

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.016

低温下真空紫外氧化联合 ABR 处理餐饮废水

郑建军¹, 蒋轶锋², 敖慧²

(1. 浙江工商大学 环保设计研究院, 浙江 杭州 310005; 2. 浙江工业大学 环境学院,
浙江 杭州 310032)

摘要: 含油餐饮废水成分复杂且存在水量波动,造成行业常用的隔油器出水普遍存在超标纳管问题。采用真空紫外氧化-厌氧折流板反应器(VUV-ABR)组合新工艺对某实际废水开展秋冬季低温条件下的联合处理。结果表明,在高压VUV辐照及必要的水力搅拌(内循环流量为4.5 L/min)辅助下,油脂可被快速光解,而对洗涤剂 and COD 的去除效果较差,15和60 min 时对三者的去除率分别为83%、17%、19%和84%、28%、28%。水力搅拌能促进近灯区活性物质的扩散及反应,但空气或氮气曝气气泡对VUV的强烈吸收会严重阻碍光氧化反应的发生。不饱和油脂主要通过直接光解去除,洗涤剂 and COD 还与光激发氧化有关。同时考察了VUV联合ABR在水力负荷渐变下的处理性能,发现在水温为8~15℃、光照为15 min、厌氧HRT为18 h条件下,其对油脂、COD、BOD₅的去除率分别比单独ABR提高了约46%、15%和27%,协同系数分别为2.0、1.3和1.6,出水水质达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。组合工艺中VUV和ABR各尽所长又相互协作,前者占地小、操作方便,还可消除油脂对厌氧代谢的抑制作用;后者则弥补了VUV氧化和矿化效果差的弱点;VUV对油脂和COD去除的贡献率分别为91%和28%。

关键词: 餐饮废水; 真空紫外; 厌氧折流板反应器; 低温; 纳管排放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0102-07

Vacuum Ultraviolet Oxidation in Combination with Anaerobic Baffle Reactor for Restaurant Wastewater Treatment at Low Temperature

ZHENG Jian-jun¹, JIANG Yi-feng², AO Hui²

(1. Design and Research Institute of Environment Protection, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310005, China; 2. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: The composition of oily restaurant wastewater is intricate and the wastewater volume fluctuates significantly, thereby causing the phenomenon that the effluent of the oil separator commonly utilized in catering industry frequently exceeds the discharge standard to municipal sewers. The novel combined process of vacuum ultraviolet oxidation and anaerobic baffle reactor (VUV-ABR) was employed to treat actual restaurant wastewater at the low temperature during autumn and winter. With the assistance of high-energy VUV irradiation and requisite hydraulic agitation (internal cycle flow of 4.5 L/min), the fats could be rapidly photolyzed. However, the removal performance of detergent and COD was unsatisfactory. The removal efficiencies of the three were 83%, 17%, and 19% at 15 minutes, and 84%, 28%, and 28% at

通信作者: 蒋轶锋 E-mail: jyf@zjut.edu.cn

60 minutes, respectively. The hydraulic agitation facilitated the diffusion and reaction of active substances in the vicinity of the lamp area. However, aeration with air or nitrogen severely impeded the occurrence of photooxidation due to the intense absorption of VUV by gas bubbles. Unsaturated fats were predominantly eliminated through direct photolysis, and detergents as well as COD were also associated with photoexcited oxidation. Simultaneously, the treatment performance of VUV in combination with ABR under the gradient of hydraulic load was explored. It was discovered that the removal efficiencies of fats, COD, and BOD_5 of VUV combined with ABR under the circumstances of 8–15 °C, 15 minutes of light exposure, and 18 hours of anaerobic HRT were enhanced by 46%, 15%, and 27% respectively compared to ABR alone. The synergetic coefficients were 2.0, 1.3, and 1.6 respectively, and the effluent quality met the limits specified in *Wastewater Quality Standards for Discharge to Municipal Sewers* (GB/T 31962–2015). In the combined process, VUV and ABR collaborated with each other. The former occupied a small area, was convenient to operate, and could eliminate the inhibition of fats on anaerobic metabolism. The latter compensated for the deficiency of the poor oxidation and mineralization performance of VUV. The contribution ratios of VUV to the removal of fats and COD were 91% and 28% respectively.

