

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.005

横摇对 AAO 工艺处理船舶生活污水的影响机制

阳春^{1,2}, 谢景¹, 成玉¹, 胡碧波^{1,2}, 韩乐^{1,2}

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 船舶生活污水作为一种移动污染源,是河湖和海洋生态环境污染防治中需重点关注的对象。为探究晃荡这一特殊场景下船载污水处理装置内活性污泥系统的微生物特性和处理效率,通过三自由度晃荡模拟平台,采用 AAO 工艺小试装置,分析了横摇幅度和周期对活性污泥微生物特性及污染物去除率的影响。研究表明,幅度 $\leq 15^\circ$ 、周期 ≥ 12 s 的轻度横摇对 COD 的去除有利,但横摇强度提高(幅度 $> 15^\circ$,周期 < 12 s)则对其不利。减少横摇周期和增加幅度可提高氨氮去除率,但会抑制反硝化过程,降低 TN 去除率。横摇幅度对去除 COD 和 TN 的影响大于周期,但交互作用不明显。除幅度为 22.5° 和周期为 12 s 外,其余横摇工况有助于通过增加胞外聚合物含量来提升除磷效率。微生物群落的 16S rRNA 高通量测序发现,适度的横摇(幅度 $\leq 5^\circ$,周期 ≤ 12 s)可提升微生物丰富度,但会降低微生物多样性。

关键词: 船舶生活污水; AAO 工艺; 横摇强度; 污染物去除; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0032-08

Impact of Rolling on AAO Process for Treating Shipboard Domestic Sewage

YANG Chun^{1,2}, XIE Jing¹, CHENG Yu¹, HU Bi-bo^{1,2}, HAN Le^{1,2}

(1. School of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing 400045, China)

Abstract: Shipboard domestic sewage, as a mobile pollution source, is a concern in the prevention and control of pollution in rivers, lakes, and oceans. To investigate the microbial characteristics and operational performance of the activated sludge system in shipboard sewage treatment units at the specific conditions of ship movement, a three-degree of freedom oscillation platform was used to simulate ship rolling. A pilot-scale AAO process device was employed to analyze the effects of rolling amplitude and period on the microbial characteristics of activated sludge and pollutant removal efficiency. It was found that mild rolling (amplitude $\leq 15^\circ$, period ≥ 12 s) enhanced the COD removal, whereas higher intensified rolling (amplitude $> 15^\circ$, period < 12 s) hampered the process. Shorter rolling periods and greater amplitudes was able to increase ammonia nitrogen removal rates, whilst inhibited denitrification, leading to the reduction of TN removal efficiency. The effect of rolling amplitude on COD and TN removal was higher than the period, and the interaction was not significant. Except for the condition with an amplitude of 22.5° and a period of 12 s, the total phosphorus (TP) removal efficiency was improved by increasing the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203402)

通信作者: 阳春 E-mail: c.yang@cqu.edu.cn

content of extracellular polymeric substances (EPS) at the rest of experimental rolling conditions. The high-throughput 16S rRNA sequencing analysis of the microbial community indicated that mild rolling (amplitude $\leq 5^\circ$, period ≤ 12 s) increased the microbial richness, but decreased the diversity.

Key words: shipboard domestic sewage; AAO process; ship rolling intensity; pollutant removal; microbial community

船舶生活污水作为一种移动污染源,是河湖和海洋生态环境污染防治中需重点关注的对象。船舶生活污水包括黑水和灰水,其中黑水为粪尿废水,需收集后转岸上处理或处理达标后排放,灰水则目前无严格要求。船舶黑水强制上岸处理也面临诸多问题,因此如何确保船载处理装置的达标排放仍需关注。

船载生活污水处理装置绝大部分采用生物处理工艺,虽然结合了船舶生活污水的水量 and 水质特点,但多参照陆地污水处理参数设计,对船舶航行中的摇晃等特殊场景的影响考虑不充分,再加上运维管理不到位等因素,使得装置运行效果不佳,出水水质达标难度大。

河道水流的不规则变化会使船舶摇晃,而横摇是最常见且影响最大的摇晃运动形式^[1-3],会影响船载生化处理装置的结构稳定性并改变装置内的水力条件^[4],进而通过影响微生物群落的污染降解效能影响污水处理效率^[5]。目前的研究多通过调控水流剪切力来代替横摇产生的冲击荷载^[6-7],但横摇对活性污泥系统微生物群落结构、污泥凝聚性以及系统整体生物活性的综合影响未充分考虑,因此通过模拟试验系统研究横摇对船载活性污泥法污水处理系统的影响机制,分析污染物去除效率和微生物特性将有助于优化船载污水处理装置设计,同时可提升船舶污水处理设备运行效果,以适应复杂特殊的航行环境。

1 材料与方法

1.1 试验用水与接种污泥

试验采用人工配水,以葡萄糖和乙酸钠作为碳源,氯化铵、牛肉膏和蛋白胨作为氮源,磷酸二氢钾作为磷源,补充氯化钙和硫酸镁等微量元素以促进活性污泥生长。配水的COD、氨氮、总氮和总磷分别为470~520、38~42、50~60和5~6 mg/L。接种污泥取自重庆市井口污水处理厂,经过一个月的驯化后用于试验。

