

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.05.011

调试启动期膜生物反应器对消毒剂的应激响应

姚维昊^{1,2,3}

(1. 中国科学院城市环境研究所 城市污染物转化重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏中电创新环境科技有限公司, 江苏 无锡 214142)

摘要: 采用白羽鸡孵化场含消毒液的冲洗废水为进水,考察了调试启动期AO-MBR系统中好氧污泥对于消毒剂冲击的应激响应。结果表明,水质与工况同步出现了对冲击的应激响应现象。系统在第3天出现了恶化(污泥絮体破碎,跨膜压差TMP和产水溶解性有机物DOM升高等),在第7天后逐步恢复。进一步使用16S rRNA与ITS手段对不同时序的活性污泥进行测序和相关性分析,筛选出了与此变化强相关的细菌和真菌。初步验证了采用一体化MBR设备处理白羽鸡孵化场废水的可行性,并从降低浓度、增加营养物质和间歇运行三个方面提出了应对消毒剂冲击的建议和措施。

关键词: 膜生物反应器; 消毒剂; 污泥性状; 应激响应; 调试启动期

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)05-0081-07

Stress Response of Membrane Bioreactor to Disinfectants during the Commissioning Period

YAO Wei-hao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Electronics Innovation Environmental Technology Co. Ltd., Wuxi 214142, China)

Abstract: The stress response of aerobic sludge to disinfectant exposure in an AO-MBR system during the commissioning period was investigated using washing wastewater containing disinfectant from a white feather chicken hatchery as the influent. The water quality and working conditions exhibited a synchronous stress response to the impact. The system performance deteriorated on Day 3, marked by the issues such as disintegration of sludge flocs, a rise in transmembrane pressure (TMP), and an increase in dissolved organic matter (DOM), and it began to gradually recover after Day 7. 16S rRNA and ITS sequencing methods were employed to conduct correlation analysis on activated sludge samples collected at different time series. Bacteria and fungi that exhibited strong associations with these changes were subsequently identified. This experiment preliminarily validated the feasibility of utilizing integrated MBR for treating wastewater from white feather chicken hatcheries. Furthermore, it proposed strategies in three key aspects to deal with disinfectants: reducing pollutant concentrations, enhancing nutrient levels, and implementing intermittent operation modes.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201402); 福建省科学技术厅STS计划配套院省合作重大项目(2022T3002)

Key words: membrane bioreactor; disinfectant; sludge property; stress response; commissioning period

近年来,我国的白羽鸡生产量持续增长,但其废水处理过程中存在出水水质不稳定、达标率低、设备维护成本高、设备运行难度大等问题^[1]。其中主要原因为白羽鸡产业链庞大,包括种鸡场、养鸡场、孵化场、屠宰厂、食品加工厂和饲料厂等,其污水水质和水量差异较大。膜生物反应器(MBR)是膜分离与微生物降解相结合的高效污水处理技术,具有处理效率高、占地小、出水水质优良且稳定、运营维护简单等优势,这都使得MBR非常适合处理白羽鸡养殖废水。

养殖业常使用消毒剂应对畜禽疫病^[2]。含有消毒剂的冲洗废水会对生物处理系统产生严重影响,例如毒害物质多、冲击负荷大。若消毒剂进入MBR系统,会造成生化系统降解能力的下降和膜污染的增加。这主要是因为消毒剂会与活性污泥细菌细胞壁的官能团发生氧化、交联作用,破坏细胞壁的骨架结构并改变基团的电离或水解平衡^[3]。进一步地,还可诱发污泥分泌更多的胞外聚合物(EPS)^[4],EPS的组成和含量对活性污泥的性质有显著影响,而污泥的性质对于处理效果起着决定性作用^[5]。此外EPS还会造成膜污染,EPS比污泥絮体的过滤阻力高1 000倍,还可以借助表面电荷等作用形成更大的絮体。

