

闫维茂, 姜凯阳, 范玉柱, 等. 饮用水处理中纳滤膜生物污染特性及控制技术研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 10-21, 47.

Yan W M, Jiang K Y, Fan Y Z, et al. Research progress on characteristics and control technology of nanofiltration membrane biofouling in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 10-21, 47.

## 饮用水处理中纳滤膜生物污染特性及控制技术研究进展

闫维茂<sup>1</sup>, 姜凯阳<sup>1</sup>, 范玉柱<sup>2</sup>, 芮旻<sup>2</sup>, 王虹<sup>1,\*</sup>

(1. 同济大学环境与科学工程学院, 上海 200092; 2. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要** 【目的】生物污染是制约纳滤(NF)膜长期稳定运行的痛点问题。微生物在膜表面形成生物膜会导致跨膜压升高、水通量下降以及膜结构损伤, 缩短膜使用寿命。【方法】本文综述了饮用水处理系统 NF 膜生物污染特征、形成机制及影响因素, 探讨了多种预处理手段(如超滤、消毒剂、紫外辐射)以及改性膜(如聚合物改性、纳米金属粒子改性、功能官能团改性)对 NF 膜生物污染的预防能力。分析了膜清洗对 NF 膜生物污染的控制效果, 介绍了新型生物控制方法(如群体感应抑制剂、噬菌体)在 NF 膜生物污染治理中的潜在应用前景。【结果】NF 膜生物污染的发生受微生物群落构成、化学污染物的协同作用及环境条件的影响, 而多种预处理、膜改性、膜清洗及生物防控手段能缓解膜污染。【结论】本文深化了对 NF 膜生物污染特征以及控制措施的了解, 揭示了当前生物污染控制技术的效能与局限。未来研究应着重于开发具有长效抗污性能的新型 NF 膜、重视生物污染早期识别与精准防控, 以及深入探究环境工程条件对生物污染发展进程的影响机制。

**关键词** 纳滤; 生物污染; 微生物群落; 纳米金属膜改性; 群体感应抑制

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0010-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.002

## Research Progress on Characteristics and Control Technology of Nanofiltration Membrane Biofouling in Drinking Water Treatment

Yan Weimao<sup>1</sup>, Jiang Kaiyang<sup>1</sup>, Fan Yuzhu<sup>2</sup>, Rui Min<sup>2</sup>, Wang Hong<sup>1,\*</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract** [Objective] Biofouling is a critical issue that restricts the long-term stable operation of nanofiltration (NF) membranes. Biofouling on membrane surfaces leads to increased transmembrane pressure, decreased water flux, and membrane structural damage, thereby shortening membrane lifespan. [Methods] This paper reviews the characteristics, formation mechanisms, and influencing factors of biofouling in NF membranes in drinking water treatment systems. It discusses the preventive effectiveness of various pretreatment methods (such as ultrafiltration, disinfectants, and ultraviolet irradiation) and modified membranes (e.g., polymer modification, nanometal particle incorporation, functional group modification) on NF membrane biofouling. It further analyzes the effectiveness of membrane cleaning in controlling biofouling on nanofiltration membranes and discusses the potential applications of novel biofouling control methods (such as quorum-sensing inhibitors and bacteriophages) for NF membranes. [Results] Biofouling of NF membranes is influenced by microflora composition, synergistic interactions with chemical contaminants, and effects of environmental conditions. Various pretreatments, membrane modification, membrane cleaning, and biological control strategies have shown effectiveness in alleviating biofouling. [Conclusion] This paper deepens understanding of the features of NF membranes biofouling and control measures, reveals the effectiveness and limitations of current biofouling control technologies. Future research should focus on developing novel NF membranes with long-lasting antifouling performance, emphasize early and accurate identification of biofouling and precise prevention and control, and further explore the effect mechanisms by which environmental factors and

[收稿日期] 2025-09-26

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(52570110)

[作者简介] 闫维茂(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为饮用水微生物的检测与控制, E-mail: 2431489@tongji.edu.cn。

[通信作者] 王虹(1984—), 女, 副教授, 研究方向为饮用水微生物安全, E-mail: hongwang@tongji.edu.cn。

engineering conditions affect the dynamic development of biofouling.