1.2 试验装置与运行

试验采用上海钛擎机器人有限公司生产的三自由度晃荡平台(角度为 $0\sim 30^\circ$,周期为 $1\sim 12$ s)模拟船舶横摇,AAO工艺污水处理装置设对照组和晃荡组,后者置于晃荡平台(见图1)。为避免晃荡产生返流,各反应区间的水流由蠕动泵控制。装置的厌氧区、缺氧区和好氧区体积分别为1.62、1.67和6.70 L,水力停留时间分别为1.9、2和8 h;二沉池体积为4.30 L。处理量为20 L/d,温度控制在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,好氧区DO控制在 (2.5 ± 0.5) mg/L,通过人工排泥使混合液污泥浓度(MLSS)维持在3 500 mg/L。反应器启动成功后的1~32 d为启动期阶段,其内外回流比分别设置为300%和80%。因目前船舶污水处理的泥水分离已大多采用膜分离,晃荡对其分离过程的影响有限,为简化试验装置,泥水采用沉淀池进行重力分离,与生物反应池以软管连接但不晃荡。晃荡的参数基于《船用生活污水处理设备技术条件》(GB/T 10833—2015)和长江下游波浪统计等相关规定和数据^[8-10],确定横摇幅度为 5° 、 10° 、 15° 和 22.5° ,周期为8、10和12 s,并据此设计了6种工况: $5^\circ/12$ s、 $5^\circ/10$ s、 $5^\circ/8$ s、 $10^\circ/12$ s、 $15^\circ/12$ s和 $22.5^\circ/12$ s(分别记作工况I~VI)。

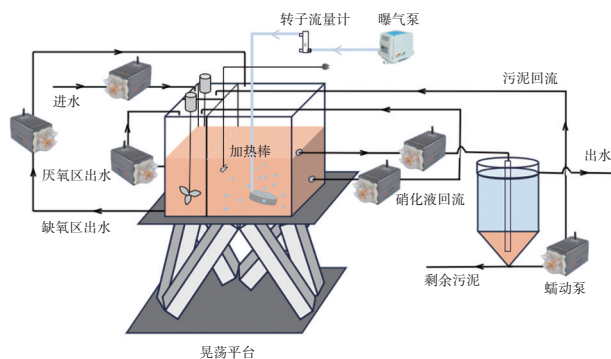


图1 晃荡组反应器示意

Fig.1 Diagram of the rolling reactor

1.3 常规水质指标和比耗氧速率检测

水样经过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤纸过滤后按标准方法进行常规水质指标的检测。DO使用上海雷磁JPBJ-608

便携式溶解氧仪测定。活性污泥的比耗氧速率(SOUR)通过密闭间歇曝气法测定,从好氧池取200 mL水样至锥形瓶后置于磁力搅拌器上,在20℃下充氧至7 mg/L以上,然后密闭并搅拌,每隔30 s记录一次DO值直至降至2 mg/L以下;通过一元线性回归分析得到耗氧速率进而计算获得。

1.4 高通量测序

在各工况结束时从好氧区取样,在10 000 r/min下离心5 min后将沉积物于-80℃下保存。6个工况完成后,样本送至上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序。使用引物338F(ACTCCTACGGGAGGCAGC)AG和806R(GGACTACHVGGGT-WTCTAAT)在Illumina PE300平台上对16S rRNA的V3-V4区域进行扩增和测序,将得到的PE reads进行样本拆分后进入质控拼接优化阶段,然后通过DADA2方法处理数据,获得ASV序列及其丰度。根据工况将对照组记为D1~D6,晃荡组记为H1~H6。

1.5 试验数据分析

所有数据型指标的测定均设置三组平行样,利用Excel2016计算平均值和标准差;利用Origin 2021对相关数据进行绘图;响应面分析在Design Expert 13软件上进行;物种差异分析在上海美吉生物平台上进行,采用方差分析(ANOVA)或非参数检验(Kruskal-Wallis test)进行显著性分析,其中, $P \leq 0.05$ 表示差异显著, $P \leq 0.01$ 表示差异非常显著。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除

2.1.1 COD的去除

测定结果显示,对照组的COD平均去除率稳定在 $(94.37 \pm 0.20)\%$;在5°的小幅度晃荡下,随着周期从12 s经10 s降至8 s(工况I~III),去除率从94.88%经94.35%降至94.25%($P < 0.01$);而在12 s的相同周期下,随着晃荡幅度从5°逐渐增加至22.5°,去除率从94.88%小幅升至94.92%后降至93.85%,最终逐步降至93.03%($P < 0.01$)。这表明适度横摇有助于促进氧气均匀分布和传递,并提高微生物与污染物接触机会,进而提升COD去除效率^[11]。但随着幅度的增大和周期的减小,过大幅度的晃荡会产生更强的水剪切力反而会破坏絮体结构,并造成反应器内各部分水深差异加大,使氧气分布不均,带来氧传质效率差异增加,进而降低了

