

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.XXXX.XX.001

基于分子生物学的前置生物活性炭工艺除污效能研究

刘唯源¹, 邓博苑¹, 朱海龙¹, 周宇¹, 王雪峰², 董志强³,
李伟英^{1,4}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海浦东威立雅自来水有限公司, 上海 200120; 3. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司, 上海 201906; 4. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 通过实验室小试,开展了前置生物活性炭工艺(PBAC)和常规生物活性炭工艺(CBAC)与砂滤联用时对浊度、氨氮、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、BDOC等污染物指标的去除效果,以及活性炭表面生物量、微生物多样性、群落结构、出水菌落总数等指标异同性的研究。相较于CBAC工艺,PBAC工艺与砂滤联用时对氨氮、 COD_{Mn} 、BDOC的去除率分别提高了5.79%、5.04%、16.07%,对浊度和 UV_{254} 的去除率相近,出水菌落总数下降了53.82%。PBAC工艺活性炭表面微生物量提高了31.11%,且其群落结构特异性显著,所具有的优势菌种较好地发挥了对有机物的降解作用,说明PBAC工艺在保障饮用水化学安全性与生物安全性方面具有较好的效果。

关键词: 前置生物活性炭; 分子生物学; 污染物去除; 菌落总数; 微生物群落结构

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(XXXX)XX-0001-06

Study on the Efficacy of Pre-BAC Process for Pollutant Removal Based on Molecular Biology

LIU Wei-yuan¹, DENG Bo-yuan¹, ZHU Hai-long¹, ZHOU Yu¹, WANG Xue-feng²,
DONG Zhi-qiang³, LI Wei-ying^{1,4}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Pudong Veolia Water Co. Ltd., Shanghai 200120, China; 3. Municipal Environmental Protection Engineering Co. Ltd. of CERC Shanghai Group, Shanghai 201906, China; 4. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: The similarities and differences in the removal of turbidity, ammonia nitrogen, COD_{Mn} , UV_{254} , BDOC and other pollutants, as well as the surface biomass of activated carbon, microbial diversity, community structure, and the total number of bacteria in the corresponding effluent were investigated by combining the pre-BAC process (PBAC) and the conventional BAC process (CBAC) with sand filtration in a small-scale test. Compared to the CBAC process, when PBAC was combined with sand filtration, the removal rates of ammonia nitrogen, COD_{Mn} and BDOC were increased by 5.79%, 5.04% and 16.07%,

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFC3201304); 上海城投水务浦东威立雅自来水有限公司研究项目(kh0040020183231)

通信作者: 李伟英 E-mail: 123lwyktz@tongji.edu.cn

respectively, and the removal rates of turbidity and UV_{254} were similar. The total number of bacteria in the effluent decreased by 53.82% when the PBAC process was combined with sand filtration. The specificity of the community structure was significant, and the dominant species played a better role in the degradation of organic matter, indicating that the PBAC process has a better effect in ensuring the chemical safety and biological stability of drinking water.

Key words: pre-BAC; molecular biology; pollutant removal; total number of bacteria; microbial community structure

生物活性炭(BAC)作为一种深度处理工艺被广泛应用于净水厂之中,其对污染物的去除特性受到活性炭表面微生物数量及其活性的显著影响^[1]。常规BAC工艺(CBAC)通常设置在砂滤池之后,旨在进一步提升砂滤池出水水质。然而,在实际运行过程中,由于前端的混凝、沉淀和砂滤工艺去除了部分有机物^[2],导致BAC工艺进水营养物质浓度较低,这可能会影响并限制活性炭表面的微生物生长,从而降低对有机物的降解效果。另外,BAC工艺中的微生物可能随活性炭颗粒流出滤池,导致微生物泄漏的风险。相关研究表明,BAC工艺出水中所含的细菌总数较高,种类较丰富^[3],且随活性炭颗粒流出的微生物对消毒剂具有更高的抗性^[4],可能对出水的生物稳定性造成不利影响。因此,为保障净水厂出水的化学安全性和生物稳定性,研究人员开始关注前置BAC工艺(PBAC),即将BAC置于砂滤之前,以充分发挥BAC工艺的生物降解效能,同时依靠后续的砂滤对活性炭滤池出水中的微生物进行拦截,以解决微生物泄漏问题。

