Co. Ltd., Shanghai 200060, China; 3. Yatong  
Environmental Protection Water Treatment Jiangyin Co. Ltd., Wuxi 214423, China)

**Abstract:** Fixed biofilm-activated sludge (IFAS) process was applied to strengthen nitrogen removal of the original AAO process in a wastewater treatment plant. The effluent quality reached the criteria specified in the *Discharge Standard of Main Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant & Key Industries of Taihu Area* (DB 32/1072-2018). The operation effect after the upgrading and reconstruction was analyzed, and the nitrification and denitrification efficiencies of activated sludge and biofilm were measured respectively. It was found that the nitrification rate of biofilm on the surface of the filler in the aerobic tank was 1.71 times of activated sludge, indicating that the nitrification capacity was significantly improved after the addition of fixed filler. The microbial community of the system was analyzed by Illumina MiSeq high-throughput sequencing technology. *Proteobacteria*, *Bacteroidota*, *Actinobacteria* and *Chloroflexi* were mainly enriched at the phylum level, and *Thauera*, *Ferruginibacter*, *Thermomonas*, *Rhodobacter*, norank\_f\_Caldilineaceae and norank\_f\_Saprospiraceae were mainly

enriched at the genus level. The microbial community of sludge was analyzed by LEfSe linear discriminant analysis. It was found that a large number of nitrogen removal functional bacteria were enriched in the biofilm on the surface of the filler, and the fixed filler enhanced nitrification and denitrification.

**Key words:** upgrading and reconstruction; filler; fixed biofilm-activated sludge process; biological nitrogen removal; microbial community

为完成“十三五”太湖治理目标任务,2019年江苏省政府办公厅发布了《江苏省打好太湖治理攻坚战实施方案》,聚焦太湖氮磷污染突出问题,启动新一轮提标示范工程,执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)的要求,推动太湖流域水环境质量全面改善和水生态持续好转。近年来,江苏某污水厂进水COD、SS、TP波动剧烈,运行压力较大。针对污水厂出水水质要求提升及高峰期处理水量增加的问题,在原有基础上对其进行改造,重点强化系统的生物脱氮功能<sup>[1-3]</sup>。在处理相同污染负荷的条件下,于生化池增设生物填料有助于提高系统的同步硝化反硝化效率,增强系统的脱氮除磷性能,从而满足排放限值要求<sup>[4]</sup>。

此次提标改造采用了结合IFAS技术的AAO系统,以强化生物脱氮功能,特别是弥补冬季水温偏低时脱氮速率偏低、应对原水水质波动能力弱的不足。在AAO工艺中投加固定式填料,通过微生物在填料上富集形成生物膜/絮体混合系统,有效缓解生化系统运行压力,提高污泥龄,达到强化硝化的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 污水处理厂概况

该污水处理厂采用IFAS技术对常规AAO工艺进行改造,处理规模为7 500 m<sup>3</sup>/d。污水厂接纳印染、化纤、纺织等工业废水,占总水量的比例约为50%,其他为城镇生活污水,出水水质执行DB 32/1072—2018中表2标准。

设计进水COD、BOD<sub>5</sub>、SS、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP分别为500、200、400、40、30和8 mg/L,改造后的出水浓度需达到50、10、10、12(15,水温≤12℃时)、4(6,水温≤12℃时)、0.5 mg/L。

污水厂生化池设计MLSS为3 000 mg/L,厌氧区、缺氧区及好氧区HRT分别为1.0、2.0和9.8 h,

内回流比为100%~400%,外回流比为30%~100%,设计平均需氧量为3 408 kg/d(25℃)。投加固定填料600 m<sup>3</sup>,比表面积≥4 000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,负载生物量(填充比为20%)为2 000 mg/L。

### 1.2 硝化速率和反硝化速率的测定

硝化速率的测定:取1 L好氧池活性污泥(活性污泥+填料生物膜)于广口瓶中,投加NH<sub>4</sub>Cl作为氮源,保证NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N初始浓度在50 mg/L左右,加入NaHCO<sub>3</sub>作为缓冲剂,在20℃下进行充分曝气,每隔0.5 h取样测定NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度,并与时间进行线性拟合,所得直线斜率除以污泥浓度即为硝化速率<sup>[5]</sup>。