Key words: restaurant wastewater; vacuum ultraviolet; anaerobic baffle reactor; low temperature; discharge to municipal sewers

餐饮行业是我国扩大内需、拉动消费的重要经济增长点,尤其在疫情期更凸显其稳就业、促民生的重要社会功能。但众多分散经营的各式餐馆也会产生数量可观的含油废水,且常伴有排水量波动、成分复杂、污染物浓度较高等特点,造成当前行业配套的重力法隔油器对油、水、固的分离效果(尤其是胶体和溶解态污染物的去除能力)不佳;设施出水中普遍存在 SS、COD、动植物油、阴离子洗涤剂超标纳管问题,给业主经营和政府监管造成了巨大压力^[1-2]。

虽然污水处理技术门类丰富,但餐饮废水的适用性研究还处于发展阶段,市面上仍缺乏可大规模推广的工艺与装备。在研的物理法和物化法一般侧重于对水中油分和固形物的移除,而生物法则偏向于对溶解性有机物和营养盐的去除^[3]。混凝、吸附等流程短,但对污染物的去除不够彻底,且易产生二次污染;电凝聚法能同时去除多种污染物,但还存在着电极损耗、油脂对极板污染和电化学污泥等工程化瓶颈;生物法成本低、环境友好,是餐饮废水处理不可或缺的技术选择,然而乳化油、浮渣、表面活性剂等对好氧工艺控制及污泥代谢和沉降性均具有较多负面影响^[1-3]。

厌氧技术不失为一种餐饮废水的绿色处理方法,但相关报道还较鲜见^[3-5]。笔者在前期工作的基

础上^[4-5],继续深入探讨厌氧折流板反应器(ABR)在秋冬季低温条件下对餐饮废水的处理性能。考虑到厌氧法目前还面临着容积负荷低(需加温)、油脂包裹污泥上浮、长链脂肪酸抑制、反应器酸化等限制工艺长效运行的关键难题^[5],尝试引入真空紫外(VUV)直接光照工艺,利用其高能 185 nm 和常规 254 nm 两个主波长对废水中的油脂及其烹调过程的热氧化产物(如醛、酮、酸、烷烃),以及蛋白质、洗涤剂、淀粉、纤维素等污染物,开展基于直接光解和光激发氧化原理的预处理。由此建立的 VUV-ABR 组合工艺还针对餐饮业非稳态排水模式及紫外、生物单元的工作特点,设计了 VUV 间歇进出水与连续流 ABR 相耦合的运转方式,以避免餐饮废水水质水量变化对 ABR 的冲击,从而提高联合系统的综合运行效能。

1 材料和方法

1.1 试验装置

ABR 反应器尺寸为 30 cm×8 cm×26 cm(扣除壁厚),有效容积约为 6.2 L,结构如图 1 所示。内部通过竖向折流板隔成 3 室,上、下向流室宽度比为 4:1;下向流室底部 45°导流板依次将废水引至上流室底部中心位置;装置上部设三相分离器,以防止跑泥并同时收集厌氧产气。ABR 在室温下运转,避免中高温操作的额外能耗。

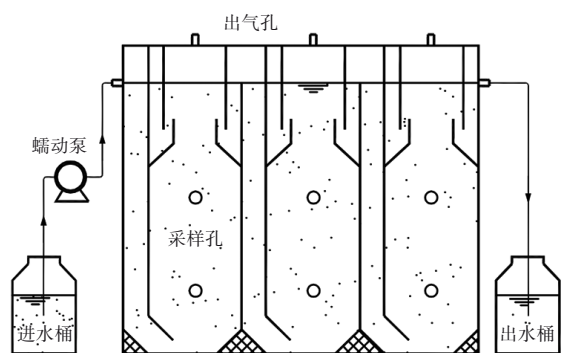


图1 ABR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of ABR device

VUV装置如图2所示,其由低压汞灯、光反应器及附属设备构成。灯源采用贺利氏UV-185,其185、254 nm典型紫外线效率分别为6%和40%,1 m处光强为225 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。汞灯外设方柱形有机玻璃反应器,底面积为38 cm^2 、高为120 cm,有效容积为4.1 L。此外,为保障贴近VUV灯管区物料的扩散与反应,试验采用水泵内循环和外部鼓气等方式来调节液体搅拌的动力方式及强度。