**Keywords** nanofiltration (NF); biofouling; microflora; nanometal membrane modification; quorum-sensing inhibition

纳滤(NF)属于压力驱动膜技术,通过孔径筛分和电荷效应实现精准选择性分离。孔径为1~2 nm的NF膜可实现对各种天然有机质(NOM)以及高价离子<sup>[1]</sup>[如钙离子(Ca<sup>2+</sup>)、镁离子(Mg<sup>2+</sup>)]的选择性截留,并能够保留适量电解质满足消费者的饮用口感<sup>[2]</sup>。NF分离技术能耗低、选择性强,并且能广泛应用于地表水、井水、咸水和海水等不同水源的饮用水生产中<sup>[1]</sup>。大量研究表明,NF膜在应用于饮用水处理时,对水中多价离子、化学需氧量(COD)、总有机碳(TOC)和总磷(TP)的截留率均能达到90%以上<sup>[3]</sup>,且能够去除99%以上的细菌和病毒<sup>[4]</sup>。在重金属去除效果方面,NF技术对砷(As)以及砷酸盐的去除率分别高达95%和90%以上<sup>[5-6]</sup>,表现出良好的分离性能。

膜污染是影响NF膜在饮用水处理场景中应用的主要障碍,而生物污染在NF膜污染中占比达40%~50%<sup>[7]</sup>。细菌、真菌、原生动物等微生物在NF膜表面的堆积和生长并形成生物膜,影响其运行性能。生物污染可导致NF膜渗透压逐渐增大、产水量降低、运行能耗增加。微生物分泌的溶解酶等还会损伤NF膜的结构,进一步影响NF膜的使用寿命<sup>[8-9]</sup>。因此,研究NF膜生物污染特征以及控制措施对提高水处理效率、降低运行成本等具有重要意义。

## 1 饮用水NF膜生物污染特征及对膜性能的影响

### 1.1 微生物群落组成

由于水源水质(如地下水、自来水、地表苦咸水等)、NF膜材料(如聚酰胺膜、聚丙烯膜等)及表面性质的差异,饮用水处理NF膜表面易产生复杂的微生物污染。目前,已有研究针对不同应用场景下NF膜表面微生物组成特征进行了分析(表1)。例如,Tian等<sup>[10]</sup>采用16S rRNA基因测序研究了氧化石墨烯NF膜过滤天然地表水后膜表面微生物群落的组成。结果显示,膜表面变形菌(Proteobacteria)数量占比达到40%以上,拟杆菌(Bacteroidota)的数量占比达到10%,其中黄杆菌(*Flavobacterium*)和假单胞菌(*Pseudomonas*)是优势菌属。Wolf-Baca

等<sup>[11]</sup>采用16S rRNA基因测序系统地分析了用于过滤自来水的聚丙烯NF膜表面细菌群落的组成,膜上Proteobacteria以及放线菌(Actinobacteriota)的相对丰度分别达到了74.40%和21.85%,蓝藻菌(Cyanobacteria)在部分样品中发生季节性增高,占比可达17.86%~77.71%。Qin等<sup>[12]</sup>采用16S rRNA基因测序分析了家用进水器聚丙烯NF膜表面的微生物群落组成,结果发现该NF膜表面Proteobacteria和Actinobacteriota的数量分别占到了69.8%和10.6%,优势菌属包括酸性单胞菌(*Acidovorax*)、柄杆菌(*Caulobacter*)等。可见,在NF膜表面微生物组成中,Proteobacteria普遍存在,但在属水平组成上可存在较大差异,可能与水化学性质、环境条件等因素有关。因此,深入研究膜生物污染的微生物具体组成及影响因素,有助于提出针对性的生物污染控制策略<sup>[11-15]</sup>。