反硝化速率的测定:取1 L缺氧池活性污泥于广口瓶中,加入硝酸钾和乙酸钠使碳氮比在3:1左右,并保证足够的硝酸盐浓度(55 mg/L),在20℃下控制DO<0.50 mg/L,每隔10 min取样测定NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度,并与时间进行线性拟合,所得直线斜率除以污泥浓度即为反硝化速率<sup>[6]</sup>。

其他指标均采用国家标准方法测定。

### 1.3 微生物群落结构分析

取AAO系统中缺氧池、好氧池的活性污泥及好氧池的活性污泥+填料生物膜样品各100 mL,且每个池子分别取3个代表性样品,缺氧池、好氧池的活性污泥分别标记为A<sup>2</sup>OA和A<sup>2</sup>OO,好氧池的活性污泥+填料生物膜样品标记为A<sup>2</sup>O-IFAS,委托上海美吉生物医药科技有限公司进行Illumina MiSeq高通量测序,对数据进行OTU聚类分析和LEfSe线性判别分析,明确固定填料对系统中相关功能菌丰富度和多样性的强化效果<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 污染物去除性能

对2022年7月—2023年6月改造后的污水处理厂月均进、出水水质进行统计,进水COD为152.5 mg/L,出水COD为20.3 mg/L,去除率为86.72%;进水SS为103.6 mg/L,出水SS为5.1 mg/L,去除率为

95.07%,相比改造前无明显提升;进水  $\text{NH}_3\text{-N}$  为 27.7 mg/L 且存在不规律波动,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  为 1.3 mg/L,去除率为 95.46%;进水 TN 提高至 39.1 mg/L,出水 TN 为 8.0 mg/L,去除率为 79.56%;进水 TP 为 3.61 mg/L,出水 TP 为 0.21 mg/L,去除率为 94.29%,达到排放标准要求,且出水水质较稳定。

对采用 IFAS 技术改造前后同时期的处理效果进行了比较(见表 1),2019 年 11 月—2020 年 2 月进出水 COD、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 分别为 183.0、158.0、21.6、28.5、3.05 mg/L 和 23.6、4.5、2.9、10.1、0.34

mg/L,2022 年 11 月—2023 年 2 月的为 158.0、83.1、26.3、41.8、3.14 mg/L 和 20.0、5.3、2.7、9.8、0.27 mg/L。其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别由 86.57%、64.56%、88.85% 提高到 89.73%、76.56%、91.40%。这是因为经过 IFAS 技术改造后,污泥龄较长的硝化细菌在固定载体上富集,大大增加了硝化细菌的丰度,解决了与较短泥龄的除磷菌群的矛盾,有利于改善生物脱氮除磷效果。同时改造后生化池出水经过滤、消毒池等深度处理,可充分保证污水处理厂出水水质稳定达标。

表 1 污水处理厂实测月均进、出水水质

Tab.1 Measured monthly average influent and effluent quality of the wastewater treatment plant

mg·L<sup>-1</sup>

项目		COD		SS		$\text{NH}_3\text{-N}$		TN		TP	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
改造前	2019 年 9 月	421.6	40.8	221.9	3.6	26.2	0.83	30.6	10.5	6.48	0.17
	2019 年 10 月	372.2	36.9	311.2	5.6	28.5	1.02	32.9	11.5	8.36	0.20
	2019 年 11 月	187.6	29.2	201.6	5.2	22.9	0.60	27.8	8.7	2.81	0.32
	2019 年 12 月	200.4	28.5	179.6	4.6	20.7	2.80	28.5	10.9	3.03	0.36
	2020 年 1 月	157.5	17.0	172.4	4.1	20.2	3.20	25.4	9.6	3.26	0.30
	2020 年 2 月	186.3	19.6	78.2	4.1	22.4	4.90	32.3	11.0	3.11	0.36
	2020 年 3 月	224.2	31.8	212.9	4.5	24.0	2.61	35.9	9.9	9.60	0.23
	2020 年 4 月	240.7	22.0	176.3	4.2	29.3	0.89	41.1	11.6	9.62	0.26
	2020 年 5 月	239.3	23.7	270.9	3.5	30.6	0.35	35.8	10.0	5.36	0.21
	2020 年 6 月	185.9	27.6	320.2	5.8	33.1	0.31	42.1	13.0	4.69	0.22
	2020 年 7 月	440.5	38.0	156.2	6.5	26.7	0.73	38.2	12.4	4.71	0.26
改造后	2020 年 8 月	322.0	39.5	303.8	6.7	34.6	0.60	44.8	13.5	3.28	0.35
	2022 年 11 月	185.5	20.2	72.5	5.8	28.5	0.50	38.5	7.4	2.56	0.24
	2022 年 12 月	160.7	20.1	134.6	4.9	23.6	4.50	41.2	11.7	3.38	0.25
	2023 年 1 月	121.6	17.5	57.3	5.2	22.5	4.10	41.8	11.7	2.35	0.30
	2023 年 2 月	164.3	22.0	67.8	5.2	30.7	1.50	45.5	8.2	4.27	0.29