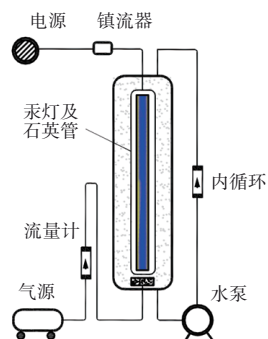


图2 VUV装置示意

Fig.2 Schematic diagram of VUV device

1.2 餐饮废水

试验原水取自长三角某西式快餐店三仓隔油池,pH呈弱酸性。餐饮废水水质及纳管标准见表1。由于该门店间歇排水高峰常集中在中午和晚间两个时段,因而导致该环保设施出水中除氮、磷外,有机物、油脂、洗涤剂指标均超出《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015),有进一步处理的迫切需求。

试验中常规水质指标参照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。油脂采用紫外分光光度法进行测定^[6]。合成洗涤剂按改进后的亚甲基蓝分光光度法进行测定^[7]。

表1 餐饮废水水质及纳管标准

Tab.1 Quality of restaurant wastewater and its discharge standard

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	油脂	洗涤剂
浓度	1 095~	640~	9~28	19~	5.1~	208~	25~52
范围	2 315	1 868		38	7.6	346	
均值	1 694	988	14	25	6.2	302	31
纳管标准	≤500	≤350	≤45	≤70	≤8	≤100	≤20

1.3 试验方法

VUV氧化单元操作参数见表2。试验首先考察持续光照下辐照时间、搅拌方式和强度(水力搅拌/曝气)等不同工况对VUV氧化餐饮废水的影响,进而基于ABR耦合原理优化操作参数。VUV装置根据门店非稳态排水特点采用序批式工作模式,使其既具有水量调蓄和水质预处理作用,又能在节电模式时为下游连续流ABR储备高品质的进水底物。反应期间,原水pH不作调节,其值为5.1~5.9;水温则由于汞灯工作发热而逐步进行升高,120 min后一般不超过40 $^{\circ}\text{C}$ 。

表2 VUV氧化单元操作参数

Tab.2 Operational parameters of VUV oxidation unit

项目	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 V
内循环水力搅拌流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	4.5	0~4.5	4.5	4.5	无
曝气类型及强度	无	无	氮气2 L/min	空气2 L/min	空气0~2 L/min

同时运行的ABR种泥取自实验室厌氧反应器,污泥体积约占各隔室1/3,后续在HRT为24 h下完成常温启动和稳定运行。后期,随着秋冬季节温度的降低,ABR对油脂和COD的降解受到抑制,去除率分别降至43%和42%左右。在此基础上,试验通过将VUV单元出水引入到ABR进水桶的方式,构建VUV-ABR联合系统。为进一步改善ABR的进水条件,桶内弱酸性餐饮废水预先用 NaHCO_3 溶液调节pH至6.5左右,使其与联合前的ABR保持一致。VUV-ABR连续运行40 d,期间VUV光照时间(15 min)及内循环流量(4.5 L/min)保持不变,而ABR厌氧HRT则根据运行情况每隔10 d进行梯度下调(24 h→18 h→12 h→6 h),重点关注秋冬恶劣期VUV预处理对ABR净化餐饮废水的影响,初步探讨组合工