### 1.2 微生物在膜表面的附着机制

膜表面微生物的黏附是一个复杂的过程,受环境条件、微生物特性和膜材料表面的物理、化学特性等诸多因素的影响<sup>[16]</sup>。微生物黏附过程包含以下三个阶段(图1)。第一阶段:细菌等微生物通过布朗运动、对流传输作用、重力作用等被物理运送到膜表面,克服静电排斥力后与膜表面直接接触。第二阶段:松散结合的微生物通过释放胞外聚合物(EPS)巩固黏附过程,新的细菌不断沉积在先前细菌产生的EPS“停滞点”上形成生物膜。没有物理或化学干预时,该黏附过程往往不可逆,微生物将牢固地附着在膜表面<sup>[17]</sup>。第三阶段:以有机物为食的微生物继续附着,生物膜持续积累,在流体横向剪切力影响下,微生物群落可能从部分生物膜上脱落<sup>[18]</sup>。

### 1.3 生物污染对膜性能的影响

在NF膜生物污染形成机制中,微生物代谢产生的EPS是诱发膜污染的关键因素<sup>[19]</sup>。EPS是由多糖、蛋白质、脂质和核酸等生物大分子构成的黏性基质,为微生物附着于NF膜提供物质基础。生物污染通过以下途径影响膜性能:1)微生物在膜表面形成致密凝胶层增加跨膜压差;2)微生物及其代谢产物造成NF膜膜孔堵塞,导致渗透压升高、水

表 1 不同饮用水 NF 膜表面微生物组成对比  
Tab. 1 Comparison of Microbial Composition on NF Membrane Surface for Different Drinking Water

处理对象	NF 膜类型	前处理	微生物分析手段	微生物优势菌(门水平)	微生物优势菌(纲、科、属水平)	参考文献
天然地表水(北京市)	氧化石墨烯膜	15~25 μm 滤膜	16S rRNA 基因测序	Proteobacteria(40%)以上、Bacteroidota (10%)、Actinobacteriota(1%)	<i>Flavobacterium</i> 、 <i>Pseudomonas</i> 、水杆菌( <i>Aquabacterium</i> )	[10]
市政管网自来水(波兰)	商用 4 级净水系统 NF 膜	前三阶段滤芯过滤	16S rRNA 基因测序	Proteobacteria (74.40%)、Actinobacteriota (21.85%)、Cyanobacteria (17.86%~77.71%)	分枝杆菌( <i>Mycobacterium</i> , 4.37%~21.81%)、 <i>Pseudomonas</i> 、鞘氨醇单胞菌( <i>Sphingomonas</i> )、甲基杆菌( <i>Methylobacterium</i> )	[11]
市政管网自来水(上海市)	商用净水器 NF 膜	0.22 μm 膜过滤	16S rRNA 基因测序	Proteobacteria (69.8%)、Actinobacteriota (1.5%~10.6%)、Bacteroidota (3.9%~19.4%)、厚壁菌(Firmicutes, 0.9%~14.3%)	γ-变形菌未分类群(Gammaproteobacteria-unclassified, 7.3%)、 <i>Acidovorax</i> (12.9%)、丛毛单胞菌未分类群( <i>Comamonadaceae-unclassified</i> , 34.2%)	[12]
农村地下饮用水(河南省开封市)	DF-3013 NF 膜	—	16S rRNA 基因测序	Proteobacteria (62.07%)、Actinobacteriota、Bacteroidota	莱茵海默菌( <i>Rheinheimera</i> )、67-14 未定科(Norank-f-67-14)、Comamonadaceae-unclassified、酮杆菌( <i>Ketobacter</i> )、硫杆菌( <i>Thiobacillus</i> )	[13]