目前关于MBR的试验研究与工程应用较多,但是鲜见用于处理白羽鸡冲洗消毒废水的报道。因此,笔者考察了对消毒冲洗废水一体化MBR的冲击影响,特别是消毒剂对于水质、膜工况(跨膜压差TMP)和菌群等影响,分析了一体化MBR设备处理白羽鸡产业链废水的适用性。同时,表征了AO-MBR生化系统对于消毒剂应激前后的工况与水质,借助测序手段分析了活性污泥的真菌和细菌在应激前后的丰度变化,并采用相关性分析筛选了与冲击变化强相关的菌属。

1 材料与方法

1.1 试验仪器与试剂

使用多水质测试仪对进出水COD和氨氮进行现场化验。水样收集存放在4℃的转运箱内,经0.45 μm滤膜过滤后,使用三维荧光仪进行荧光表

征。将不同时序的好氧池污泥样品采集于无菌离心管中,立即放入干冰进行冷冻保存,送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行16S rRNA和ITS测定。电子压力传感器的示数通过无纸记录仪每5 s记录一次,以计算TMP。

1.2 试验装置

试验使用一体化平板膜MBR装置,如图1所示。生化单元采用“厌氧-好氧”处理工艺,膜组件被集成在好氧池内。使用PLC实现自动控制,以设备间内的罗茨风机作为气源,通过膜组件下方的穿孔曝气管进行曝气。此外,为了使污泥溶液混合均匀,池底部加设曝气管。通过PLC自动控制,采用恒定流量运行,在自吸泵前设置了压力传感器,用以监测实时压力。

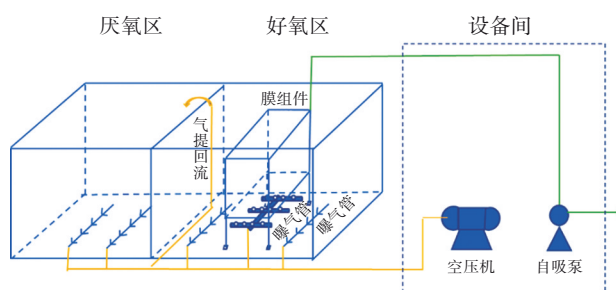


图1 工艺流程示意

Fig.1 Flow chart of MBR process

1.3 工艺参数

试验原水为某白羽鸡孵化场的消毒冲洗废水,消毒剂成分未知。消毒冲洗废水经调节池进入MBR装置。接种污泥取自某市政污水厂,试验前进行了数周的驯化培养,MLSS为8 000~9 000 mg/L。采用一体化MBR装置(厌氧池10.5 m³+好氧池10.5 m³),好氧池中含有80片膜面积为1.25 m²(孔径为200 nm)的平板膜,产水流量设置在5~15 L/(m²·h)。产水泵以开8 min停2 min的模式间歇运行,曝气强度为8 L/(m²·min),DO维持在2~4 mg/L。

2 结果与分析

2.1 进出水水质

原水水质是影响污泥活性和膜污染情况的重要因素。溶解性有机物(DOM)是生化降解的主要对象和造成膜污染的主要成分,借助三维荧光仪可

以很好地展示溶解性有机物的成分与浓度。不同时间的原水荧光光谱如图2所示。可以看出,原水中的溶解性有机物主要为腐殖酸、富里酸和微生物代谢产物(SMP),表明原水的主要成分为腐殖质和代谢产物。这与报道中鸡粪的淋洗液主要成分为类蛋白一致^[6]。3幅荧光图中红色峰的位置和面积也有明显差异,说明不同时间的原水成分和浓度是不同的。不同时间的原水氨氮保持在25~35 mg/L,较为稳定。而COD在200~800 mg/L之间波动,且后期有明显的上升趋势,如图3所示。这种浓度的上升考虑为生产量变化和冲洗水量不同导致的,COD和三维荧光结果均表明原水中有有机物的主要成分和浓度存在明显波动。