艺协同去除污染物的机制。

2 结果与讨论

2.1 VUV 氧化预处理餐饮废水

2.1.1 光照时间的影响

在工况 I 条件下,考察 VUV 光照时间对油脂、洗涤剂 and COD 等超标污染物去除效果的影响。结果表明,VUV 对油脂的去除能力良好,如图 3 所示。15 min 后油脂浓度迅速从 304 mg/L 降至 52 mg/L 左右,去除率为 83%,后期基本稳定,去除率保持在 84%。鉴于该店主要供应汉堡、薯条、炸鸡等,废水中存在着多种动植物脂质混合物。其中的脂肪酸大多含有不饱和双键且常为多双键结构,一般还具有共轭烯酮结构,其共轭键越多紫外吸收的波长也越长。在试验灯源辐射下,原水中油脂等不饱和(尤其是共轭结构)有机物,更易直接吸收光子而引发直接光解和自敏化光解反应,继而断键生成其他中间产物。

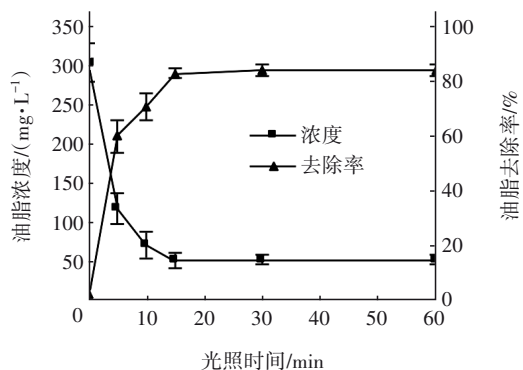


图 3 VUV 光照时间对油脂去除效果的影响

Fig.3 Effect of VUV irradiation time on fats removal

相较而言,主要成分为十二烷基苯磺酸钠的洗涤剂难以被 VUV 氧化,如图 4 所示。

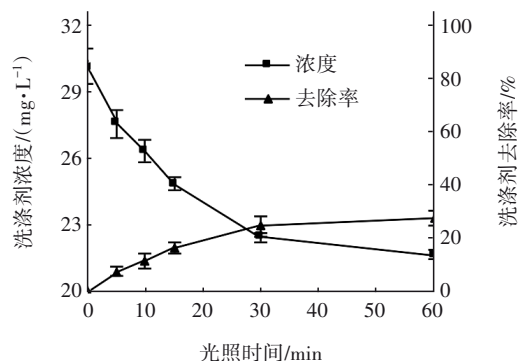


图 4 VUV 光照时间对洗涤剂去除效果的影响

Fig.4 Effect of VUV irradiation time on detergent removal

从图 4 可以看出,经 15、30、60 min 处理后,洗涤剂浓度仅分别下降约 5.3、7.7 和 8.5 mg/L,去除率分别为 17%、25% 和 28%。高压紫外灯射线同样无法直接氧化配水中的洗涤剂,只有在 O_3 和 H_2O_2 参与下产生 $\cdot OH$ 才能有效破坏该直链烷基化合物。本试验中去除率虽不高,但暗示 VUV 体系中存在直接光解之外的间接氧化机制,即高能 VUV (6.7 eV) 通过原位光解 H_2O 、 O_2 生成 $\cdot OH$ 、 O_3 等活性物质后激发的反应。

油脂、洗涤剂和其他还原性物质的氧化共同导致 COD 下降,如图 5 所示。可以看出,经 15、30、60、120 min 处理后,COD 浓度分别下降了 286、364、420 和 550 mg/L,去除率分别为 19%、24%、28%、36%,表明 VUV 的氧化能力较弱,且其动力学和量子效率随反应进行而不断下降。不饱和油脂、蛋白质等光解形成的中间产物连同原水中洗涤剂、纤维素、淀粉、葡萄糖(无紫外吸收)等均不易被 VUV 彻底矿化。在持续辐照下,直接光解机制会因为光敏性物质的快速分解而弱化消退,间接氧化因此成为后期去除 COD 的唯一力量。因此,VUV 辐照法虽然操作简单、条件温和、对油脂的光解能力出众,但由于其存在有机物氧化和矿化效果较差的缺陷而有必要通过 ABR 的联合运行来加以弥补。

