

付万俊,成小翔,徐景涛,等. 臭氧-纳滤组合工艺深度处理污水处理厂二级出水试验[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 86-93.

FU W J, CHENG X X, XU J T, et al. Study on advanced treatment of secondary effluent from WWTP by the ozone-nanofiltration hybrid process[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 86-93.

## 臭氧-纳滤组合工艺深度处理污水处理厂二级出水试验

付万俊<sup>1</sup>,成小翔<sup>2</sup>,徐景涛<sup>2</sup>,武道吉<sup>2,3</sup>,朱学武<sup>2,\*</sup>

(1. 淄博市鲁中勘察设计审查咨询中心,山东淄博 255025;2. 山东建筑大学市政与环境工程学院,山东济南 250101;3. 山东建筑大学资源与环境创新研究院,山东济南 250101)

**摘要** 为了进一步降低污水处理厂二级出水中有机物,提高出水水质,增加回用路径,进行了臭氧-纳滤组合工艺深度处理二级出水试验研究。结果表明,该组合工艺对二级出水中荧光类有机物和溶解性有机物具有高效去除能力,尤其对 UV<sub>254</sub>、总有机碳的去除率最高可达到 93.1% 和 88.1%。此外,臭氧投加浓度与膜污染情况密切相关。通过扫描电镜和比通量变化数据发现,相比于没有进行臭氧处理的空白组,臭氧-纳滤组合工艺中膜污染情况得到明显改善,且随着臭氧浓度的增加,膜污染程度逐渐减轻。当臭氧质量浓度为 4 mg/L 时,膜污染控制情况达到最优。相比于传统的混凝-沉淀-过滤水处理工艺,臭氧-纳滤组合工艺由于其出水水质优异、无二次污染、处理效率高等优点,在二级出水高效处理领域显示出广泛的应用前景。

**关键词** 臭氧 纳滤 膜污染 二级出水 预处理

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)10-0086-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.011

## Study on Advanced Treatment of Secondary Effluent from WWTP by the Ozone-Nanofiltration Hybrid Process

FU Wanjun<sup>1</sup>, CHENG Xiaoxiang<sup>2</sup>, XU Jingtao<sup>2</sup>, WU Daoji<sup>2,3</sup>, ZHU Xuewu<sup>2,\*</sup>

(1. Zibo Luzhong Survey and Design Review Consulting Center, Zibo 255025, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. Research Institute of Resources and Environment Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract** To further decrease the organic matter in the secondary effluent of the wastewater treatment plant (WWTP), improve the effluent quality, and increase the reuse path, an experimental study on the advanced treatment of secondary effluent by ozone-nanofiltration combined process was carried out. The test proved that the process had high efficiency removal rate for fluorescent organic matter and dissolved organic matter in the secondary effluent water, and the maximum removal rate for UV<sub>254</sub> and total organic carbon reached 93.1% and 88.1%. In addition, ozone dosing concentration was closely related to membrane pollution. The field emission scanning electron microscopy and specific flux change curve results proved that compared with the blank group without ozone treatment, the membrane pollution of the nanofiltration membrane in the ozone-nanofiltration had been greatly alleviated, and the degree of membrane fouling decreased as the ozone concentration increased. When the ozone mass concentration was 4 mg/L, the membrane pollution control situation reached the optimal level. Due to the advantages of excellent quality of effluent water, no secondary pollution, high treatment efficiency, etc., the ozone-nanofiltration hybrid process showed a wide range of application prospects in the field of high-efficiency treatment of secondary effluent compared with the traditional water treatment process.

**Keywords** ozone nanofiltration (NF) membrane fouling secondary effluent pretreatment

[收稿日期] 2024-02-20

[基金项目] 中国博士后科学基金(2023M732618);山东省自然科学基金(ZR2022QE030);山东省高等学校青年创新团队(2022KJ206);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0313)。