代谢效率。

2.1.2 氮的去除

图2(a)为两组反应器的总氮去除率对比。各工况下晃荡组的总氮平均去除率均低于对照组($P < 0.01$),且随着工况II~VI晃荡强度的增加(幅度增大、周期缩短),总氮平均去除率下降了2.67%~6.83%,最低降至74.66%,这表明晃荡对总氮的去除存在负面影响。

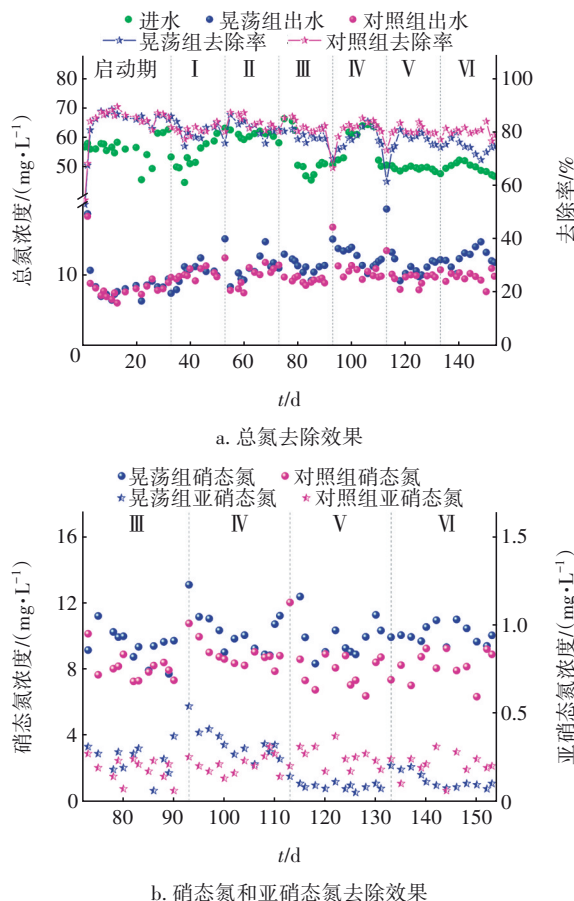


图2 不同横摇工况下系统对氮的去除效果

Fig.2 Nitrogen removals of the system at different rolling conditions

与总氮的去除率被晃荡抑制相反,晃荡组在所有工况下的氨氮平均去除率均高于对照组,表明横摇对氨氮去除有促进作用。对照组的氨氮平均去除率稳定在 $(97.88 \pm 0.20)\%$;在5°的小幅度晃荡下,氨氮平均去除率随着周期从12 s经10 s降至8 s(工况I~III),去除率从98.45%经98.22%降至97.60%($P < 0.01$);而在周期同为12 s时,随着晃荡幅度从10°逐渐增至22.5°,去除率却从97.92%依次增加至98.58%和99.07%($P < 0.01$)。这说明横

摇幅度的增加有利于氨氮去除,但周期的减小却对氨氮去除有所抑制。

在工况Ⅲ~Ⅵ下测定了反应器出水中的硝态氮与亚硝态氮浓度,结果见图2(b)。晃荡组的硝态氮平均浓度均高于对照组,且随着晃荡强度的增加逐渐增大,与氨氮去除率的变化趋势相对应。对照组的亚硝态氮平均浓度稳定,而晃荡组的亚硝态氮浓度随晃荡条件而改变,各工况下亚硝态氮浓度高低排序为Ⅳ>Ⅲ>Ⅵ>Ⅴ,无明显规律,这应该与亚硝化和硝化过程的强弱有关。总的来讲,总氮去除率降低的原因应该是反硝化过程受到了横摇产生的负面影响,文献中关于剪切力与总氮去除率成反比的报道也可以解释这一现象^[11]。