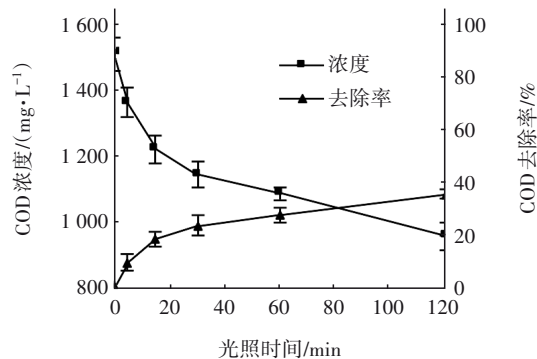


图 5 VUV 光照时间对 COD 去除效果的影响

Fig.5 Effect of VUV irradiation time on COD removal

2.1.2 搅拌方式和强度的影响

VUV 穿透力弱,靠近灯管 5.5 mm 厚水层就可吸收大于 90% 的光子^[8]。因而,试验在工况 II~V 下考察了水力搅拌、曝气等不同搅拌方式和强度对光氧化性能的影响。图 6 为内循环流量对 COD 去除效果的影响。可知,随着工况 II 内循环流量从 0 增加到 4.5 L/min,120 min 后 COD 去除率从 4% 稳步提升至 31% 左右。说明水力搅拌在持续强化流体紊流

的同时促进了物料的传质反应速率,一定程度上克服了近灯区水层内新生自由基反应快、停留时间短、难以向远灯区扩散的瓶颈^[8]。

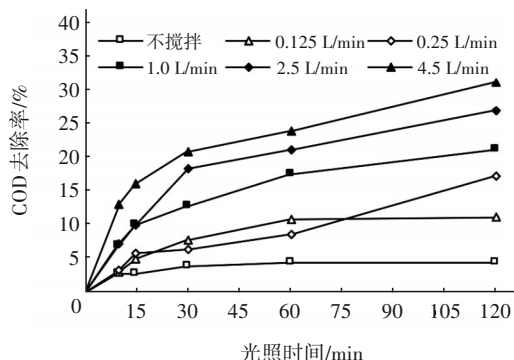


图6 内循环流量对COD去除效果的影响

Fig.6 Effect of internal cycle flow on COD removal

相比而言,水力搅拌对油脂的影响有限。试验结果表明,在0、0.25 L/min内循环流量下,15 min后油脂去除率分别约为63%和85%,与2.5和4.5 L/min时的90%、89%相差不大。这暗示近灯区活性物质的扩散混合并不是油脂分解的限制性因子,分析认为这与其主要通过直接光解而非间接氧化路径实现去除的机理有关。考虑到实际废水中油脂分散不均且多以溶解、乳化、悬浮等形态存在,因而适度的搅拌对于它的有效光解也是必要的。

为进一步提高VUV对COD的间接氧化效率,还探讨了水力搅拌下额外的氮气或空气曝气的强化效应。结果事与愿违,向装置中鼓入2 L/min的氮气(工况Ⅲ)不仅未能改善COD的去除效果,反而引发了明显的抑制作用,且随着时间的延长这种作用不断加剧,如图7所示。这种现象即使在工况Ⅳ含氧空气气源下也未能得到丝毫缓解,表明曝气虽有助于进一步推动流体交换和物料混合,但同时也极大损害了VUV原位催生活性物质及其对COD的氧化进程。该结果与张大超等^[9]的报道不符,推测这应该与试验采用了砂芯空气扩散器有关,其鼓出的肉眼可见的气泡无法像微纳米气泡一样提供污染物与自由基反应的位点,反而由于气相中O₂、N₂、CO₂介质对VUV的强烈吸收作用抑制了水分子和液相污染物对光能的利用。正如工况Ⅴ的试验结果,即在水力搅拌的单纯空气曝气模式下,无论气体流量大小(0、0.5、1、2 L/min),经120 min光照后COD去除率都仅能达到3%~5%。