[作者简介] 付万俊(1978—),女,高级工程师,研究方向为水处理技术与原理,E-mail:94742916@qq.com。

[通信作者] 朱学武(1990—),男,博士,研究方向为膜法水处理技术,E-mail:zhuxuewu1314@163.com。

我国水资源在空间和时间上的分配不均匀,导致水资源短缺问题层出不穷。因此,针对用水紧张的问题,可对污水采取深度处理和再生回用来缓解用水危机和实现水资源可持续利用。污水厂的二级出水中含有大量难降解有机物,利用传统的混凝-沉淀-过滤处理技术难以实现污水的深度净化。因此,需要寻求新的组合工艺来实现对水中残留污染物的有效去除,最终实现对二级出水的高品质回用<sup>[1-3]</sup>。臭氧作为一种绿色的氧化剂,在水处理领域中凭借其高效去除水中有机物、无二次污染和操作简便等优点得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。然而,臭氧在应用过程中仍存在氧化不彻底、能耗偏高和传质效率一般等缺点<sup>[5]</sup>。为了克服臭氧在单独使用时的不足,水处理领域常采用将臭氧与其他工艺进行组合。目前市场上已经出现多种臭氧组合工艺,如臭氧-活性炭组合工艺、臭氧-紫外线组合工艺等。然而,这些技术往往因为成本高昂、技术复杂且成熟度不足而面临应用瓶颈。在此背景下,寻找一种既绿色经济又操作简便的新技术成为迫切需要,与臭氧形成优势互补,共同提升二级出水的水质。压力驱动膜技术以其低成本、高效性、简单操作等显著优势,在水处理领域得到了广泛应用<sup>[6-8]</sup>。其中,纳滤技术作为介于反渗透和超滤工艺之间的新兴技术,特别适用于废水的净化和回收领域,并展现出提高臭氧处理效果的巨大潜力<sup>[9-12]</sup>。然而,在纳滤处理二级出水的过程中,膜污染会导致膜通量下降、截留性能降低、能耗增加等问题,严重影响膜的分离性能和使用寿命<sup>[13]</sup>。为了解决这一问题,本研究提出了将臭氧作为纳滤预处理工艺的研究方案。

臭氧作为一种强氧化剂,能够迅速氧化分解水中的有机物和微生物,降低其对纳滤膜的污染程度。通过臭氧预处理,可以有效减轻纳滤膜的污染,降低膜表面的污染物负荷,提高膜的通量和选择性。此外,臭氧预处理还能够降低纳滤工艺的能耗和运行成本,提高工艺的经济性和可行性。因此,采用臭氧-纳滤组合的水处理工艺将能够显著提高二级出水的处理效率和出水水质。

本试验以山东建筑大学中水站的二级出水为研究对象,采用臭氧-纳滤组合工艺进行深度处理,旨在为二级出水的高品质回收利用提供理论与技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

异丙醇(麦克林),超纯水,NF270( $135 \pm 12$ ) L/( $m^2 \cdot h \cdot MPa$ ),孔径为( $0.44 \pm 0.12$ ) nm 纳滤膜购自陶氏化学有限公司。

### 1.2 原水水质

采用山东建筑大学中水站二级出水作为原水,采样时间为2023年12月,试验过程中主要水质参数如表1所示。

表1 原水水质

Tab. 1 Raw Water Quality

水质指标	数值
pH值	6.9~7.3
浑浊度/NTU	$5.9 \pm 2.1$
电导率/( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )	$128.9 \pm 6.5$
UV <sub>254</sub> /( $cm^{-1}$ )	$0.420 \pm 0.007$
总有机碳(TOC)/( $mg \cdot L^{-1}$ )	$7.70 \pm 0.32$

### 1.3 试验装置

本试验中,二级出水先用微滤膜( $0.45 \mu m$ )抽滤进行预处理后,再经臭氧-纳滤组合工艺处理。

试验中采用的臭氧处理阶段装置如图1所示。在试验中,水温控制为( $20 \pm 1$ ) °C,液相臭氧质量浓度控制为1、2、3、4 mg/L,4种体系的气体流量均为8 L/min,曝气时间为10 min,气泡发生器压力为0.45 MPa。当液相臭氧质量浓度为1、2、3、4 mg/L时,臭氧处理的出水记为ON-1、ON-2、ON-3、ON-4。

膜过滤装置如图2所示。首先将NF270膜放进异丙醇中浸泡30 min进行预处理,然后用超纯水洗净膜片上残留的异丙醇后,将膜放入膜过滤装置中测量其性能。在0.5 MPa的条件下过滤120 min对膜进行预压,接着在0.4 MPa的条件下进行30 min的过滤,最后记录纯水通量。计算膜渗透性如式(1)。

$$J = V/(AtP) \quad (1)$$

其中: $J$ ——膜渗透性,L/( $m^2 \cdot h \cdot MPa$ );

$A$ ——过滤面积, $m^2$ ;

$V$ ——产水体积,L;

$t$ ——试验时间,h;