2.1.3 磷的去除

不同横摇工况下系统的除磷效能见图3。

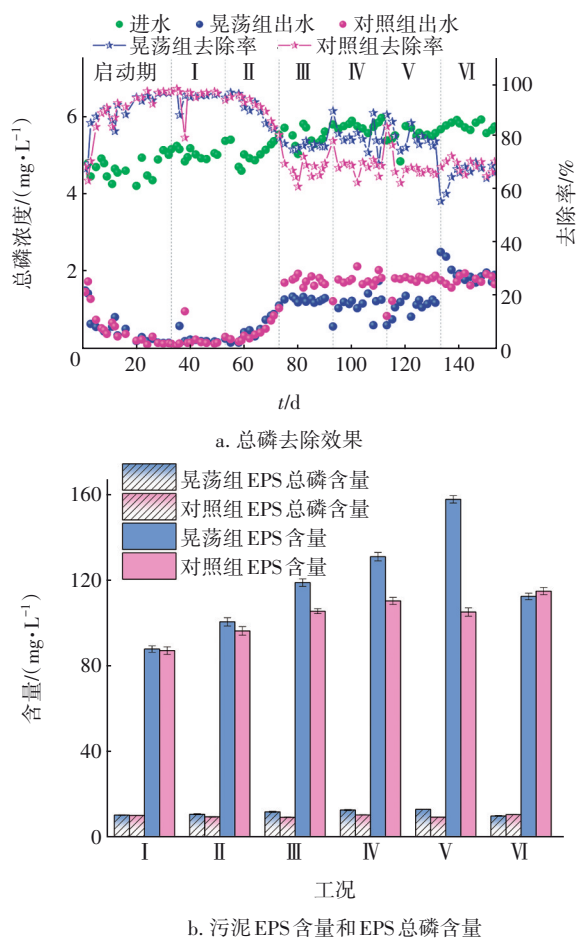


图3 不同横摇工况下系统的总磷去除率和污泥EPS中的总磷含量

Fig.3 TP removals and contents in EPS at different rolling conditions

由图3(a)可知,除工况Ⅰ、Ⅱ和Ⅵ外,晃荡组对

总磷的去除率均高于对照组($P < 0.01$),其中在工况Ⅰ、Ⅱ下晃荡组与对照组的总磷去除率无明显差异($P > 0.05$),而在工况Ⅵ下晃荡组的去除率比对照组低4.84%($P < 0.01$)。为进一步探究磷的去除与污泥EPS之间的关系,测定了各工况末期污泥EPS含量以及EPS中的总磷含量。由图3(b)可知,除工况Ⅰ和Ⅵ外,晃荡组的活性污泥中EPS含量均高于对照组,其中工况Ⅰ与对照组无显著差异($P > 0.05$),而在工况Ⅵ中则低于对照组($P < 0.01$)。根据上述试验数据可推测,横摇对总磷去除率的提升可能是通过促进污泥中EPS含量的提升实现的,但是强度过大的晃荡有可能会降低污泥的EPS含量,进而降低了总磷去除率。

2.2 横摇对去除COD和总氮的析因分析

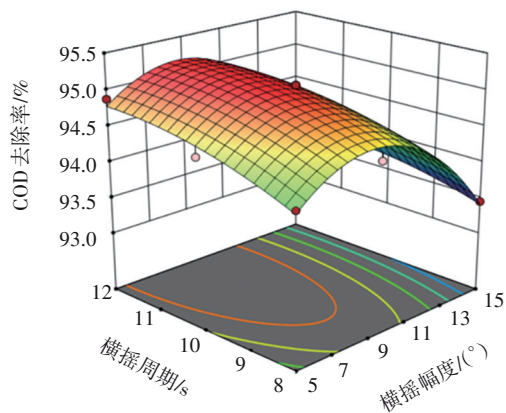
为进一步探究横摇幅度和周期两个因素对反应器污染物去除效率的影响,以COD去除率和总氮去除率为响应值进行了 3^2 析因分析,获得拟合二次多项式回归模型方程如下:

$$Y_1 = 87.28 + 0.63A + 0.89B - 0.0058AB - 0.033A^2 - 0.036B^2 \quad (1)$$

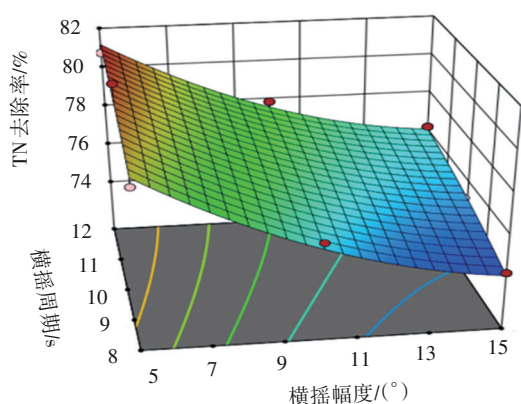
$$Y_2 = 77.78 - 1.44A + 1.36B + 0.012AB + 0.040A^2 - 0.051B^2 \quad (2)$$

式中: Y_1 和 Y_2 分别代表COD和总氮去除率, A 和 B 分别代表横摇幅度和横摇周期。

方差分析表明,两模型的显著性和拟合度均较高,能有效反映COD和TN去除率与横摇幅度及周期的关系。由 P 值可知,横摇幅度的影响强于周期,但交互作用不显著。从响应面分析可知,晃荡幅度在 10° 左右COD去除率存在一个高值,但总氮去除率随幅度增加和周期减少而逐渐下降(见图4)。