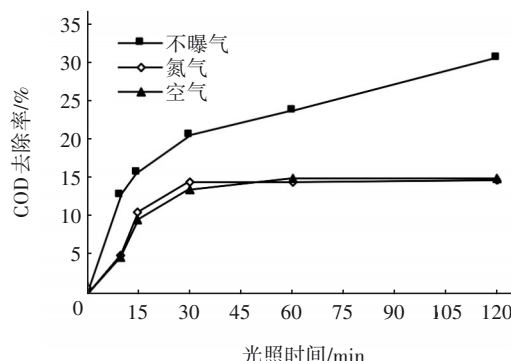


图7 水力搅拌下曝气对COD去除效果的影响

Fig.7 Effect of aeration on COD removal coupled with hydraulic agitation

2.2 VUV-ABR联合处理餐饮废水

综上所述,VUV能快速光解原水中不饱和有机物,但对中间产物和COD的矿化效果不佳,实操中无法通过延长光照时间而使水质达到纳管标准。同时,如1.3节所述ABR也因秋冬季来临导致油脂和COD的去除率不断下降至43%和42%左右。为使VUV和ABR各自扬长避短,将二者进行组合,形成新型的VUV-ABR工艺,考察其在低温及不同HRT下的处理性能。

2.2.1 对油脂的去除效果

VUV-ABR对油脂的去除效果稳定而高效。在进水浓度为208~346 mg/L条件下,出水浓度基本在35 mg/L左右且与厌氧HRT的关系不大,去除率由联合前的43%大幅提升至89%(87%~93%)。这无疑要归功于VUV单元约83%的预处理效率。从工艺协同角度考虑,除油后的VUV出水不仅极大地减轻了后续ABR的负担,而且还消除了长链脂肪酸、甘油三酸酯、磷脂等对厌氧代谢的抑制作用,缓解了油脂污泥上浮、反应器酸化等潜在风险,有利于联合系统的长效运行。

2.2.2 对有机物的去除效果

VUV的介入同样改善了ABR对COD的去除效果,如图8所示。在1~10 d、HRT为24 h条件下,出水COD在565~891 mg/L范围波动,平均去除率由组合前的42%提高到57%。虽然期间水温已降至11~14℃,但ABR并未出现低于15℃时生化速率显著下降、出水溶解性代谢产物累积的现象。

BOD₅的变化如图9所示。可知,1~10 d出水BOD₅在260~410 mg/L,平均去除率在60%以上。出水pH为6.6~6.9,暗示ABR的厌氧代谢及底物的水

解发酵进程正常。VUV对进水中大部分油脂及部分洗涤剂、COD的氧化为ABR的正常运行建立了屏障。当然,残存的 BOD_5 表明ABR未能彻底去除水中易降解的底物。由此,在11~20 d将HRT调降至18 h以改善ABR的水力流态及处理效果。结果发现,COD和 BOD_5 的平均去除率不降反升,分别达到68%和74%,且后期出水浓度分别低于500和350 mg/L的纳管限值。该结果说明ABR隔室中上升流速的增加强化了泥水间的混合与接触反应,导致半饱和常数及出水底物浓度减小。

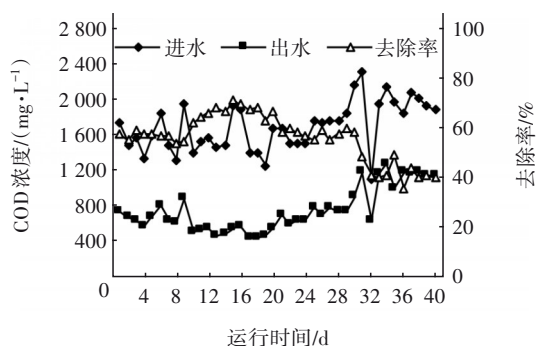
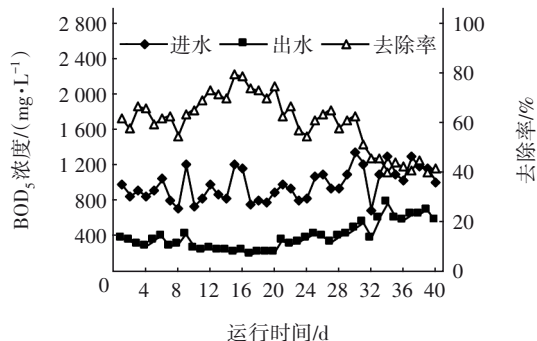