因污水厂规模较小,水质、水量受接管企业影响较大,特别是近几年受外部环境影响,印染、化纤、纺织企业规模及经营范围常有调整,导致水质、水量出现经常性波动。2019 年末由于受传统节日及疫情的影响,污水厂工业废水量明显减少,水质也呈现出浓度降低的趋势,进水氨氮及总氮浓度均处于全年低谷状态。春夏季有所回升,特别是出水总氮已接近标准限值,并且因为生化系统总氮脱除率较低,丝状菌膨胀未得到缓解,主要依靠后续折点加氯应急措施加以去除,成本高昂。提标改造后,进水氨氮和总氮一直维持在改造前期(2020 年 5 月—8 月)较高的水平,即使在进水水质波动很大的情况下,系统依然运行稳定,出水氨氮及总氮可以

稳定达标。

## 2.2 系统硝化及反硝化能力

在提标改造后的稳定运行期间,分别测定好氧池、缺氧池的硝化和反硝化速率。结果表明,好氧池活性污泥及好氧池活性污泥+填料的硝化速率分别为 1.59、2.72 mg/(g·h),对应的硝化能力分别为 76.52、130.90 mg/L,后者为前者的 1.71 倍,IFAS 系统的硝化能力得到显著提升,表明填料有效富集了硝化细菌,强化了硝化作用。缺氧池活性污泥的反硝化速率为 4.55 mg/(g·h),对应的反硝化能力为 112.61 mg/L,说明改造后的缺氧池污泥富集了较多反硝化菌,具有较强的反硝化能力。

因为未测定改造前的硝化和反硝化速率,因此

无法直接进行比较。戴杨叶等<sup>[1]</sup>对该污水厂在改造前及改造后稳定运行阶段的数据进行了一周的监测(改造前为2020年9月3日—9日,改造后为2021年6月5日—11日),厌氧池、缺氧池及好氧池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别由改造前的77.1%、2.8%和7.9%变为改造后的52.1%、-66.9%和111.8%,系统的平均去除率由87%增至97%;厌氧池、缺氧池及好氧池对TN的平均去除率分别由改造前的6.2%、-0.3%和26.8%变为改造后的23.9%、-0.1%和14.7%,系统的平均去除率由32%增至38%。可见,改造后好氧池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除起主要作用,而TN主要在缺氧池去除。投加填料后,好氧池的硝化能力得到明显提升,缺氧池的反硝化能力也得到一定程度的改善,但仍略显不足。

孙晓等<sup>[8]</sup>在上海某污水处理厂采用移动床生物膜反应器与传统厌氧/缺氧/好氧耦合工艺进行提标改造中,对 $\text{A}^2\text{O}$ -MBBR和 $\text{A}^2\text{O}$ 系统的硝化能力进行了测定,分别为169.00和46.20 mg/L,反硝化能力分别为52.70和47.40 mg/L,由此可知填料上富集了大量硝化菌,有利于硝化效能的提高,同时产生大量的硝酸盐氮也促进了污泥中反硝化菌的富集,强化了反硝化能力。

### 2.3 微生物种群分布

对AAO生化池活性污泥及填料表面生物膜进行镜检,结果如图1所示。

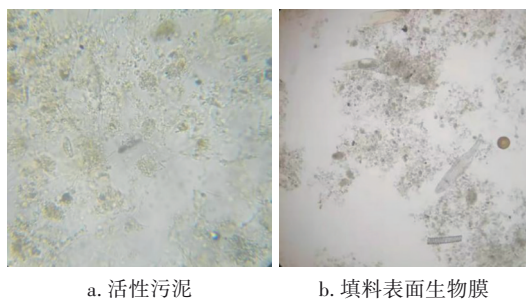


图1 生化池活性污泥及填料表面生物膜生物相镜检照片  
Fig.1 Bioscopic photos of activated sludge and biofilm on the surface of filler in biochemical tank