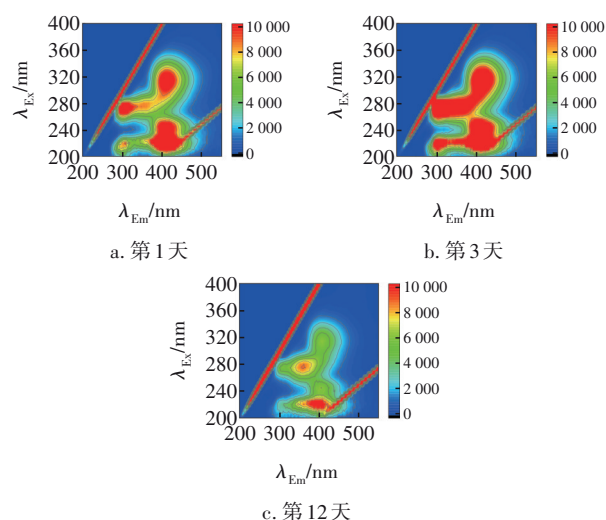


图2 不同时间的原水荧光光谱

Fig.2 Fluorescence diagram of raw water in different days

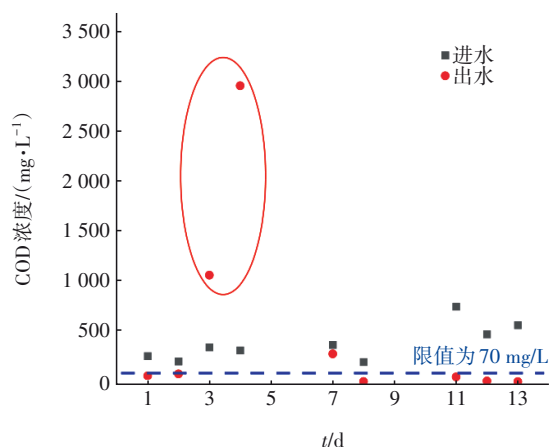


图3 进出水COD的变化

Fig.3 Change in COD of influent and effluent

产水水质通常可以判断活性污泥的状态。运

行后期出水澄清透明,没有明显的颗粒物与色度,表明此时活性污泥状态较为稳定,微滤膜对其截留能力良好。出水氨氮和COD均表现为先升高再缓慢下降的趋势,后期浓度极低,可以稳定达到《肉类加工工业水污染物排放标准》(GB 13457—92)。但第3、4天出现了出水COD比进水高的异常现象(红色圆圈内),这可能是由于出水中的细小污泥增多导致的,与颗粒物对于COD快速检测的影响有关。说明此时的污泥出现破碎,一定程度上显示出了进水的冲击效应^[7]。计算水力停留时间为2.19 d,两者时间上吻合。活性污泥中的硝化细菌等对环境十分敏感,易受外界影响而失活。推测是菌群失活导致了出水COD浓度升高,并推测这可能是消毒剂的作用。

2.2 应激响应

污泥应激响应是指在新的处理单元初次投加活性污泥,或者系统内存在有毒有害物质进入,污泥中的微生物等不适应骤然的变化,出现活性降低、沉降性能恶化、粒径变化等一系列现象^[8]。除了2.1节提出的水质异常外,对其他指标的分析如下:①感官上出水突然变得浑浊,带有明显碎泥,这表示污泥的性状发生变化,微滤膜的截留效果变差。②MBR的TMP发生了明显变化。TMP的突然升高表明有明显的膜污染发生,如图4所示。

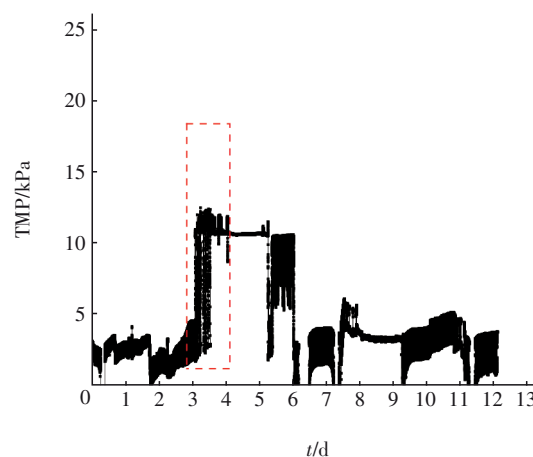


图4 TMP随时间的变化

Fig.4 Change in TMP with time

从图4可以看出,TMP出现明显跃升,且第3天出现了急剧爬升。尽管产水泵已经采取了开8 min停2 min的间歇运行方式,但是TMP依旧处于高值(>10 kPa),说明此时膜污染严重。第6天后,TMP