笔者通过实验室小试,考察了PBAC和CBAC与砂滤联用工艺对 COD_{Mn} 、DOC、 UV_{254} 、菌落总数等指标的去除效果,并借助分子生物学方法分析了上述两种工艺中活性炭表面的生物量、微生物多样性及群落结构的异同性,旨在为净水厂评估BAC工艺性能、优化处理工艺参数、提升饮用水化学安全性和生物稳定性提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

PBAC与CBAC试验装置位于苏州市某净水厂内,均由蠕动泵(兰格BT100-2J)、活性炭滤柱、石英砂滤柱和反冲洗水箱构成,只是活性炭滤柱的位置不同,见图1(以PBAC为例)。两装置共运行了3个周期,分别为R1、R2、R3,每周期运行时间为10 d。

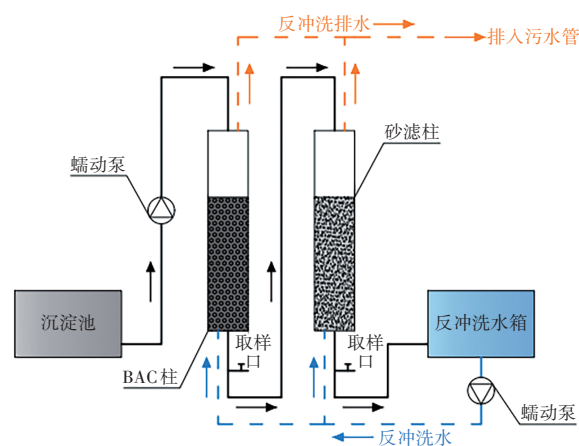


图1 PBAC试验装置

Fig.1 PBAC experimental devices

活性炭与石英砂滤柱均采用内径为15 cm、高为600 mm的透明有机玻璃柱,分别填充颗粒活性炭和石英砂,填充高度均为400 mm。其中,石英砂取自苏州某水厂的砂滤池,颗粒活性炭为Zhou等^[5]提出的活性炭综合评价模型中评分最高的压块炭B1-1。该水厂原水为东太湖水,前端工艺为混凝、沉淀。研究表明,东太湖水中的天然有机物以小分子有机物为主(90%)^[6]。由于臭氧/BAC工艺中臭氧氧化主要是将大分子有机物分解为小分子有机物,故在BAC工艺前端不设置臭氧,两套装置采用水厂的沉淀池出水作为进水,试验期间其水质见表1。

表1 装置进水水质

Tab.1 Water quality during the experiment

项目	pH	浊度/ NTU	氨氮/ ($mg \cdot L^{-1}$)	COD_{Mn} / ($mg \cdot L^{-1}$)	UV_{254} / cm^{-1}	DOC/ ($mg \cdot L^{-1}$)
最低值	6.73	1.08	0.11	1.49	0.041	2.43
最高值	7.82	2.97	0.32	2.72	0.063	3.88
平均值	7.47	2.21	0.20	1.94	0.055	3.04

BAC及石英砂滤柱的滤速均采用10 m/h,石英砂滤柱的反冲洗周期为2 d,BAC滤柱对某种污染物

的去除率出现明显下降时则进行反冲洗。反冲洗水为两装置的出水,反冲洗时间为15 min,反冲洗强度分别为15、7 L/(m²·s)。

1.2 检测项目及方法

COD_{Mn}采用标准酸性高锰酸钾法测定,UV₂₅₄采用紫外分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,菌落总数采用平板计数法测定,BDOC采用静态悬浮培养法测定,生物量采用脂磷法测定。