$P$ ——试验操作压力,MPa。

首先,用膜过滤超纯水来测定通量,然后对臭

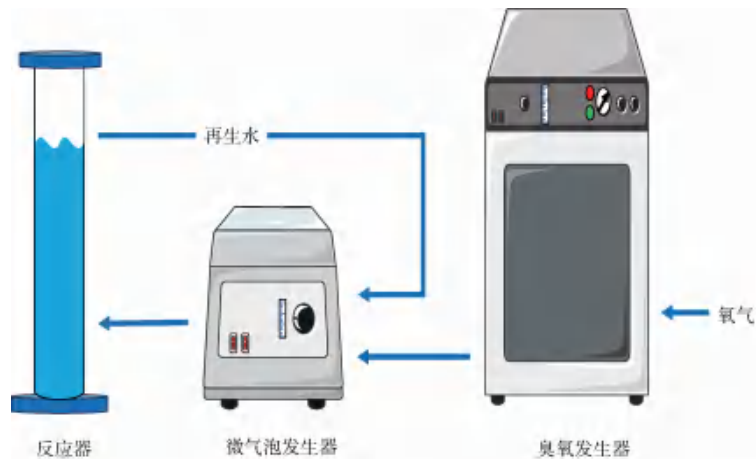


图1 臭氧曝气试验装置

Fig. 1 Test Device of Ozone Aeration

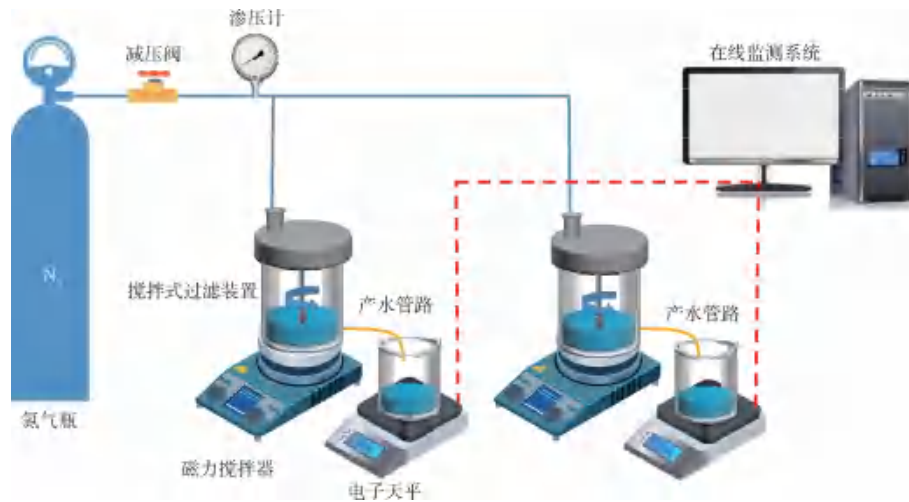


图2 膜过滤装置

Fig. 2 Test Device of Filtration

氧出水进行过滤处理。根据进水的不同,纳滤处理的出水记为NF-空白、NF-1、NF-2、NF-3、NF-4。

#### 1.4 测试方法

进行水样分析时,使用紫外分光光度计(UV-1800)、粒径分布仪(ZETASIZER NANO ZS)、总有机碳分析仪(TOC-L)和高效液相色谱仪(安捷伦,德国)等设备,分别检测 $UV_{254}$ 、粒径分布、TOC和分子量分布。其中,高效液相色谱仪配备紫外吸收检测器,分子荧光光谱仪用于测定三维荧光。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧-纳滤组合工艺对于去除荧光类有机物的效果

二级出水、臭氧出水和纳滤出水的三维荧光光

谱图如图3所示。在光谱图上,二级出水存在4个特征峰,分别代表富里酸类物质的A峰,腐殖质类物质的C峰,以及色氨酸类物质的 $T_1$ 和 $T_2$ 峰<sup>[14]</sup>。相比于二级出水原水,臭氧出水的荧光峰值略有下降,这表明臭氧通过其氧化作用在去除二级出水中的荧光有机物方面的效果较差。相比于二级出水原水和臭氧出水,纳滤出水中荧光强度基本消失,纳滤对 $T_1$ 、 $T_2$ 、A、C峰的去除率都接近于100%。这说明在组合工艺中,通过臭氧的氧化作用和纳滤膜的机械筛分作用以及膜表面的静电排斥作用几乎可以实现对荧光类有机物的完全截留。而在图3(f)所示的单独纳滤处理后的出水中仍存在小部分的荧光强度,这说明臭氧-纳滤组合工艺处理效果显著优于单独处理工艺。