又降回到了5 kPa以内,膜污染情况得以改善。通常在临界通量范围内运行,12 d内不会出现显著的膜污染。钱光磊等^[9]报道了在过滤含曝气的高岭土悬浊液时31 d左右才会产生明显的膜污染。另外,出水的DOM荧光强度先增大后减小,说明冲击前后出水的DOM主要成分与占比也发生了改变。

活性污泥的生化性质变化与MBR膜污染有着直接关系。养鸡场常用的消毒剂戊二醛可以使微生物细胞中的酶蛋白失活,从而使细菌丧失正常的生理代谢功能。除了降低活性污泥代谢有机物的能力以外,还会带来EPS和溶解性微生物代谢产物(SMP)等的变化。SMP是出水COD或TOC的主要成分,其化学成分复杂,其中蛋白质、多糖和腐殖酸是主要成分^[10]。已有报道表明,在MBR中SMP一般是先增多后减少,最后趋于稳定^[11]。这也与TMP的变化趋势较为一致。对于出水浑浊问题,已有研究报道,当余氯达到6.5 mg/L后,污泥絮体尺寸变小,沉降速度变慢,泥水分界面不清晰^[2]。这与本试验中出水浑浊类似。而当余氯小于0.2 mg/L和MLSS约为4 000 mg/L时,对生化系统基本无影响。推测可能是由于消毒剂的浓度与MLSS的比值可以影响冲击强弱。正是因为MBR本身具有较高的MLSS,抗冲击能力更强,才可能会在几天内出现生化系统先恶化后恢复的现象。TMP的急剧上升,不仅仅是污泥粒径变小的原因。活性污泥在消毒剂刺激下,为抵抗外界环境的变化,也可能会分泌出更多的EPS和SMP。

三维荧光具有高分辨率的指纹识别溯源能力。进水冲击前后的三维荧光光谱如图5所示。可以看出,系统恢复以后与起始的出水荧光光谱相似,而冲击下的荧光成分与强度变化较大。 $\lambda_{Em}=400$ nm、 $\lambda_{Ex}=280$ nm处的峰值降低,说明部分大分子有机物被氧化为小分子有机物。而 $\lambda_{Em}=350\sim 400$ nm、 $\lambda_{Ex}=200\sim 220$ nm处的峰值明显升高,这可能是由于消毒剂溶解了部分活性污泥细胞,释放的难生物降解小分子有机物随产水流出^[12]。

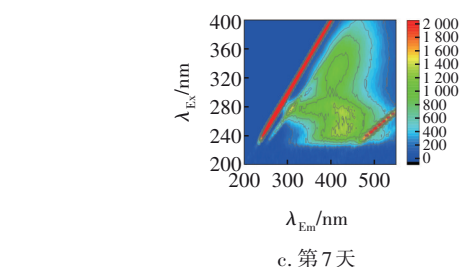
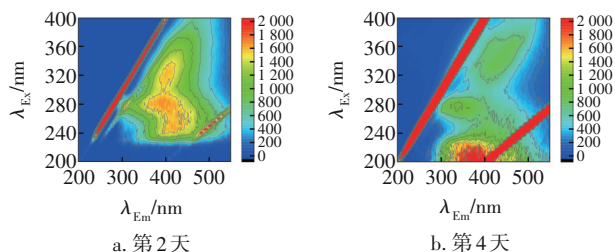