从镜检照片可以看出活性污泥中丝状菌数量偏多,呈现轻微至中等程度的膨胀现象;而IFAS填料表面挂膜情况良好,菌群丰富多样,可明显观察到钟虫、轮虫等原生动物和后生动物,以及大片的絮体。这是由于填料具有较大的比表面积,吸附活性微絮体的能力较强,从而能够大大提高絮体浓

度,增加絮体碰撞几率,填料表面吸附、累积的活性絮体与原水中脱稳的胶体颗粒相接触,起到了接触絮凝的作用。填料表面的吸附层可以不断更新,在吸附与脱落的动态平衡中始终保持较好的活性。

为进一步从微观层面探究固定载体对脱氮除磷效果的提升作用,采集缺氧池、好氧池的活性污泥及填料上的生物膜样品进行高通量测序,得到优势微生物组成如图2所示。

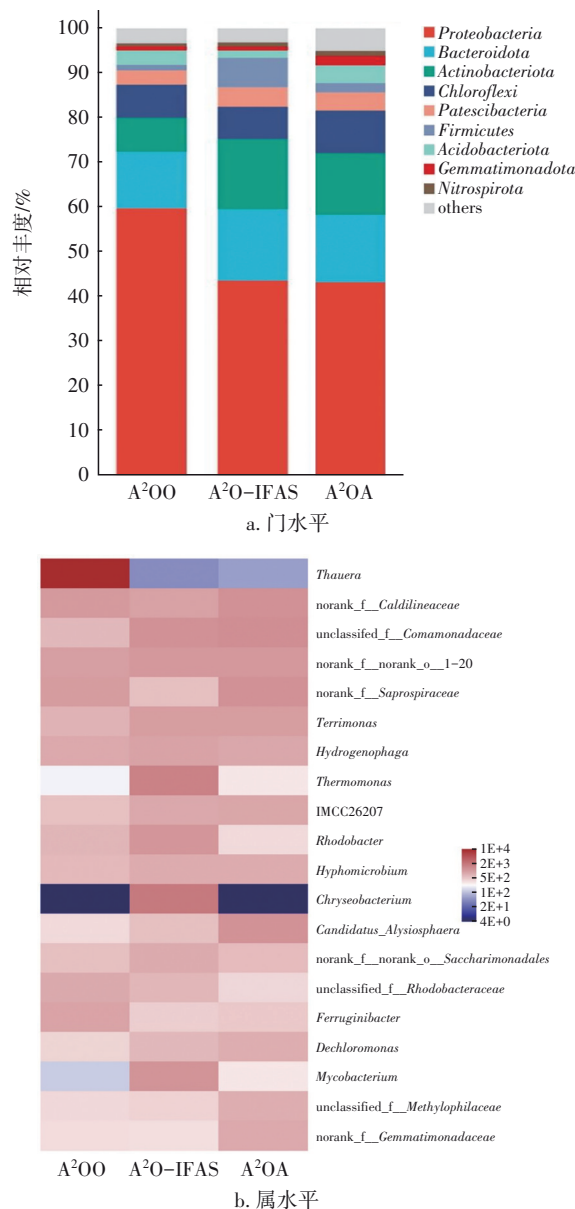


图2 不同样品在门水平和属水平上的微生物菌群分布  
Fig.2 Microbial community distribution of different samples at phylum and genus levels

由图2(a)可以看出,活性污泥中的优势菌群主要包括 *Proteobacteria*、*Bacteroidota*、*Actinobacteriota*



及 *Chloroflexi*, 其中 *Proteobacteria* 的主要作用是去除有机物和脱氮除磷, 因此其在好氧池活性污泥中的相对丰度高达 59.8%, 而在好氧池活性污泥+填料及缺氧池活性污泥中分别占 43.7% 和 43.3%, 说明生化池进水中易降解有机物在前期被迅速降解去除<sup>[9]</sup>。填料及缺氧池活性污泥样品中 *Bacteroidota* 和 *Actinobacteria* 的相对丰度相比好氧池活性污泥更高, 说明固定填料提高了脱氮相关微生物的丰度, 有利于硝化和反硝化过程的进行<sup>[10-11]</sup>。