图8 COD的变化

Fig.8 Change of COD concentration

图9 BOD_5 的变化Fig.9 Change of BOD_5 concentration

第21天时将HRT缩短至12 h,结果发现此时传质增强的效益却未能弥补水力负荷上升给ABR造成的冲击,COD、 BOD_5 去除率分别下降约12%和13%。尤其在第31天将HRT缩短至6 h后,ABR单元在较高进水负荷[$6.9 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,以COD计]及低温($<10^\circ\text{C}$)的双重胁迫下,有机物的厌氧发酵过程受到明显抑制,COD和 BOD_5 的去除率不断下降至40%和44%左右,且伴随有ABR酸化的趋势,其出水pH由先前的6.6~7.0逐步波动下降至6.3~6.7。

2.2.3 工艺单元的协同作用

结合文献[5]的结果,表3总结了秋冬季单独

ABR与VUV-ABR组合工艺对油脂和有机物的去除效果。在HRT分别为24、18、12和6 h条件下,单独ABR的处理效果均不理想,不同污染指标的去除率基本在50%以下。虽然原水B/C值在0.6左右,但低温和油脂抑制造成ABR在处理中、低浓度餐饮废水(相比高浓度有机废水)时的反应速率和负荷难以得到提高。相比之下,VUV-ABR组合工艺仅设置15 min的紫外辐照,就使得油脂、COD、 BOD_5 的去除率分别提升了46%、15%和27%(HRT为18 h)。

表3 ABR和VUV-ABR对污染物的去除效果

Tab.3 Removal effect of pollutants by ABR and VUV-ABR systems

工艺	HRT	油脂去除率/%	COD去除率/%	BOD_5 去除率/%	VUV协同系数
VUV-ABR	15 min+	89	57	62	2.1、1.2
ABR	24 h				
VUV-ABR	15 min+	91	68	74	2.0、1.3、1.6
ABR	18 h				
VUV-ABR	15 min+	89	56	61	2.2、1.3
ABR	12 h				
VUV-ABR	15 min+6 h	89	40	44	2.5、1.3
ABR	6 h				

以ABR和VUV-ABR对油脂、COD、 BOD_5 的去除率分别为分母和分子,得到VUV的协同系数分别为2.0~2.5、1.2~1.3、1.6,协同收益排序为油脂 $>$ BOD_5 $>$ COD。VUV对COD和洗涤剂尤其是油脂的预处理(15 min时去除率分别为19%、17%、83%)为后续厌氧提供了良好的进水条件,而体现分阶段多相厌氧思路的ABR则借助吸附、过滤、碳梯度转化等将溶解、胶体、悬浮态的光氧化产物和剩余有机物进行二次降解,并于HRT为18 h的较优工况下收获分别约8%、49%的油脂和COD去除率。由此,联合系统中VUV和ABR对油脂、COD去除的贡献率分别为91%、28%和9%、72%,说明化学和生物二者联合后具有既扬长避短又相互弥补不足的特点。此时,油脂、COD、 BOD_5 等快餐店隔油池主要的超标污染物指标均已满足纳管排放要求。

3 结论

① VUV直接辐照能快速去除原水中的油脂,

但对洗涤剂 and COD 的去除效果不佳,在内循环流量为 4.5 L/min 的辅助下,3 种污染物的氧化速率均呈现先快后慢的下降趋势,15、30、60 min 时对油脂的去除率分别为 83%、84%、84%,对洗涤剂的去除率分别为 17%、25%、28%,对 COD 的去除率分别为 19%、24%、28%。

② 增加水力搅拌强度能促进 VUV 近灯区活性物质扩散及其对 COD 和油脂的去除,但砂芯曝气所产气泡对 VUV 的吸收作用会危害光氧化的进行。油脂等不饱和有机物主要通过直接光解被去除,洗涤剂 and COD 还与 VUV 的间接氧化机理有关。