图5 进水冲击前后的三维荧光光谱

Fig.5 Three-dimensional fluorescence spectrum before and after wastewater impact

2.3 污泥菌群

活性污泥是一种微生物群体,由多种细菌、藻类、真菌、原生动物等组成,消毒剂无疑也会对活性污泥菌群的相对丰度等产生影响。为了研究消毒剂冲击前后活性污泥菌群的变化,使用16S rRNA和ITS技术对1、3、7、10、12 d的活性污泥样品进行检测,以探究细菌和真菌的相对丰度变化。细菌是活性污泥净化功能最活跃的成分,污水中可溶性有机物直接被微生物摄取,并被代谢分解为无机物。细菌的相对丰度可以清晰地展示不同时序下活性污泥微生物的特性。图6为细菌在门水平和属水平的相对丰度。可以看出,在门水平上,活性污泥的细菌群落中优势菌群有10个,分别为类杆菌门(*Bacteroidetes*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、乳杆菌门(*Parcubacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、浮霉菌门(*Planctomycetes*)、*Candidatus_Saccharibacteria*、放线菌门(*Actinobacteria*)、拟杆菌门(*Firmicutes*)和未分类细菌门(*unclassified_Bacteria*)。类杆菌门和变形菌门的相对丰度总和超过80%,是活性污泥细菌群落的最优势菌群。变形菌门是降解有机物的主要菌种,其相对丰度从进水前的41.37%下降到了39.09%,然后逐步恢复并稳定在43.13%以上。这与COD去除率的变化一致。在属水平上,活性污泥的细菌群落中优势菌群有17个,包括嗜热单胞菌属(*Thermomonas*)、硝化螺菌属(*Parcubacteria_genera_incertae_sedis*)、*Defluviicoccus*、孤岛杆菌(*Dokdonella*)、*Aridibacter*、罗河杆菌(*Rhodanobacter*)、*Saccharibacteria_genera_incertae_sedis*、脱氯单胞菌属(*Dechloromonas*)、*unclassified_Chitinophagaceae*、未分类拟杆菌属(*unclassified_Bacteroidetes*)、未分类红环菌属(*unclassified_Rhodocyclaceae*)、*unclassified_Comamonadaceae*、*unclassified_Sphingobacteriales*、未分类黄单胞菌属

(unclassified_Xanthomonadaceae)、unclassified_Betaproteobacteria、(unclassified_Gammaproteobacteria) 和未分类细菌 (unclassified_Bacteria)。

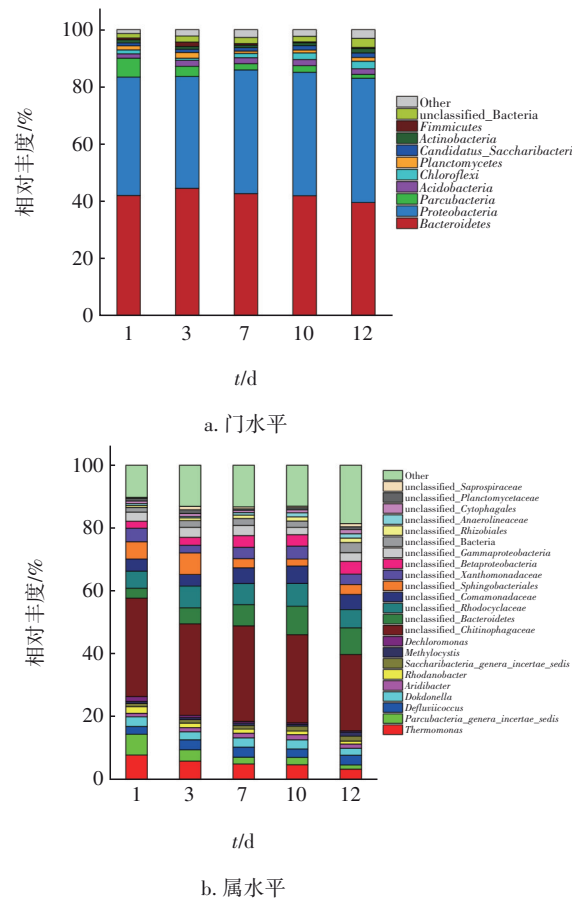


图6 细菌在门水平和属水平的相对丰度

Fig.6 Relative abundance of bacteria at phylum and genus levels

图7为COD与氨氮去除率在细菌属水平上的相关性。可以看出,与COD去除率有较大相关性的细菌为 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis*、*Methylocystis*、unclassified_ *Bacteroidetes*、unclassified_ *Comamonadaceae*、unclassified_ *Rhizobiales*、unclassified_ *Anaerolineaceae*、unclassified_ *Cytophagales*。与氨氮去除率相关性较大的为 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis*、*Aridibacter*、*Methylocystis*、unclassified_ *Bacteroidetes*、unclassified_ *Comamonadaceae*、unclassified_ *Rhizobiales*、unclassified_ *Anaerolineaceae*、unclassified_ *Cytophagales*、unclassified_ *Rhodocyclaceae*。通过对比发现,两者的菌种较为一致,可以说明部分细菌可能具有同时去除COD与氨氮的作用。