a. COD去除率的响应曲面



b. TN去除率的响应曲面

图4 横摇幅度和周期对COD和总氮去除率影响的响应曲面

Fig.4 Response surfaces of rolling amplitude and period on COD and TN removals

2.3 横摇对污泥微生物特性的影响

2.3.1 微生物活性

试验中控制厌氧区 $DO < 0.2 \text{ mg/L}$ 、缺氧区 $DO < 0.5 \text{ mg/L}$ 、好氧区 DO 为 2.5 mg/L 左右,测定了各工况下好氧池活性污泥的 $SOUR$,以分析晃荡对微生物活性的影响。检测结果显示,对照组的平均 $SOUR$ 为 $(6.29 \pm 0.65) \text{ mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$,而晃荡组的 $SOUR$ 均高于对照组,在工况 I ~ V 下分别为 (13.22 ± 0.39) 、 (12.63 ± 0.46) 、 (12.52 ± 0.37) 、 (14.55 ± 0.58) 和 $(9.63 \pm 0.65) \text{ mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$;但在晃荡强度最高的工况 VI 下因微生物活性被抑制, $SOUR$ 降至 $(4.53 \pm 0.56) \text{ mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$,低于对照组 27.98% 。这表明适度横摇可增强好氧微生物活性,但过强的水力扰动则会产生负面抑制。在不同幅度和周期条件下, $SOUR$ 值与 COD 去除率变化趋势一致。

2.3.2 微生物群落多样性

不同横摇工况下微生物群落的多样性指数见表1。样品的 Coverage 值均超过 0.99,说明具有较好的群落覆盖度和数据代表性。晃荡组和对照组的 Sobs、ACE、Chao 指数大小排序一致,这些指数反映了群落的丰富度,较高的指数值意味着更高的丰富度。在工况 I ~ III 下,晃荡组的丰富度高于对照组,而在工况 IV ~ VI 下则较低,表明适度的横摇可能有利于提高微生物丰富度,而剧烈横摇则可能抑制。微生物丰富度过低会降低污染物去除效率,在工况 VI 下晃荡组微生物的丰富度以及 COD、总氮和

总磷去除率均为最低证实了这一点。Shannon 和 Simpson 指数分别反映群落的多样性和均匀性, Shannon 值高表示多样性增加,而 Simpson 指数则相反。晃荡组的多样性低于对照组,表明横摇抑制了某些微生物的生长。在工况 II 下,尽管晃荡组的多样性最高,但污染物去除率并未提高,说明高多样性可能导致微生物间竞争,而不是所有微生物均有助于去除污染物。除工况 III 外,多样性一般随丰富度增加,工况 III 的特殊情况可能是由于某些特定微生物快速增长所致。

表1 不同横摇工况下微生物群落的多样性指数

Tab.1 Diversity indices of microbial communities at different rolling conditions

样品	Sobs	ACE	Chao	Shannon	Simpson
D1	1 584	1 609	1 590	5.513	0.012 8
D2	1 585	1 601	1 587	5.397	0.016 3
D3	1 621	1 627	1 621	5.655	0.012 1
D4	1 793	1 827	1 803	5.823	0.010 5
D5	1 930	2 120	2 036	5.669	0.012 3
D6	1 614	1 640	1 621	5.676	0.010 2
H1	1 681	1 705	1 686	5.564	0.015 7
H2	2 012	2 028	2 014	5.864	0.010 2
H3	1 634	1 634	1 634	5.263	0.020 5
H4	1 665	1 679	1 667	5.707	0.011 3
H5	1 643	1 654	1 644	5.672	0.014 2
H6	1 404	1 423	1 408	5.309	0.023 3

2.3.3 微生物群落结构

不同横摇工况下微生物群落在门水平和纲水平上的分布如图5所示。在门水平上,相对丰度排名前10的菌门中,变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidota*)和厚壁菌门(*Firmicutes*)是优势菌门,占比超过80%。除工况 II 和 VI 晃荡组的变形菌门相对丰度低于对照组外,工况 I、III、IV 晃荡组的高于对照组,工况 V 则无明显差异($P > 0.05$),这与总磷去除率基本一致,说明横摇会影响其丰度以及磷的吸附和积累^[12]。此外,工况 III ~ VI 条件下组间的差距不断缩小,从9.92%到-3.40%。这与 Ma 等^[13]得到的混合强度过大会降低变形菌门丰度的研究结论一致。拟杆菌门在晃荡组工况 VI 下丰度最低,此时 COD、总氮和总磷去除率也均最低,此外,组间差值随幅度的增大从3.40%下降至-24.27%,这表明拟杆菌门丰度与污染物去除率相关,且晃荡对其有显著的影响($P < 0.01$)。晃荡组的厚壁菌门丰度