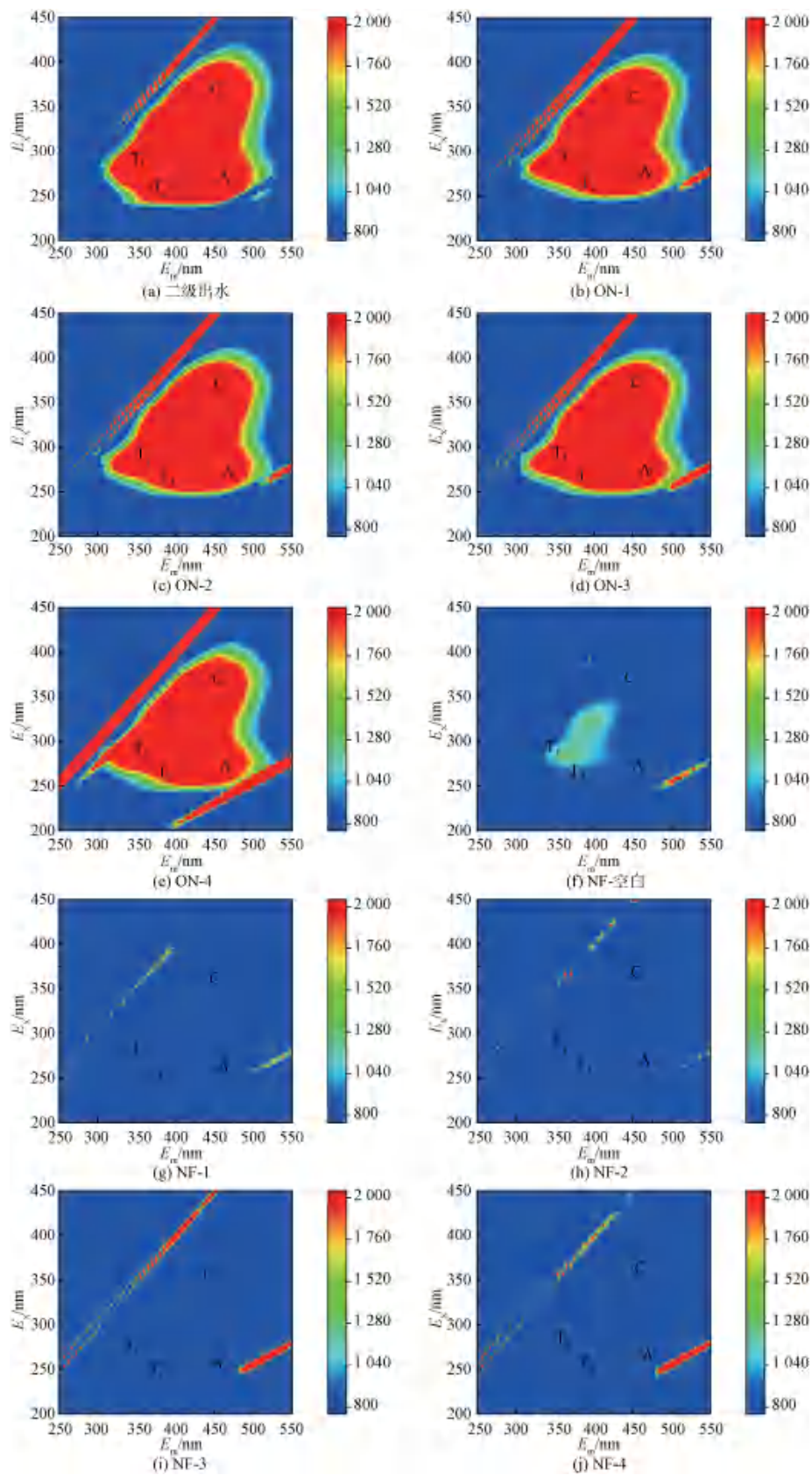


图3 不同水样中的荧光类有机物

Fig. 3 Fluorescent Organic Compounds in Different Water Samples

## 2.2 臭氧-纳滤组合工艺对 $UV_{254}$ 和 TOC 的去除效果

二级出水、臭氧出水及纳滤出水的  $UV_{254}$  值如图 4 所示。具体而言,二级出水的  $UV_{254}$  为  $0.42 \text{ cm}^{-1}$ 。在 4 种不同的处理体系中,臭氧出水后的  $UV_{254}$  分别为  $0.37$ 、 $0.35$ 、 $0.33$ 、 $0.32 \text{ cm}^{-1}$ 。通过计算,臭氧对二级出水中  $UV_{254}$  的去除率分别为  $11.9\%$ 、 $16.7\%$ 、 $21.4\%$ 、 $23.8\%$ 。 $UV_{254}$  值的下降主要归因于臭氧对有机物中不饱和键的破坏,导致有机物结构简化,进而降低了水体的  $UV_{254}$ 。纳滤出水中  $UV_{254}$  分别为  $0.087$ 、 $0.051$ 、 $0.044$ 、 $0.034$ 、 $0.022 \text{ cm}^{-1}$ ,纳滤对臭氧氧化后二级出水  $UV_{254}$  的去除率分别为  $79.3\%$ 、 $86.2\%$ 、 $87.4\%$ 、 $89.7\%$ 、 $93.1\%$ 。与臭氧相比,纳滤对  $UV_{254}$  的去除率更高,这主要归因于纳滤膜的空间位阻作用和

电荷排斥作用,对有机物产生了更强的截留效果。此外,利用 TOC 作为指标,对二级出水中悬浮性和溶解性有机物进行了表征。如图 4 所示,二级出水的 TOC 质量浓度为  $19.3 \text{ mg/L}$ ,4 种体系的臭氧出水中 TOC 质量浓度分别为  $17.3$ 、 $16.6$ 、 $16.2$ 、 $15.9 \text{ mg/L}$ ,对应的 TOC 去除率分别为  $10.4\%$ 、 $14.0\%$ 、 $16.1\%$ 、 $17.6\%$ 。TOC 浓度的降低主要归因于臭氧处理过程中的物理挥发作用和化学氧化作用。纳滤出水中 TOC 质量浓度分别为  $6.3$ 、 $3.1$ 、 $2.5$ 、 $2.2$ 、 $1.9 \text{ mg/L}$ 。纳滤对臭氧氧化后二级出水 TOC 的去除率分别为  $67.4\%$ 、 $82.1\%$ 、 $84.9\%$ 、 $86.4\%$ 、 $88.1\%$ 。与臭氧处理相比,纳滤对 TOC 的去除效果更为显著,这同样是由于纳滤膜的空间位阻作用和电荷排斥作用,有效去除了水体中的难降解有机物<sup>[15]</sup>。