细菌多样性指数见表1。可以看出,微生物细

菌群落多样性表现出了先增大后稳定的趋势。这可能是由于进水带来了新的菌种,导致了多样性增加。而3 d以后,多样性没有过多变化,可能是由于消毒剂对于细菌的杀灭作用较为广谱,从而造成相对丰度和多样性没有太大变化。

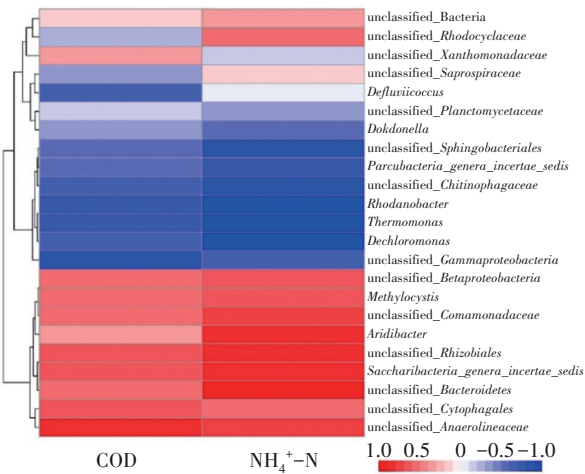


图7 COD与氨氮去除率在细菌属水平上的相关性

Fig.7 Correlation of COD and ammonia nitrogen removal rates at genus level of bacteria

表1 细菌多样性指数

Tab.1 Diversity index of bacteria

时间/d	Ace	Chao	Shannon
1	619.70	688.50	3.90
3	741.75	744.60	4.21
7	744.98	747.28	4.15
10	731.62	736.36	4.13
12	736.73	746.32	4.55

真菌在门水平和属水平的相对丰度如图8所示。可以看出,在门水平上,活性污泥的真菌群落中优势菌群有6个,分别为罗兹菌门(*Rozellomycota*)、子囊菌门(*Ascomycota*)、壶菌门(*Chytridiomycota*)、担子菌门(*Basidiomycota*)、被孢霉门(*Mortierellomycota*)和未分类真菌门(unclassified_Fungi)。在属水平上,真菌群落的优势菌群有10个,分别为钉孢属(*Passalora*)、*Boothiomyces*、曲霉属(*Aspergillus*)、*Verrucoconiothyrium*、*Mrakia*、支顶孢属(*Acremonium*)、未分类的罗兹菌属(unclassified_ *Rozellomycota*)、unclassified_ *Lobulomycetales*、未分类的真菌属(unclassified_Fungi)和未分类的曲霉属(unclassified_ *Aspergillaceae*)。