普遍高于对照组,且随横摇强度增加而增加,与氨氮去除率一致,表明该类菌可促进氮转化。

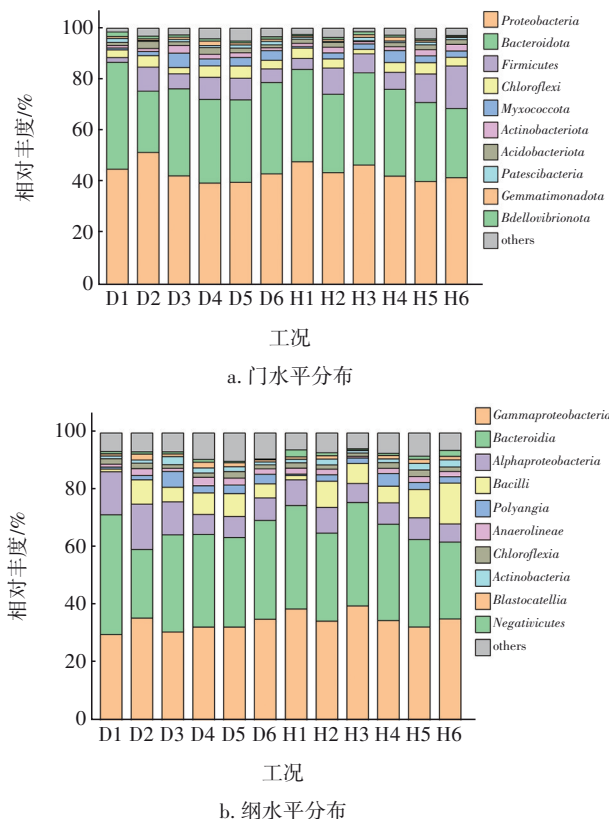


图5 不同横摇工况下微生物群落在门和纲水平的分布

Fig.5 Distribution of microbial communities at phylum and class level at different rolling conditions

从图 5(b)可以看出,在纲水平上, γ -变形菌纲 (*Gammaproteobacteria*)、拟杆菌纲 (*Bacteroidia*)、 α -变形菌纲 (*Alphaproteobacteria*) 和芽孢杆菌纲 (*Bacilli*) 为优势菌纲,总相对丰度超过 80%。晃荡组的 γ -变形菌纲相对丰度大多高于对照组,这为晃荡组的氨氮去除率高于对照组提供了微生物证据。晃荡组的 α -变形菌纲相对丰度从工况 I 的 8.94% 降到工况 VI 的 6.29%,除工况 IV 和 V 无显著差异外 ($P>0.05$),其余工况条件下晃荡组与对照组的 α -变形菌纲相对丰度都低于对照组 ($P<0.01$),这表明横摇不利于该类菌的生长。晃荡组的拟杆菌纲丰度在工况 VI 下最低,与拟杆菌门的情况相似,说明晃荡强度大会影响其生长。除工况 IV 晃荡组与对照组的芽孢杆菌纲丰度相差不大外,晃荡组的相对丰度均高于对照组,组间差值从工况 I 的 0.5% 增至工况 VI 的 9.29%,表明横摇对其生长有利,促成为晃荡组的第三大优势菌纲。

2.3.4 物种差异

门水平上,晃荡组中放线菌门 (*Actinobacteriota*) 和弯曲菌门 (*Campylobacterota*) 的相对丰度分别为 2.25% 和 0.17%,显著高于对照组的 1.26% 和 0.04% ($P<0.01$)。说明横摇有利于放线菌门和弯曲菌门的生存。放线菌门是参与氨氮转化的核心细菌门类^[14],其在晃荡组的相对丰度高于对照组,这或许是晃荡组对氨氮的去除率更高的原因之一。弯曲菌门的生长可能与其在硫氧化过程中的关键作用有关^[15]。从图 6 可以看出,在纲水平上,放线菌纲 (*Actinobacteria*)、厚壁菌纲 (*Negativicutes*)、纤细菌纲 (*Gracilibacteria*) 和寡弯菌纲 (*Oligoflexia*) 的相对丰度差异显著 ($P<0.05$)。放线菌纲和厚壁菌纲的增加反映了相应门类的差异,而纤细菌纲和寡弯菌纲的降低可能因横摇所引起的环境变化,影响了这些菌类的活性和生存。这些结果说明横摇对某些细菌门类的生长有利。

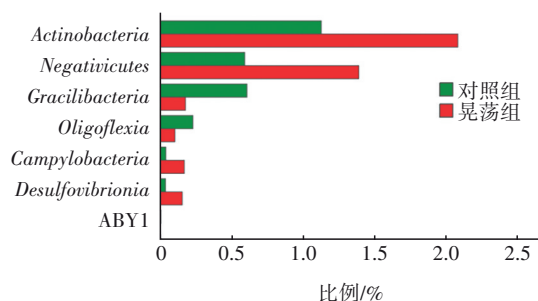


图6 不同横摇工况下微生物在纲水平上的物种差异

Fig.6 Species difference analysis of microorganisms at class level at different rolling conditions

图 7 展示了脱氮除磷相关功能菌属的分布。其中,硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 是一类典型的硝化细菌,可以将亚硝酸盐氧化成硝酸盐。如图 7(a) 所示,在工况 I ~ III 和 V 下晃荡组的硝化螺旋菌属相对丰度均大于对照组,而在工况 IV 和 VI 下则较低,说明脱氮不只依赖该菌属,可能还与其他硝化微生物如氨氧化细菌 (*Nitrosomonas*) 等相关。从图 7(b) 可知,晃荡组除工况 III 外,动胶菌属 (*Zoogloea*)、热单胞菌属 (*Thermomonas*) 等已明确分类的反硝化菌 (DNB) 相对丰度总体上呈减小趋势,这或许可以解释晃荡组总氮去除率降低的原因。动胶菌属 (*Zoogloea*) 具有分泌 EPS 抵抗恶劣环境的能力^[16],其在晃荡组的相对丰度呈现出与污泥 EPS 一样的变化趋势。此外,在工况 I 条件下晃荡组的反硝化细