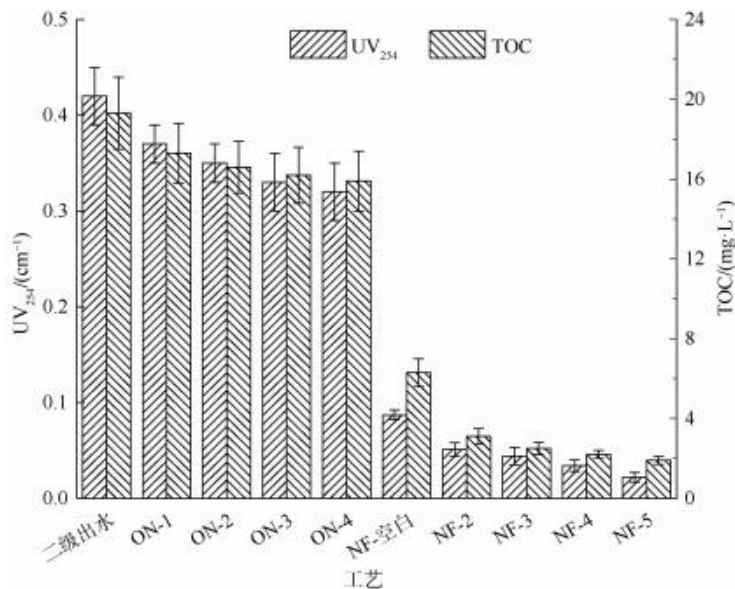


图 4 臭氧-纳滤组合工艺对  $UV_{254}$  和 TOC 的去除效果

Fig. 4 Removal of  $UV_{254}$  and TOC by Combined Process of Ozone-NF

## 2.3 臭氧-纳滤组合工艺对颗粒物去除效果

如图 5 所示,二级出水中的颗粒物尺寸在  $260 \sim 600 \text{ nm}$ 。经臭氧处理后,颗粒物的尺寸范围显著减小,主要集中在  $150 \sim 400 \text{ nm}$ 。这一变化归因于臭氧的强氧化能力,它可以将大分子物质氧化成小分子物质或去除。臭氧出水经过纳滤处理后,颗粒物含量得到了进一步的降低,几乎实现了对大分子物质的完全截留。这主要得益于纳滤膜的空间位阻效应和电荷排斥效应。因此,单独使用臭氧工艺对颗粒物的去除效果有限。采用臭氧-纳滤组合工艺的方

式可以有效发挥两者的优势互补作用,从而实现高效的颗粒物截留。

## 2.4 臭氧-纳滤组合工艺对有机物分子量分布的影响

如图 6 所示,色谱图上共出现两个相应峰,分别是代表高分子聚合物的 A 峰 ( $\sim 18\,000 \text{ Da}$ ) [图 6 (a)],代表腐殖质类物质的 B 峰 ( $\sim 1\,800 \text{ Da}$ ) [图 6 (b)]<sup>[16]</sup>。高分子聚合物对紫外线不敏感,所以代表高分子聚合物的 A 峰强度较弱。相比于二级出水的色谱图,在所有的臭氧-纳滤出水中的色谱图