将含有微生物的PBS缓冲液通过0.22 μm滤膜,之后使用DNeasy® PowerWater® Kit试剂盒提取细菌DNA。利用引物338F和806R扩增DNA样本16S RNA基因的V3-V4段,采用TruSeq™ DNA Sample Prep Kit进行文库构建,测序工作在上海美吉生物医药科技有限公司的Illumina MiSeq高通量测序平台进行。

2 结果与分析

2.1 对常规指标的去除效果

2.1.1 浊度

连续运行3个周期,PBAC+砂滤工艺和CBAC+砂滤工艺对浊度的去除率分别为90.44%、71.70%、61.49%和89.71%、71.26%、59.45%,平均去除率分别为74.55%、73.48%,两组装置对浊度的去除效果相近。各工艺单元对浊度的去除率如图2所示,与砂滤联用时,PBAC工艺为浊度的主要去除单元,而CBAC工艺对于浊度的去除率则较低,即各工艺对浊度的去除效果与其位置有较大的关系,前端工艺对悬浮颗粒的去除效果要显著优于后端工艺。

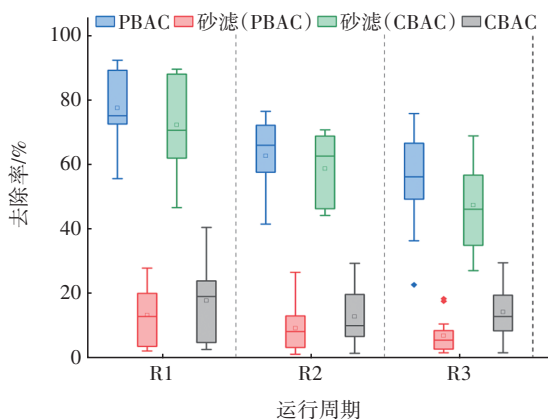


图2 各工艺单元对浊度的去除率

Fig.2 The removal rate of turbidity by each process

2.1.2 氨氮

连续运行3个周期,PBAC+砂滤工艺和CBAC+砂滤工艺对氨氮的去除率分别为65.93%、39.89%、

32.34%和58.78%、32.70%、29.29%,平均去除率分别为46.05%、40.26%,即PBAC+砂滤相较于CBAC+砂滤工艺对氨氮的平均去除率提高了5.79%。各工艺单元对氨氮的去除率如图3所示,与砂滤联用时,PBAC工艺发挥了去除氨氮的显著优势,而CBAC工艺对氨氮的去除率则劣于砂滤。PBAC工艺对氨氮的去除率显著高于CBAC工艺,这可能是因为相较于砂滤池出水,沉淀池出水氨氮浓度高,附着在PBAC工艺活性炭表面的微生物活性更强,故其对营养物质的利用率更高。

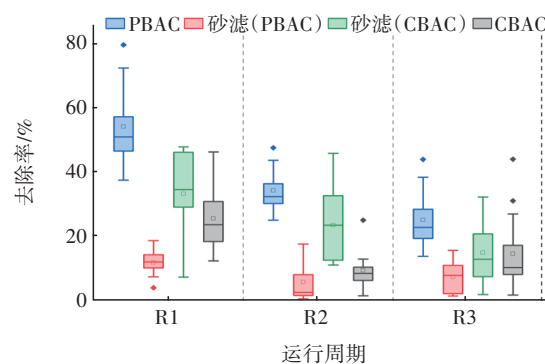


图3 各工艺单元对氨氮的去除率

Fig.3 The removal rate of ammonia nitrogen by each process

2.1.3 COD_{Mn}

连续运行3个周期,PBAC+砂滤和CBAC+砂滤对COD_{Mn}的去除率分别为25.52%、33.55%、36.30%和21.69%、30.95%、27.60%,平均去除率分别为31.79%和26.75%,即PBAC+砂滤相较于CBAC+砂滤对COD_{Mn}平均去除率提升了5.04%。各工艺单元对COD_{Mn}的去除率如图4所示。