菌相对丰度比对照组增加了1.53%,这说明小幅度横摇对DNB的生长有积极作用,而大幅度晃荡不利于DNB的生存。

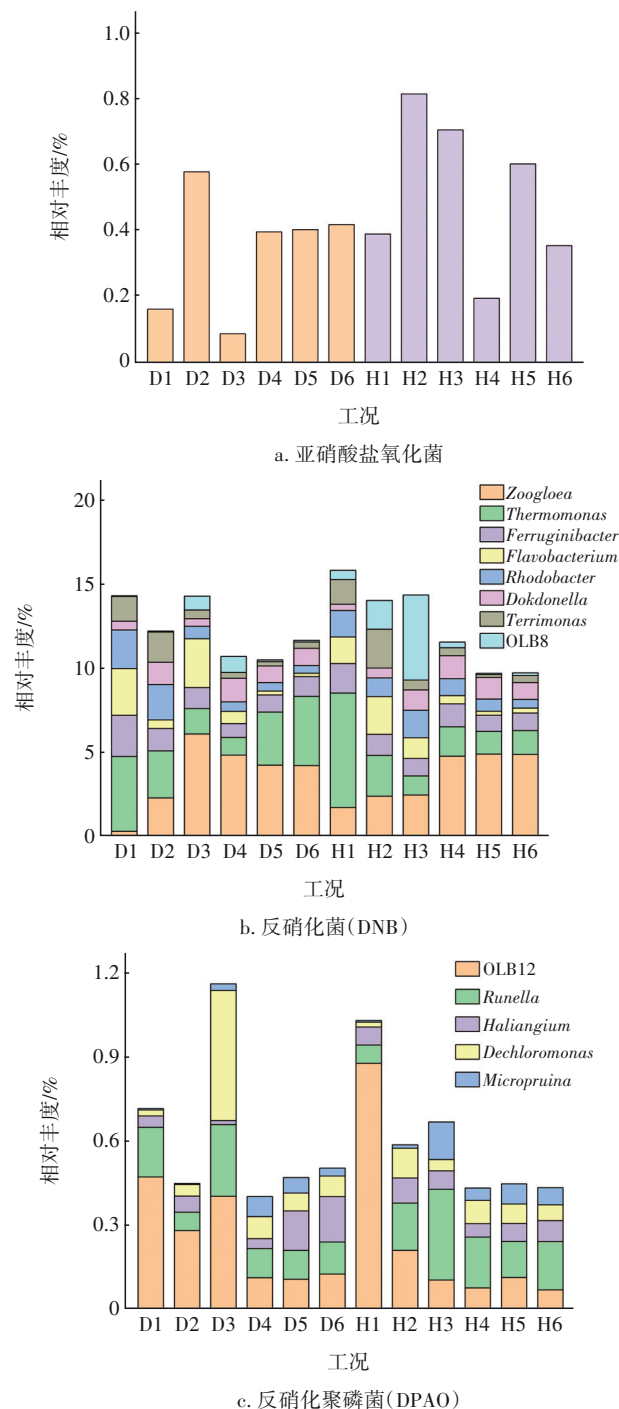


图7 不同横摇工况下污泥中脱氮除磷功能菌群分布

Fig.7 Distribution of functional flora for N and P removals at different rolling conditions

在丰度排前50的菌属中未发现聚磷菌,因此本研究聚焦于反硝化聚磷菌(DPAO)。如图7(c)所

示,在工况 I、II 和 IV 条件下晃荡组的 DPAO 相对丰度超过对照组,但工况 III、V 和 VI 则相反,这可能是由于晃荡带来的环境变化(如增强的氧气传递和混合效率)不利于 DPAO 生长,而其他与氮和磷去除相关的微生物活性保持高效,导致了其含量与脱氮除磷率不一致。图8展示了 *Candidatus Competibacter* (GAO) 这一类聚糖菌的相对丰度,除工况 IV 和 V 外,晃荡组均高于对照组。GAO 与聚磷菌(PAO)竞争可能导致 PAO 数量减少,解释了优势菌属中 PAO 缺失的现象。