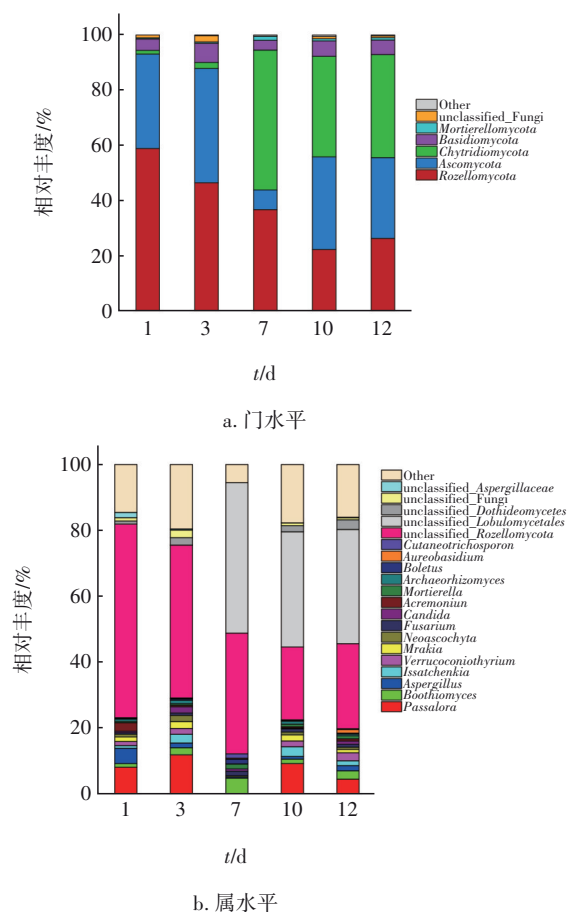


图8 真菌在门水平和属水平的相对丰度

Fig.8 Relative abundance of fungi at phylum and genus levels

COD与氨氮去除率在真菌属水平上的相关性如图9所示。

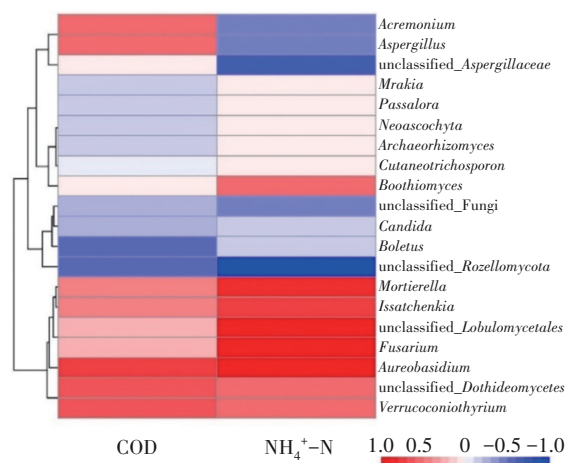


图9 COD与氨氮去除率在真菌属水平上的相关性

Fig.9 Correlation of COD and ammonia nitrogen removal rates at genus level of fungi

从图9可以看出,与COD去除率有较大相关性

的真菌为*Issatchenkia*、*Verrucoconiothyrium*、*Mortierella*、*Aureobasidium*和*unclassified_Dothideomycetes*。与氨氮去除率有较大相关性的为*Mortierella*、*unclassified_Lobulomycetales*、*Fusarium*、*Aureobasidium*、*Boothiomyces*。两者的菌种差异较大,可以说明部分真菌可能无法同时去除COD与氨氮。

真菌的多样性指数见表2。可知,微生物真菌群落多样性表现出先缓慢增加后急剧下降再上升恢复的趋势。受到消毒剂冲击后,第7天污泥多样性急剧减少,说明消毒剂对真菌具有差异性杀灭作用。此后多样性不断增加,说明真菌系统逐步适应了消毒剂的冲击作用,群落多样性逐渐恢复。

表2 真菌的多样性指数

Tab.2 Diversity index of fungi

时间/d	Ace	Chao	Shannon
1	213.38	213.08	2.61
3	242.09	240.96	3.10
7	44.00	44.00	1.72
10	235.36	235.25	2.96
12	242.56	243.67	3.01

2.4 应对措施

针对优化MBR工艺以应对消毒剂的冲击,提出以下3点建议:①降低消毒剂浓度,如适当增加蓄水池的停留时间,调节水质并自然降解掉部分消毒剂;可以在蓄水池中增加曝气装置,通过好氧工艺去除部分消毒剂;依据消毒防疫要求,在高浓度消毒下,多进行自来水稀释,以减缓消毒剂浓度的冲击负荷。②增加营养物质,可以投加一定量的碳源、氮源、磷源等,保持污泥的活性和增殖能力。③MBR间歇运行,如可设置成白天产水、晚上停止的模式,削弱消毒剂的冲击作用,逐渐形成生化系统对消毒剂的适应能力。

3 结论

消毒废水的冲击可对MBR系统产生明显影响,出水中存在明显的碎泥,且TMP显著升高;采用三维荧光光谱表征了冲击前后出水中DOM的成分与浓度,结果表明水质恶化与工况变化相吻合;分析了冲击前后细菌和真菌的相对丰度,并根据相关性分析筛选出了污泥中受冲击影响相关性较大的菌属。结合上述分析,可以分别从降低消毒剂浓度、增加营养物质和调节MBR间歇运行方式来加以应对,以尽可能削弱消毒剂的冲击效应。