进一步在属水平上进行分析可知, 好氧池活性污泥中 *Thauera* 及 *Ferruginibacter* 的相对丰度较高, 有利于硝化反应的进行<sup>[12-13]</sup>; 填料上最主要的属包括 *Thermomonas*、*Rhodobacter*、*Chryseobacterium*、*Mycobacterium*, 其中 *Thermomonas* 和 *Rhodobacter* 属于异养反硝化微生物, 可促进水中氨氮及硝酸盐氮的去除, 而 *Chryseobacterium* 在塑料微环境中含量较丰富, *Mycobacterium* 则是放线菌的一种, 有利于微生物在填料表面附着生长<sup>[14-15]</sup>。缺氧池活性污泥中 *norank\_f\_Caldilineaceae* 和 *norank\_f\_Saprospiraceae* 丰度相对较高, 其中前者具有脱硝和去除多环芳烃的能力, 而 *norank\_f\_Saprospiraceae* 可以促进含氮物质的降解, 且可能有利于提供更多的碳源以协助反硝化过程<sup>[16-17]</sup>。

#### 2.4 填料对活性污泥中微生物种群的影响

对好氧池的活性污泥及填料表面微生物的 LEfSe 多级物种层级树图进行分析, 结果如图 3 所示。不同颜色节点表示在对应组别中显著富集, 且对组间差异性存在显著影响的微生物种群。线性判别分析 (LDA) 值越大, 代表物种丰度对差异效果影响越大。好氧池污泥中的差异性微生物物种主要有 *p\_Acidobacteriota* 门 (3.95)、*f\_Rhodocyclaceae* 科 (5.15)、*o\_Caulobacteriales* 目 (3.82) 和 *o\_Cytophagales* 目 (3.46), 填料上的差异性微生物物种主要有 *p\_Actinobacteriota* 门 (4.61)、*p\_Firmicutes* 门 (4.42)、*o\_Flavobacteriales* 目 (4.38) 和 *f\_Xanthomonadaceae* 科 (4.36)。*Acidobacteriota* 门在去除氮磷的过程中发挥很大的作用, *Firmicutes* 门也包含大量脱氮功能菌; 其次是 *Rhodocyclaceae* 科, 它是负责反硝化和除磷的核心菌群<sup>[18-19]</sup>。此外, 填料生物膜中的 *Flavobacteriales* 目具有降解有机物作用, *Xanthomonadaceae* 科具有脱氮功能<sup>[20]</sup>。投加固定填料有助于脱氮功能菌富集, 强化了脱氮性能。

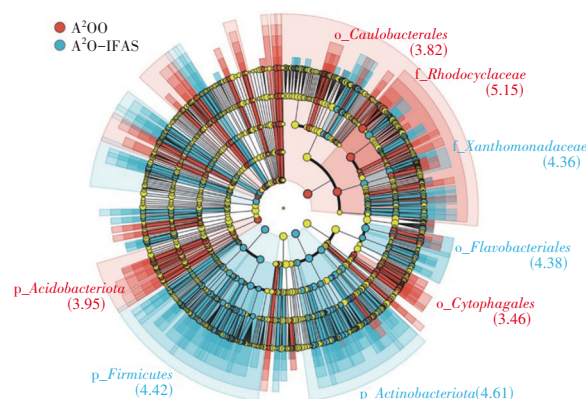


图3 好氧池活性污泥及填料表面微生物的 LEfSe 多级物种层级树

Fig.3 Hierarchical tree of LEfSe multi-level species of activated sludge and filler surface sludge in aerobic tank

对缺氧池和好氧池中污泥的微生物菌群进行差异性分析, 得到 LEfSe 多级物种层级树图, 如图 4 所示。好氧池活性污泥系统的差异性物种主要有 *f\_Rhodocyclaceae* 科 (5.12)、*f\_Rhodobacteraceae* 科 (3.77)、*f\_Hyphomonadaceae* 科 (3.54), 缺氧池活性污泥系统的差异性物种主要有 *p\_Actinobacteriota* 门 (4.45)、*p\_Firmicutes* 门 (3.62)、*f\_Comamonadaceae* 科 (3.98)、*f\_Gemmatimonadaceae* 科 (3.80)。Firmicute 门微生物在缺氧池污泥中富集, 可以促进含氮物质的利用, 在缺氧的环境中进行代谢, 参与反硝化过程<sup>[21]</sup>。此外, *Comamonadaceae* 科是一种典型的反硝化菌, 其在缺氧池内显著富集, 对硝酸盐氮有较好的去除效果<sup>[8]</sup>。