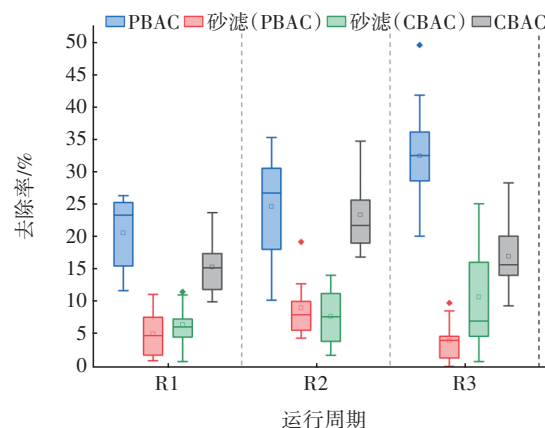


图4 各工艺单元对COD_{Mn}的去除率

Fig.4 The removal rate of COD_{Mn} by each process

BAC工艺对 COD_{Mn} 的去除率显著优于砂滤工艺。PBAC工艺和CBAC工艺对 COD_{Mn} 的平均去除率分别为26.40%、18.35%,PBAC工艺的平均去除率提升了8.05%,这可能是因为其表面存在较高生物量,具有较好的微生物活性,从而充分发挥了微生物降解有机物的作用。

另外,随着过滤时间的增加,PBAC工艺对 COD_{Mn} 的去除率不断提升,而CBAC工艺则呈现先升高后降低的趋势,这可能与二者活性炭表面生物膜的演变及其生理活性有关。有研究发现,BAC上的生物膜存在“活性厚度”^[7],当生物膜厚度超过活性厚度时,营养物质与溶解氧难以进入内部,导致生物膜活性下降,进而影响其对有机物的降解能力。相较于CBAC工艺,PBAC工艺进水营养物质浓度更高,这可能导致其表面微生物更易获取营养物质,从而增大了其活性厚度,使得生物膜老化延迟。

2.1.4 UV_{254}

连续运行3个周期,PBAC+砂滤和CBAC+砂滤工艺对 UV_{254} 的去除率分别为42.58%、44.18%、44.30%和41.53%、43.11%、39.15%,平均去除率分别为43.68%、41.27%,二者去除效果相近。各工艺单元对 UV_{254} 的去除率如图5所示,BAC工艺对 UV_{254} 的去除效果显著优于砂滤工艺。

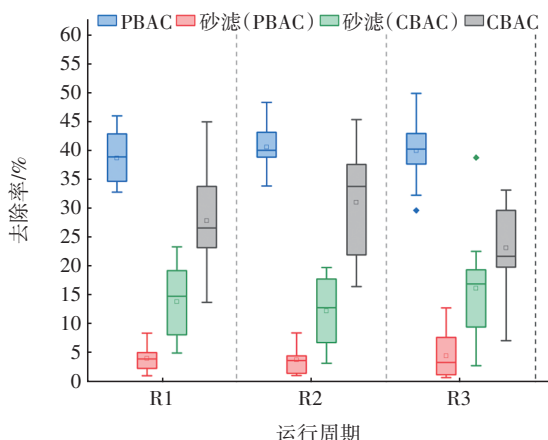


图5 各工艺对 UV_{254} 的去除率

Fig.5 The removal rate of UV_{254} by each process

PBAC工艺对 UV_{254} 的平均去除率为39.65%,而CBAC工艺对 UV_{254} 的平均去除率为26.87%,PBAC工艺的平均去除率提升了12.78%。这可能是因为 UV_{254} 主要表征芳香族化合物及具有双键结构的有机物^[8],这类物质一般难以被生物利用,因此主要靠活性炭的吸附作用去除。相较于CBAC工艺,PBAC