③ 在水温 <15 °C、光照 15 min、厌氧 HRT 为 18 h 的条件下,VUV-ABR 组合工艺对餐饮废水油脂、COD、BOD₅ 的去除率分别为 91%、68% 和 74%,比单独 ABR 增加了 46%、15% 和 27%,出水水质达到纳管排放标准。

④ VUV-ABR 组合工艺操作方便、条件温和,且具有单元协同优点,VUV 对油脂、COD、BOD₅ 的协同系数分别为 2.0~2.5、1.2~1.3、1.6。在厌氧、HRT 为 18 h 条件下,VUV 和 ABR 各司其职,VUV 对油脂去除的贡献率为 91%,ABR 对 COD 去除的贡献率为 72%。

参考文献:

- [1] 蒋轶锋,王和阳,程凌峰.序批式生物膜反应器预处理餐饮废水的性能[J].中国给水排水,2019,35(19):116-120.
JIANG Yifeng, WANG Heyang, CHENG Lingfeng. Performance of sequencing batch biofilm reactor for pretreatment of restaurant wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 116-120 (in Chinese).
- [2] 周俊,鄢恒珍,侯康龙,等.固定粒子三维电解法处理餐饮废水的研究[J].中国给水排水,2016,32(7):78-81.
ZHOU Jun, YAN Hengzhen, HOU Kanglong, et al. Treatment of restaurant wastewater by fixed particle three-dimensional electrode process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(7): 78-81 (in Chinese).
- [3] 毛雪梅.多维曝气 SBBR 工艺处理餐饮废水实验研究[D].重庆:重庆工商大学,2014.
MAO Xuemei. Experimental Study of MDA SBBR for Treating Restaurant Wastewater [D]. Chongqing: Chongqing

- Technology and Business University, 2014 (in Chinese).
- [4] 蒋轶锋,李强,任千里.常温厌氧折流板反应器预处理餐饮废水性能[J].水处理技术,2020,46(5):111-114,120.
JIANG Yifeng, LI Qiang, REN Qianli. Performance of ABR for restaurant wastewater pretreatment at normal temperature [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(5): 111-114, 120 (in Chinese).
- [5] 孙洛. VUV-ABR 联合工艺处理含油餐饮废水性能 [D]. 杭州:浙江工业大学,2021.
SUN Luo. Performance of VUV-ABR Combined Process for Treating Oily Restaurant Wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [6] 董洪霞,周成,杜佳朋.废水中油含量的测定[J].上饶师范学院学报,2015,35(6):48-51,62.
DONG Hongxia, ZHOU Cheng, DU Jiapeng. Measuring oil content in waste water using UV-spectrum [J]. Journal of Shangrao Normal University, 2015, 35(6): 48-51, 62 (in Chinese).
- [7] 凡书杰,岳茂增,孙逸文.水中阴离子合成洗涤剂快速检测方法研究[J].中国标准化,2018(22):209-210.
FAN Shujie, YUE Maozeng, SUN Yiwen. Study on rapid detection method of anionic synthetic detergent in water [J]. China Standardization, 2018(22): 209-210 (in Chinese).
- [8] IMOBERDORF G E, MOHSENI M. Kinetic study and modeling of the vacuum-UV photoinduced degradation of 2,4-D [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 187: 114-122.
- [9] 张大超,陈敏,代振鹏,等.真空紫外/曝气氧化降解苯甲羟肟酸模拟废水[J].化工进展,2017,36(7):2639-2648.
ZHANG Dachao, CHEN Min, DAI Zhenpeng, et al. Effect of oxidative degradation of benzoic acid simulated wastewater by VUV/air [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(7): 2639-2648 (in Chinese).

作者简介:郑建军(1978-),男,浙江余姚人,硕士,高级工程师,主要研究方向为环境影响评价和废水处理技术。

E-mail:362591207@qq.com

收稿日期:2022-12-05

修回日期:2023-01-16

(编辑:任莹莹)