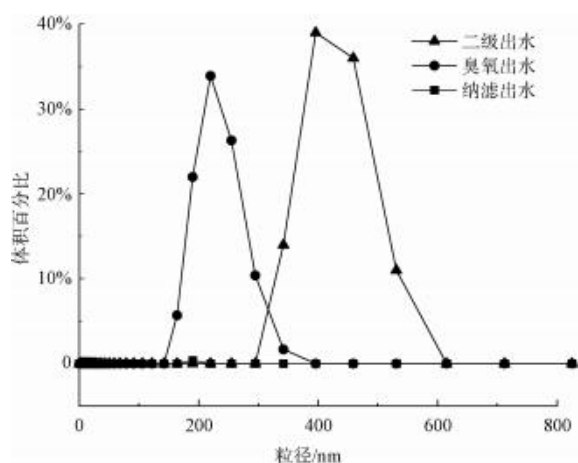


图5 臭氧-纳滤组合工艺对颗粒物的去除效果

Fig. 5 Removal of Particulate Matter by Combined Process of Ozone-NF

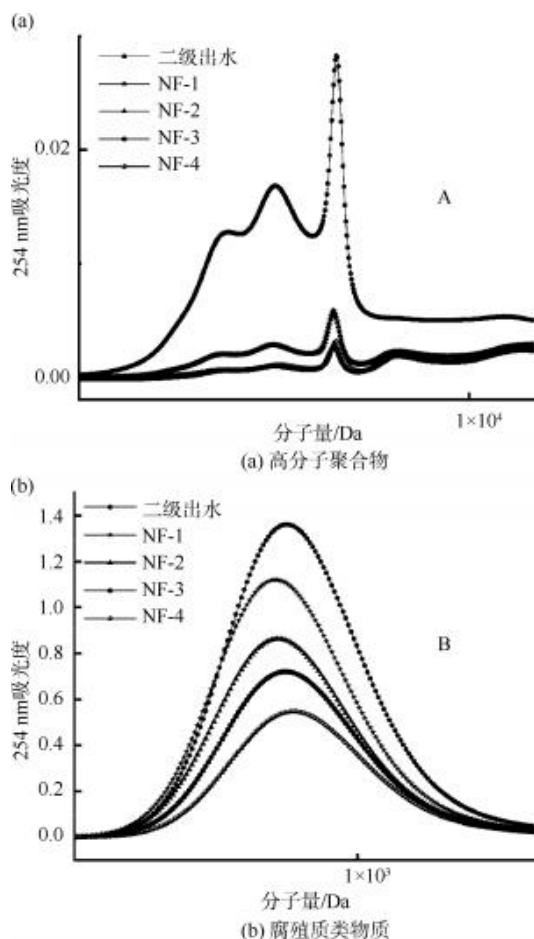


图6 臭氧-纳滤组合工艺对分子量分布的影响

Fig. 6 Effect of Combined Process of Ozone-NF on Molecular Weight Distribution

中都检测不出 A 峰的吸光度,这说明通过臭氧的氧化作用和纳滤的空间位阻作用以及电荷排斥作用,

高分子聚合物几乎被完全去除。随着臭氧浓度的增加, B 峰的强度逐渐降低,这说明增加臭氧浓度会提高臭氧-纳滤组合工艺的处理效果,从而提高对腐殖质类物质的去除率。此外,经过纳滤处理以后,纳滤出水色谱图中的 B 峰强度进一步大幅度降低,这说明通过臭氧-纳滤组合工艺可以将二级出水中的腐殖质物质大幅度去除。

### 2.5 臭氧-纳滤组合工艺膜污染分析

如图 7 所示,通过深入分析渗透通量的变化,对二级出水预处理过程中纳滤膜的污染行为进行了系统研究。在过滤体积达到 300 mL 时,各试验组的比通量呈现显著差异。具体而言,空白组的比通量达到 0.53;而经臭氧预处理的试验组(ON-1~ON-4),其比通量分别为 0.62、0.70、0.74 和 0.82。结果表明,空白组的纳滤膜通量衰减程度最大,意味着在未经臭氧预处理的条件下,纳滤膜更容易受到污染。此外,随着臭氧浓度的递增(从 ON-1~ON-4),比通量也呈现逐步增加的趋势。这说明臭氧预处理对纳滤膜污染控制具有显著的正向影响,即臭氧浓度的增加能够有效提升纳滤膜对污染的控制能力<sup>[17]</sup>。

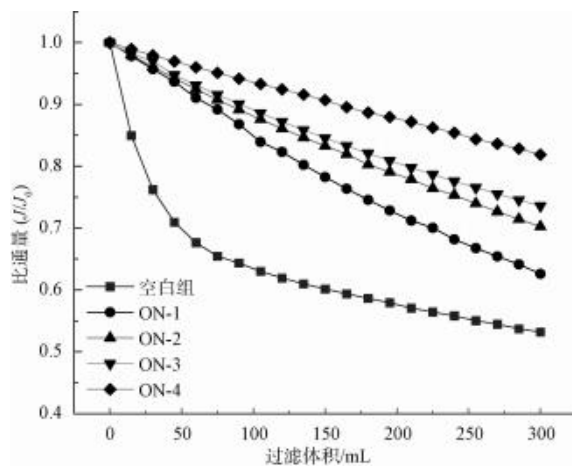


图7 不同进水对纳滤膜通量变化的影响

Fig. 7 Influence of Different Influent on Flux Variation of NF Membrane

为了进一步验证不同体系下纳滤膜表面污染程度的区别,对这 5 种过滤 300 mL 二级出水的纳滤膜和原始纳滤膜进行了表面形貌分析。SEM 的结果如图 8 所示,相较于原始纳滤膜,5 组试验的纳滤膜表面均显示出不同程度的污染情况。在 10 000 倍和 20 000 倍的放大倍数下可以清晰地发现,随着臭