工艺进水中有机物浓度更高,更易被活性炭吸附。另外,PBAC工艺活性炭表面附着的微生物量可能更高,其分泌的粘性胞外聚合物可能对有机物的吸附也有一定贡献。

2.2 微生物特性分析

2.2.1 BDOC

为充分表征两组装置中微生物的生理活性、代谢情况和出水的生物稳定性,考察了第三周期内两组装置对可生物降解溶解性有机碳(BDOC)的去除效果。在第1、4、7、10天,进水BDOC浓度分别为0.20、0.29、0.27、0.17 mg/L,PBAC+砂滤和CBAC+砂滤对BDOC的去除率分别为39.66%、62.02%、55.23%、82.02%和39.17%、48.78%、33.21%、53.49%,PBAC+砂滤工艺对BDOC的去除优势随着运行时间的增加不断增强,这可能是因为其活性炭表面微生物对有机物的利用率不断提升。

各工艺单元对BDOC的去除率如表2所示,随着运行天数的增加,砂滤工艺对BDOC的去除率逐渐下降,而BAC工艺对BDOC的去除率则逐渐上升。比较PBAC工艺和CBAC工艺可知,PBAC工艺对BDOC的平均去除率为59.73%,显著优于CBAC工艺(43.66%),平均去除率提升了16.07%,表明PBAC工艺中的微生物代谢活力更强。

表2 各工艺对BDOC的去除率

Tab.2 The removal rate of BDOC by each process

运行时间/d	各工艺去除率/%			
	PBAC	砂滤(PBAC)	CBAC	砂滤(CBAC)
1	17.50	22.15	3.43	35.74
4	38.85	23.17	24.04	24.74
7	44.95	10.28	14.68	18.53
10	81.43	0.59	52.75	0.74

2.2.2 出水菌落总数

菌落总数测定结果表明,两装置进水平均菌落总数为148 CFU/mL,PBAC+砂滤和CBAC+砂滤工艺出水中的平均菌落总数分别为55、119 CFU/mL,即PBAC+砂滤工艺出水菌落总数相较CBAC+砂滤工艺下降了53.82%,说明PBAC+砂滤工艺可有效防止微生物泄漏,从而保障了出水的生物安全性。

2.2.3 活性炭表面生物量

为充分反映活性炭表面生物量的变化趋势,运行3个周期后对两装置进行反冲洗,使两组工艺活

性炭表面生物量相近,随后再运行 15 d,测定 PBAC 和 CBAC 工艺活性炭表面的生物量。测定结果表明,运行初期,上述两工艺活性炭表面的生物量(以 P 计)相近,分别为 70、73 nmol/g。随着运行时间的增加,两种工艺活性炭表面的生物量增幅较大,运行 4 d 后分别达到 183、156 nmol/g,运行 15 d 后进一步提高到 237、181 nmol/g, PBAC 工艺表面的生物量比 CBAC 工艺多 31.11%。

2.2.4 微生物多样性分析

① Alpha 多样性参数分析

PBAC 和 CBAC 工艺活性炭表面微生物群落的丰度和多样性指标如表 3 所示。其中,微生物群落的丰富度由 Sobs、Chao、Ace 指数表征,数值越大则表明丰富度越高。由表 3 可知,两者的 Sobs、Chao、Ace 指数较为接近,表明这两组工艺表面微生物群落的丰富度相近。Shannon、Simpson 指数反映的是微生物群落的多样性,群落多样性越高,Shannon 指数就越高,而 Simpson 指数就越低。PBAC 工艺的 Shannon 指数略低于 CBAC 工艺, Simpson 指数则更高,表明其表面微生物群落多样性更低。Coverage 指数能表征样品中微生物群落的覆盖度,数值越高表明测序结果越能充分反映样本微生物群落的实际特征,两组样本的 Coverage 指数均达到了 0.997,表明结果的可信度较高。

表3 微生物群落丰度及多样性指标

Tab.3 Index of abundance and diversity of microbial community

工艺	序列数	Sobs	Ace	Chao	Shannon	Simpson
PBAC	60 605	992	1 196	1 231	5.12	0.028 8
CBAC	59 240	1 111	1 087	1 114	5.72	0.007 9