参考文献:

- [1] 许燕滨. 规模化畜禽养殖废水深度处理关键技术研究、装备开发及产业化[J]. 中国环保产业, 2022(2): 41-42.
XU Yanbin. Research on key technology for advanced treatment of large-scale livestock and poultry breeding wastewater and its equipment development and industrialization [J]. China Environmental Protection Industry, 2022(2): 41-42(in Chinese).
- [2] 张少源, 朱伟清, 刘国强, 等. 畜牧养殖场畜禽消毒对污水处理系统的影响分析及对策探讨[J]. 科技创新与应用, 2017(9): 183.
ZHANG Shaoyuan, ZHU Weiqing, LIU Guoqiang, *et al.* Analysis and countermeasure discussion on the impact of livestock house disinfection on sewage treatment system in livestock farms [J]. Technological Innovation and Application, 2017(9): 183(in Chinese).
- [3] 李志华, 高兴东, 杭振宇, 等. 含氯消毒液对活性污泥的影响及其应对措施[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 28-32.
LI Zhihua, GAO Xingdong, HANG Zhenyu, *et al.* Effect of chlorine disinfectant on activated sludge and its countermeasures[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 28-32(in Chinese).
- [4] 孙明. NaClO 在线清洗引发 MBR 生物膜污染行为解析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
SUN Ming. Analysis of the Biofouling Behavior Induced by NaClO In-situ Cleaning in Membrane Bioreactor [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019 (in Chinese).
- [5] ZHANG W J, YANG P, XIAO P, *et al.* Dynamic variation in physicochemical properties of activated sludge floc from different WWTPs and its influence on sludge dewaterability and settleability [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 467: 124-134.
- [6] 李舒涵, 刘琛, 唐翔宇, 等. 果园生态养鸡鸡粪 DOM 的淋溶特征及其对抗生素迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 37-46.
LI Shuhan, LIU Chen, TANG Xiangyu, *et al.* Leaching characteristics of dissolved organic matter in chicken manure and its effect on antibiotic migration in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 37-46(in Chinese).
- [7] 张超, 覃敏杰, 徐冰心, 等. 工业废水冲击负荷对污水处理厂 AAO 工艺运行影响的对策[J]. 净水技术, 2017, 36(7): 67-70, 86.
ZHANG Chao, QIN Minjie, XU Bingxin, *et al.* Countermeasure of impact load of industrial wastewater on operation of AAO process in WWTP [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(7): 67-70, 86 (in Chinese).
- [8] 黄晓遇, 储昭瑞, 荣宏伟, 等. 低剂量长波紫外胁迫下活性污泥硝化活性及氧化应激响应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5613-5619.
HUANG Xiaoyu, CHU Zhaorui, RONG Hongwei, *et al.* Effect of low-dose ultraviolet-A (UVA) irradiation on nitrification activity of activated sludge and oxidative stress response [J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5613-5619(in Chinese).
- [9] 钱光磊, 谢陈鑫, 滕厚开, 等. 曝气对管式 MBR 膜污染及临界通量影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4542-4548.
QIAN Guanglei, XIE Chenxin, TENG Houkai, *et al.* Effect of aeration on membrane fouling and critical flux in microfiltration tubular membranes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(8): 4542-4548(in Chinese).
- [10] CAO L, NI L, QI L, *et al.* The application of post-denitrification fixed biofilm reactor for polishing secondary effluent: nitrate removal, soluble microbial products and micropollutants biotransformation [J]. Bioresource Technology, 2023, 369: 128511.
- [11] HUANG X, LIU R, QIAN Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2000, 36(5): 401-406.
- [12] CAI W W, HAN J R, ZHANG X R, *et al.* Formation mechanisms of emerging organic contaminants during on-line membrane cleaning with NaOCl in MBR [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 386: 121966.

作者简介: 姚维昊(1994-), 男, 江苏扬州人, 博士, 工程师, 主要研究方向为膜分离技术和电子行业水处理技术。

E-mail: ywy121@vip.qq.com

收稿日期: 2023-10-16

修回日期: 2024-01-08

(编辑: 任莹莹)