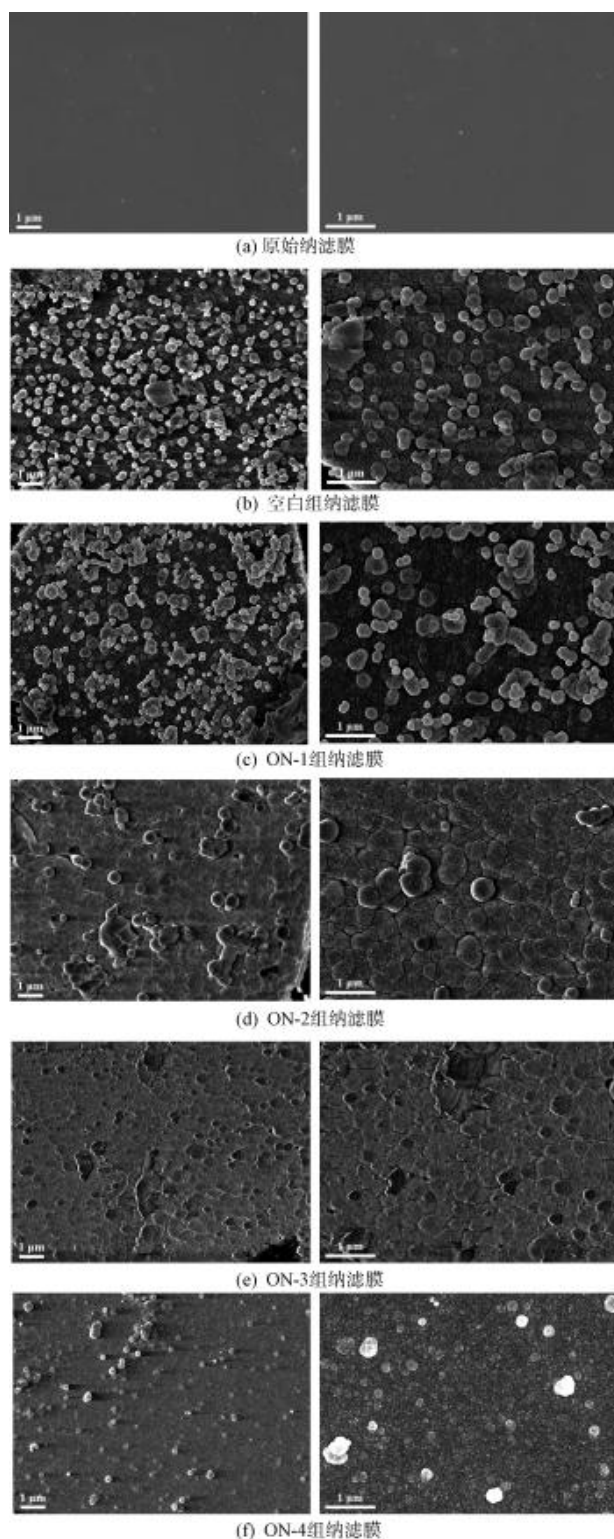


图8 污染后纳滤膜 SEM 图

Fig. 8 SEM Image of NF Membrane

氧浓度的增加,纳滤膜表面的污染程度逐渐减小。这证明纳滤膜的污染程度随着臭氧浓度的增加而减小<sup>[18]</sup>。这种趋势的产生是由于增加臭氧浓度会显

著提高臭氧的氧化能力,从而有效降低水中污染物的浓度,进而提升臭氧出水的水质。臭氧出水水质的改善,可以直接减少污染物在纳滤膜表面的积累,从而减轻膜污染程度。

### 3 结论

(1) 臭氧-纳滤组合工艺对二级出水中  $UV_{254}$  和 TOC 的最大去除率分别为 93.1% 和 88.1%,实现了对水中有机物的有效去除。

(2) 臭氧预处理可以显著降低二级出水对纳滤膜造成的膜污染。相比于对照组,臭氧-纳滤组合工艺的比通量最高可提高 54.7%。

(3) 单独臭氧处理对二级出水中的颗粒物和荧光有机物去除效果有限,臭氧-纳滤组合工艺基本可以实现对难降解有机物的完全去除。

(4) 臭氧-纳滤组合工艺具备操作运行简单、水处理效率高、不产生二次污染等优势,在二级出水的深度处理领域中具有较大应用前景。

### 参考文献

- [1] CHEN M, DING W, ZHOU M, et al. Fouling mechanism of PVDF ultrafiltration membrane for secondary effluent treatment from paper mills [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 167: 37 - 45. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.12.021.
- [2] 霍培书,管越强,周可新,等. 重金属离子对活性污泥处理污水的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(10): 2173-8.  
HUO P S, GUAN Y Q, ZHOU K X, et al. Effect of heavy metal ions on wastewater treatment with activated sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 4(10): 2173-2178.
- [3] 王业翔,周伟伟,孟凡辉,等. 强化预处理-超滤-纳滤组合工艺处理污水处理厂二级出水试验研究[J]. *给水排水*, 2022, 48(s1): 94-99.  
WANG Y X, ZHOU W W, MENG F H, et al. Study on the treatment of secondary effluent from wastewater treatment plants by the enhanced pretreatment-ultrafiltration-nanofiltration hybrid process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(s1): 94-99.
- [4] LI K, XU W, WEN G, et al. Aging of polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane due to ozone exposure in water treatment: Evolution of membrane properties and performance [J]. *Chemosphere*, 2022, 308: 136520. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136520.
- [5] EPELLE E I, MACFARLANE A, CUSACK M, et al. Ozone application in different industries: A review of recent developments [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140188. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140188.
- [6] JIN P, CHERGAOUI S, ZHENG J, et al. Low-pressure highly