② OTUs 统计分析

PBAC工艺活性炭表面OTUs数量为992,CBAC工艺活性炭表面OTUs数量为1111,二者表面OTUs重叠数量为918,占比为77.5%,表明了二者活性炭表面的物种相似度较高。CBAC工艺活性炭表面微生物物种类型更加丰富,但结合表面生物量的分析,推测可能是由于进水营养物质匮乏,致使其表面难以形成优势菌种,因而多样性更高。

2.2.5 微生物群落结构分析

① 属级别 Circos 图分析

PBAC 和 CBAC 工艺活性炭表面微生物在属水平上的群落结构如图 6 所示。PBAC 工艺活性炭表

面相对丰度较高的微生物包括 *norank_f_Cytophagaceae*、*hgcl_clade*、*norank_f_A0839*、*Roseiflexus*，占比分别为 17.9%、6.8%、6.1%、5.7%；CBAC 工艺活性炭表面相对丰度较高的微生物包括 *Nitrospira*、*norank_f_Blastocatellaceae_Subgroup_4*、*norank_f_A0839*、*norank_f_Nitrosomonadaceae*，占比分别为 6.1%、4.3%、4.0%、3.9%。同时可以观察到，相较于 CBAC 工艺，PBAC 工艺活性炭表面的优势菌更为明显，相对丰度较高的 4 种细菌共占比 36.5%，而 CBAC 工艺表面相对丰度较高的 4 种细菌则仅占比 18.3%，与群落多样性分析结果一致。

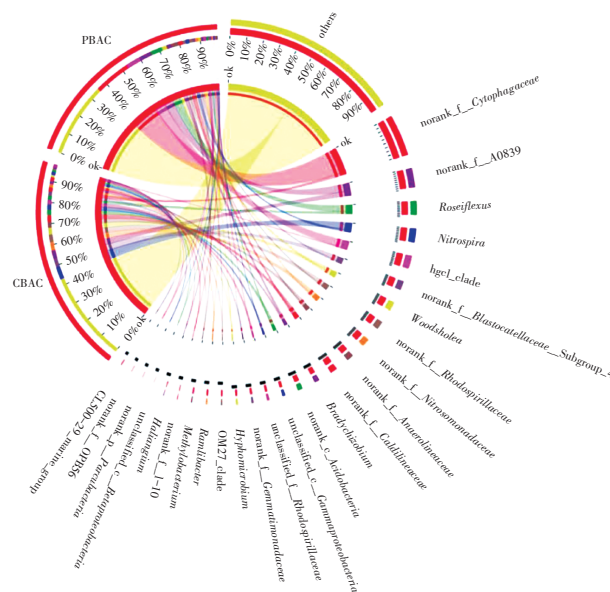


图6 PBAC和CBAC工艺微生物属水平的群落结构Circos图

Fig.6 Circos map of microbial community structure in PBAC and CBAC process at genus level

另外,根据 Circos 图呈现的结果,CBAC 工艺表面相对丰度低于 1%(others)的菌种占比为 43.7%,高于 PBAC 工艺(36.0%),这可能是 CBAC 工艺虽然物种多样性更高,但污染物降解能力却劣于 PBAC 工艺的原因之一。结合生物量分析可知,CBAC 工艺生物量较低,但微生物种类更多,导致其上的优势菌种不明显,在有机物的降解过程中难以发挥作用。

② Heatmap 图分析

PBAC 和 CBAC 工艺在属水平上的 Heatmap 图如图 7 所示。与上述分析得出的结论相同,相较于 CBAC 工艺, PBAC 工艺活性炭表面的微生物群落结构更不均匀,菌种 norank_f_Cytophagaceae 的相对丰度较高,具有明显的优势。这可能是因为两者进