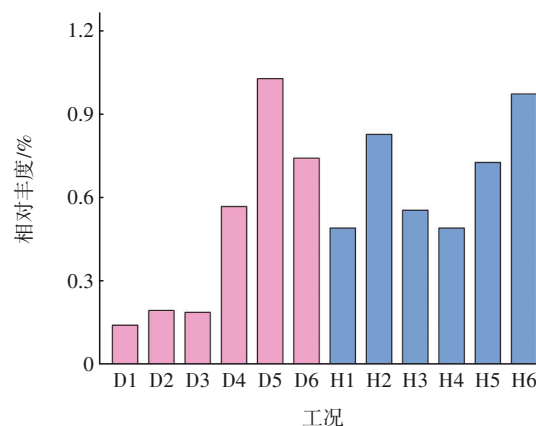


图8 不同横摇工况下污泥中 GAO 菌群分布

Fig.8 Distribution of GAO functional flora at different rolling conditions

3 结论

① 适度横摇可提高 COD 和氨氮去除率,通常也有利于总磷去除,但会降低对总氮的去除效果。变形菌门吸附积累磷,从而影响对总磷的去除率,厚壁菌门、 γ -变形菌纲、放线菌门和弯曲菌门主要参与氮转化,与总氮去除率变化相一致。微生物丰度及拟杆菌门、拟杆菌纲的过度降低会降低 COD、总氮和总磷去除率。此外,受晃荡的影响 SOUR 值变化与 COD 去除率变化总体上一致。

② 合理范围内的横摇对污水处理效率影响较小。但由于研究只考虑了横摇这一情况,其结论不能完全代表实际航行中的系统性能。为更准确地评估实际表现,未来研究将模拟多种运动,并深入分析普遍使用的一体化膜处理技术。

参考文献:

- [1] FANG S, LIU Z, WANG X, et al. Dynamic analysis of emergency evacuation in a rolling passenger ship using a two-layer social force model [J]. Expert Systems with

- Applications, 2024, 247: 123310.
- [2] 王晓强, 刘怀西, 马山, 等. PIV技术在某驳船模型强迫横摇水动力测试中的应用[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(2): 49-56.
- WANG Xiaoqiang, LIU Huaixi, MA Shan, *et al.* Application of PIV technology in forced transverse sway hydrodynamic testing of a barge model[J]. China Ship Research, 2017, 12(2): 49-56 (in Chinese).
- [3] WAWRZYNSKI W. Ship rolling equation: comparison of the different damping models[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114760.
- [4] LYU W, MOCTAR O, SCHELLIN T E. Ship motion-sloshing interaction using a field method [J]. Marine Structures, 2021, 76: 102923.
- [5] 边锋. 船舶生活污水处理及中水回用技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- BIAN Feng. Research on the Treatment of Domestic Sewage and Water Reuse Technology for Ships [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [6] PECHAUD Y, PAGEOT S, GOUBET A, *et al.* Size of biological flocs in activated sludge systems: influence of hydrodynamic parameters at different scales[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105427.
- [7] JAIREN A D, ARIS A, A/L CHELLIAPAN S, *et al.* Hydrodynamic shear force effect in aerobic granules formation and performance in treating domestic wastewater: a review[J]. AIP Conference Proceedings, 2024, 3041(1): 040004.
- [8] 吴秋原. 近40年长江口及其邻近海域风、浪特征及变化趋势[D]. 上海:华东师范大学, 2020.
- WU Qiuyuan. Wind and Wave Characteristics and Trends of the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Waters in the Past 40 Years[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020(in Chinese).
- [9] 李海波, 温宝贵. 用短峰波理论预报南海浮式生产储油装置运动响应[J]. 中国海上油气, 2007(5): 346-349.
- LI Haibo, WEN Baogui. Prediction of motion response of floating production and storage units in the south china sea using short-peak wave theory [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007(5): 346-349(in Chinese).
- [10] 汪敏, 娄月华, 王丽铮, 等. 基于完整稳性倾覆概率风险的內河客船主尺度优化[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 49-54, 61.
- WANG Min, LOU Yuehua, WANG Lizheng, *et al.* Optimization of inland river passenger vessel master scale based on complete stable capsizing probability risk [J]. Naval Architecture Engineering, 2021, 43(10): 49-54, 61(in Chinese).
- [11] HE Q, CHEN L, ZHANG S, *et al.* Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2019, 271: 48-58.
- [12] YANG S, YAO G. Simultaneous removal of concentrated organics, nitrogen and phosphorus nutrients by an oxygen-limited membrane bioreactor [J]. PLoS ONE, 2018, 13(8): e0202179.
- [13] MA S, XU K, REN H. Effect of mixing intensity on volatile fatty acids production in sludge alkaline fermentation: insights from dissolved organic matter characteristics and functional microorganisms [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118801.
- [14] XU Z, LIANG W, ZHANG X, *et al.* Effects of magnesite on nitrogen conversion and bacterial community during pig manure composting [J]. Bioresource Technology, 2023, 384: 129325.
- [15] ZHAO L, HU Y, ZHAO Y G, *et al.* Removal of typical sulfonamide resistance genes by ultraviolet/hydrogen peroxide advanced oxidation process in mariculture wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 55: 104262.
- [16] 尤国祥, 王超, 王沛芳, 等. 人工纳米材料与污水微生物聚集体的相互作用研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 10-17.
- YOU Guoxiang, WANG Chao, WANG Peifang, *et al.* Interactions between artificial nanomaterials and microbial aggregates [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 10-17(in Chinese).

作者简介: 阳春(1975-), 男, 四川简阳人, 博士, 教授, 从事污水处理理论与技术研究。

E-mail: c.yang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2024-07-24

修回日期: 2024-08-30

(编辑: 李德强)