- permeable polyester loose nanofiltration membranes tailored by natural carbohydrates for effective dye/salt fractionation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126716. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126716.
- [ 7 ] ZHU X, SUN Z, TAN F, et al. Xylitol-based polyester loose nanofiltration membranes with outstanding water permeance and efficient dye desalination performance [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 334: 126048. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.126048.
- [ 8 ] 郝文冉, 来存贤, 朱学武, 等. 超滤-纳滤双膜工艺深度净化天然雨水试验[J]. *净水技术*, 2024, 43(1): 74-80.  
HAO W R, LAI C X, ZHU X W, et al. Experiment of UF-NF hybrid membrane process of advanced purification for natural rainwater[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(1): 74-80.
- [ 9 ] SUN Z, ZHU X, TAN F, et al. Poly(vinyl alcohol)-based highly permeable TFC nanofiltration membranes for selective dye/salt separation[J]. *Desalination*, 2023, 553: 116479. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116479.
- [ 10 ] ZHU X, SUN Z, TAN F, et al. Tailoring high-performance polyester loose nanofiltration membrane for selective separation of salt/dyes; The equilibrium of condensation and hydrolysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 333: 125848. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125848.
- [ 11 ] ZHU X W, SUN Z Y, XU J T, et al. Poly(vinyl alcohol)-based polyester nanofiltration membranes for fractionation of dye/salt mixtures; Alcoholysis degree matters [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 328: 125076. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125076.
- [ 12 ] 朱学武, 党敏, 甘振东, 等. 超滤-纳滤双膜工艺深度处理南四湖水中试研究[J]. *给水排水*, 2018, 44(3): 28-32.  
ZHU X W, DANG M, GAN Z D, et al. Pilot study on advanced treatment of Nansi Lake water by UF-NF hybrid membrane process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(3): 28-32.
- [ 13 ] FAN Q, CHENG X, ZHU X, et al. Secondary wastewater treatment using peroxymonosulfate activated by a carbon nanofiber supported  $\text{Co}_3\text{O}_4$  ( $\text{Co}_3\text{O}_4 @ \text{CNF}$ ) catalyst combined with ultrafiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287: 120579. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120579.
- [ 14 ] LIAN J, CHENG X, ZHU X, et al. Mutual activation between ferrate and calcium sulfite for surface water pre-treatment and ultrafiltration membrane fouling control[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159893.
- [ 15 ] LAI C, ZHU X, LI J, et al. pH-regulated interfacially polymerized nanofiltration membranes to achieve high separation of NOM and moderate desalination for purifying ground water [J]. *Desalination*, 2022, 544: 116148. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116148.
- [ 16 ] 樊庆水. 纳米碳负载钴型催化剂活化过硫酸盐协同膜滤净化二级出水研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.  
FAN Q S. Study on purification of secondary effluent by nano-carbon supported cobalt catalysts activated peroxymonosulfate coupled with UF membrane [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [ 17 ] WANG J, CHENG X, LI P, et al. Activation of peroxymonosulfate with biochar-supported  $\text{CuO}$  ( $\text{CuO} @ \text{BC}$ ) for natural organic matter removal and membrane fouling control[J]. *Chemosphere*, 2023, 341: 140044. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140044.
- [ 18 ] CHENG X, LIAN J, REN Z, et al. Coupling sodium percarbonate (SPC) oxidation and coagulation for membrane fouling mitigation in algae-laden water treatment [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117622. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117622.

## (上接第 76 页)

- [ 2 ] 农晋琦, 张金松, 李悦. HACCP 体系在制水生产全流程的构建与应用[J]. *供水技术*, 2022, 16(5): 162-169.  
NONG J Q, ZHANG J S, LI Y. The HACCP system construction and application in the whole process of water production [J]. *Water Technology*, 2022, 16(5): 162-169.
- [ 3 ] 刘立. HACCP 体系在自来水生产和输送过程中的应用[J]. *科技创新与技术*, 2020(33): 160-161.  
LIU L. The application of HACCP system in the production and transportation of tap water [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(33): 160-161.
- [ 4 ] 孙傅, 陈吉宁, 曾思育. HACCP 体系用于给水处理厂浊度控制的研究[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(13): 1-6.  
SUN F, CHEN J N, ZENG S Y. Application of HACCP system to turbidity control in conventional waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(13): 1-6.
- [ 5 ] 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 B Z, ZHANG J L, HE C. Influencing factors of assimilable organic carbon (AOC) formation in drinking water during ozonation process[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1837-1844.
- [ 6 ] 尹铁凤, 蒋增辉, 江文华. 水中臭氧全光谱扫描光度法在线监测系统比对和应用研究[J]. *供水技术*, 2021, 15(2): 19-22.  
YIN Y S, JIANG Z H, JIANG W H. Comparison and application of online monitoring system for ozone in water by full spectrum scanning spectrophotometry [J]. *Water Technology*, 2021, 15(2): 19-22.