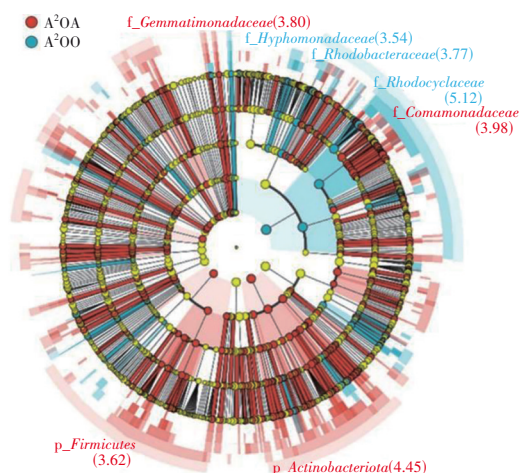


图4 好氧池、缺氧池活性污泥微生物的 LEfSe 多级物种层级树

Fig.4 Hierarchical tree of LEfSe multi-level species of activated sludge in aerobic tank and anoxic tank

### 3 结论

① 好氧池活性污泥及活性污泥+填料的硝化速率分别为1.59和2.72 mg/(g·h),表明投加固定填料后硝化能力显著提高。

② 经过IFAS改造后AAO系统中富集的微生物种群在门水平上有 *Proteobacteria*、*Bacteroidota*、*Actinobacteria* 及 *Chloroflexi*,在属水平上主要有 *Thauera*、*Ferruginibacter*、*Thermomonas*、*Rhodobacter*、*norank\_f\_Caldilineaceae*和*norank\_f\_Saprospiraceae*,系统内富集了大量脱氮功能菌,有利于强化硝化作用。

③ AAO系统的固定填料上富集的大量 *Actinobacteriota* 具有良好的脱氮能力,在硝化过程中发挥重要作用。相比好氧池活性污泥,填料表面生物膜中脱氮功能菌 *Firmicutes* 和 *Xanthomonadaceae* 显著富集,它们对水中含氮物质有较好的去除效果,表明投加固定填料后强化了硝化作用。

### 参考文献:

- [1] 戴杨叶,张大鹏,朱健,等. IFAS工艺用于提标改造的运行效果及污染物降解动力学[J]. 净水技术, 2023, 42(5):93-101.  
DAI Yangye, ZHANG Dapeng, ZHU Jian, *et al.* Operation effect and degradation kinetics of IFAS process in upgrading and reconstruction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (5) : 93-101 (in Chinese).
- [2] 乔海兵,赵志太,李帅军,等. 污水厂氧化沟改造为A<sup>2</sup>O+MBBR+O<sub>3</sub>工艺提标设计[J]. 中国给水排水, 2023,39(22):60-65.  
QIAO Haibing, ZHAO Zhitai, LI Shuaijun, *et al.* Design of oxidation ditch upgraded to A<sup>2</sup>O, MBBR and O<sub>3</sub> process in a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22):60-65(in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 赫俊国,江伟勋,何卓义,等. IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析[J]. 环境科学, 2022,43(9):4736-4747.  
HE Junguo, JIANG Weixun, HE Zhuoyi, *et al.* Analysis of microbial interaction law of mud membrane in IFAS process for treating low carbon source sewage in South China [J]. Environmental Science, 2022, 43 (9) : 4736-4747(in Chinese).
- [5] 裘湛. 污水处理厂冬季硝化强化与微生物种群分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9):3549-3555.  
QIU Zhan. Nitrification enhancement and microbial community structure analysis for a full-scale wastewater treatment plant in winter [J]. China Environmental Science, 2017, 37(9):3549-3555(in Chinese).
- [6] HUANG J, ZHOU Z, ZHENG Y, *et al.* Biological nutrient removal in the anaerobic side-stream reactor coupled membrane bioreactors for sludge reduction [J]. Bioresource Technology, 2020, 295:122241.
- [7] ZHENG Y, ZHOU Z, YE X, *et al.* Identifying microbial community evolution in membrane bioreactors coupled with anaerobic side-stream reactor, packing carriers and ultrasonication for sludge reduction by linear discriminant analysis [J]. Bioresource Technology, 2019, 291:121920.
- [8] 孙晓,江婕,王强,等. 大型污水厂中填料对A<sup>2</sup>O系统微生物种群的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 63-68.  
SUN Xiao, JIANG Jie, WANG Qiang, *et al.* Effect of suspended carrier on microbial community in A<sup>2</sup>O system in a full-scale wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7):63-68(in Chinese).
- [9] YANG C, ZHANG W, LIU R, *et al.* Phylogenetic diversity and metabolic potential of activated sludge microbial communities in full-scale wastewater treatment plants [J]. Environment Science & Technology, 2011, 45(17): 7408-7415.
- [10] 张晓红,姜博,张文武,等. 京津冀区域市政污水厂活性污泥种群结构的多样性及差异[J]. 微生物学通报, 2019, 46(8):1896-1906.  
ZHANG Xiaohong, JIANG Bo, ZHANG Wenwu, *et al.* Microbial community diversity of activated sludge from municipal wastewater treatment plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Microbiology China, 2019, 46 (8):1896-1906(in Chinese).
- [11] QIAN F, GEBREYESUS A T, WANG J, *et al.* Single-stage autotrophic nitrogen removal process at high loading rate: granular reactor performance, kinetics, and microbial characterization [J]. Applied

- Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(5): 2379–2389.
- [12] BI C, YU D, WANG X, *et al.* Performance and microbial structure of partial denitrification in response to salt stress: achieving stable nitrite accumulation with municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2020, 311:123559.
- [13] LI D, LI W, ZHANG D, *et al.* Performance and mechanism of modified biological nutrient removal process in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater [J]. Bioresource Technology, 2023, 367: 128254.
- [14] SUN T, DU R, DAN Q, *et al.* Rapidly achieving partial nitrification of municipal wastewater in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) reactor: effect of heterotrophs proliferation and microbial interactions [J]. Bioresource Technology, 2021, 340:125712.
- [15] GALAFASSI S, SABATINO R, SATHICQ M B, *et al.* Contribution of microplastic particles to the spread of resistances and pathogenic bacteria in treated wastewaters [J]. Water Research, 2021, 201:117368.
- [16] 王燕,李激,支尧,等. 新型生物质碳源强化脱氮效果及微生物菌群分析[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 63–68, 117.
- WANG Yan, LI Ji, ZHI Yao, *et al.* Denitrification enhancement effect and microbial flora analysis of a new biomass carbon source [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 63–68, 117(in Chinese).
- [17] 高春娣,杨箫阳,欧家丽,等. 丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性[J]. 环境科学, 2022, 43(7):3718–3729.
- GAO Chundi, YANG Xiaoyang, OU Jiali, *et al.* Aerobic granulation stability and microbial diversity of filamentous bulking sludge [J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3718–3729(in Chinese).
- [18] KRISTENSEN J M, SINGLETON C, CLEGG L A, *et al.* High diversity and functional potential of undescribed “*Acidobacteriota*” in Danish wastewater treatment plants [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12:643950.
- [19] LIU L, WANG S, CHEN J. Anthropogenic activities change the relationship between microbial community taxonomic composition and functional attributes [J]. Environment Microbiology, 2021, 23(11): 6663–6675.
- [20] PETRILLI R, FABBRETTI A, CERRETANI A, *et al.* Selection, identification and functional performance of ammonia-degrading microbial communities from an activated sludge for landfill leachate treatment [J]. Microorganisms, 2023, 11(2):311–316.
- [21] LI T, LIU C, LU J, *et al.* Determination of how tetracycline influences nitrogen removal performance, community structure, and functional genes of biofilm systems [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2020, 106:99–109.
- 
- 作者简介:戴杨叶(1986– ),女,江苏昆山人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水处理技术。  
E-mail:yangye\_0006@163.com  
收稿日期:2024-01-08  
修回日期:2024-03-24

(编辑:李德强)

复苏河湖生态 建设人水和谐美丽中国