水中营养物质的浓度有明显差异, PBAC工艺进水中较高浓度的营养物质有利于优势菌种的生长。

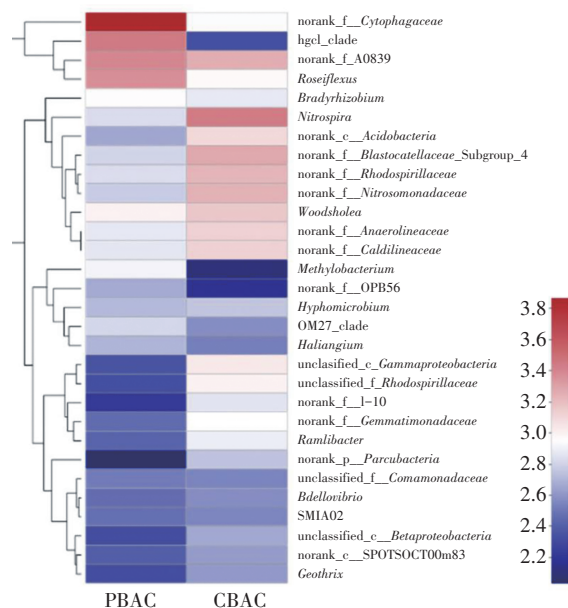


图7 PBAC工艺和CBAC工艺微生物属水平的群落结构
Heatmap图

Fig.7 Heatmap of microbial community structure in
PBAC and CBAC process at genus level

3 结论

① PBAC+砂滤工艺在污染物去除方面略优于CBAC+砂滤工艺,其对氨氮、 COD_{Mn} 的去除率分别提高了5.79%、5.04%,两者对浊度和 UV_{254} 的去除效果相近。

② 相较于CBAC+砂滤工艺, PBAC+砂滤工艺对BDOC的去除率提升了16.07%。同时, PBAC+砂滤工艺的出水菌落总数降低了53.82%,证明其在防止活性炭滤池生物泄漏、保障出水生物稳定性方面具有较大优势。另外, PBAC工艺活性炭表面具有更高的生物量和更突出的优势菌种,这有利于其充分发挥微生物对污染物的降解作用。

③ 相较于CBAC工艺, PBAC工艺能更好地提升出水化学安全性和保障饮用水的生物安全性,有利于净水厂进一步提高饮用水的品质。

参考文献:

- [1] 王赫,彭锦玉,王全勇,等. 臭氧/生物活性炭流化床预处理对净水效率的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(5): 46-52.

WANG He, PENG Jinyu, WANG Quanyong, *et al.* Effect of ozone/biological activated carbon fluidized bed pretreatment on water purification efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(5): 46-52 (in Chinese).

- [2] PARK T, AMPUNAN V, LEE S, *et al.* Chemical behavior of different species of phosphorus in coagulation [J]. Chemosphere, 2016, 144(7): 2264-2269.
- [3] CHU Y B, LI M, LIU J W, *et al.* Molecular insights into the mechanism and the efficiency-structure relationship of phosphorus removal by coagulation [J]. Water Research, 2018, 147(12): 195-203.
- [4] ZHENG J, CHEN T, CHEN H. Antibiotic resistome promotion in drinking water during biological activated carbon treatment: is it influenced by quorum sensing? [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612(1): 1-8.
- [5] ZHOU Y, LI W. The comprehensive evaluation model and optimization selection of activated carbon in the O_3 -BAC treatment process [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101931.
- [6] 董秉直, 张佳丽, 何畅. 臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1837-1844.
- DONG Bingzhi, ZHANG Jiali, HE Chang. Influencing factors of assimilable organic carbon (AOC) formation in drinking water during ozonation process [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1837-1844 (in Chinese).
- [7] SIMPSON D R. Biofilm processes in biologically active carbon water purification [J]. Water Research, 2008, 42(12): 2839-2848.
- [8] 孙婧, 赵阁阁, 张运波, 等. 高铁酸钾氧化去除DOM的影响因素及荧光光谱特性[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 21-27.
- SUN Jing, ZHAO Gege, ZHANG Yunbo, *et al.* Influencing factors and fluorescence spectrum characteristics of DOM removed by potassium ferrate oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 21-27 (in Chinese).

作者简介: 刘唯源(2001-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 从事供水系统生物安全风险评价研究。

E-mail: 1208192712@qq.com

收稿日期: 2023-05-25

修回日期: 2023-06-25

(编辑: 李德强)