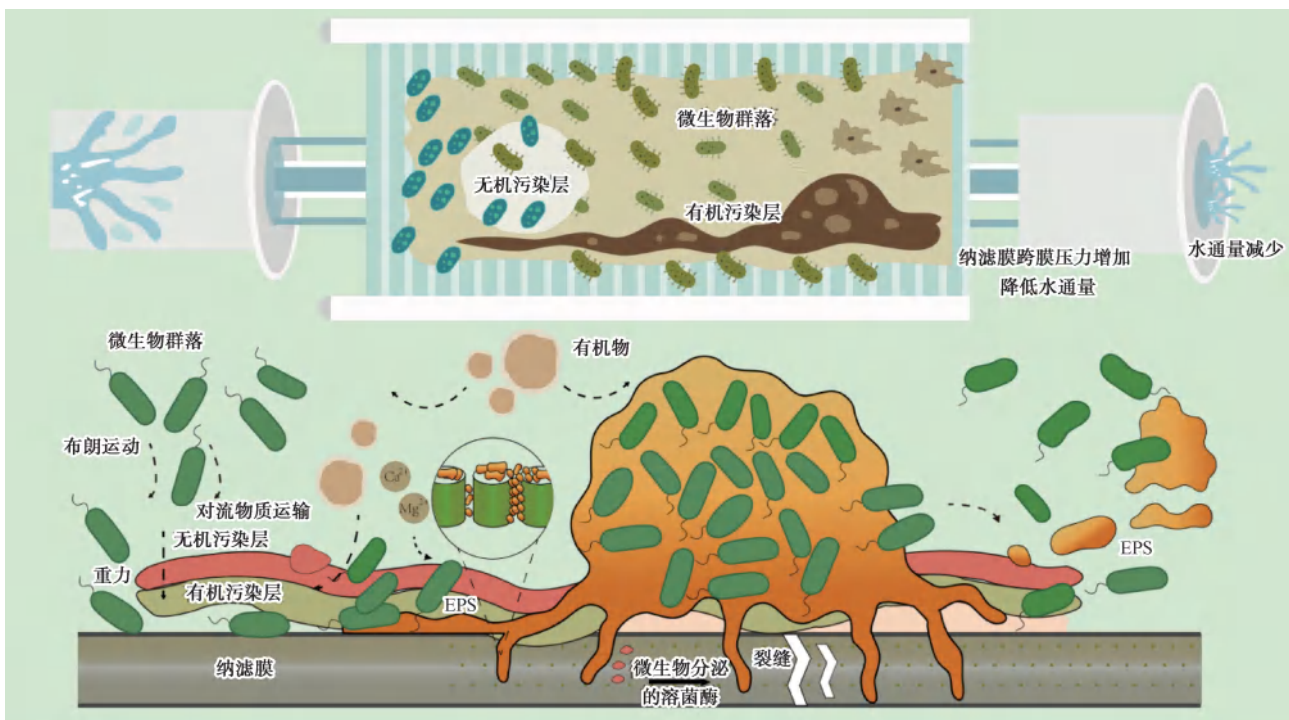


图 1 NF 膜表面生物污染形成机理

Fig. 1 Mechanism of Biofouling Formation on the Surface of NF Membranes

通量降低<sup>[16]</sup>;3)部分微生物分泌的有机酸、酶等腐蚀 NF 膜(图 1)。Liu 等<sup>[20]</sup>研究商用 NF270 膜表面生物污染动力学过程发现,铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)在 48 h 内产生的 EPS 葡聚糖导致膜水通量下降 68.3%。Fonseca 等<sup>[21]</sup>研究

了 EPS 对 NF 膜水通量的影响发现,水通量下降与膜表面 EPS 增加相关。*Pseudomonas aeruginosa* 在 NF70 膜表面分泌的 EPS 质量从 50 mg 增加到 500 mg 时,膜水通量下降了 35%以上。跨膜压差增大以及流体阻力增大是影响 NF 膜正常运行的主要原

因,而 EPS 在其中起到关键作用<sup>[22]</sup>。

#### 1.4 膜生物污染的影响因素

##### 1.4.1 温度

水温是影响 NF 膜性能及其生物污染的关键参数。温度会影响到水的黏度,低温( $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )可降低 NF 膜的孔径以及水通量,温度升高能降低水的黏度减少水力阻力<sup>[23]</sup>。Xu 等<sup>[24]</sup>研究了不同水温对商用疏松型和致密型薄膜复合 NF 膜孔径的影响。研究表明,当水源温度从  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  升至  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,疏松型和致密型 NF 膜的孔径分别从  $0.48\text{ nm}$  和  $0.46\text{ nm}$  增大至  $0.56\text{ nm}$  和  $0.51\text{ nm}$ ,2 种膜的水通量均随温度的升高而显著增加。温度不仅会改变 NF 膜的物理性能,还会影响到其表面微生物的数量、EPS 分泌及生物污染的程度。Hitchin 等<sup>[25]</sup>研究了聚哌嗪 NF270 膜处理苏格兰某湖泊水过程中膜表面 EPS 的沉积情况,发现当进水温度由  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高到  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,膜表面 EPS 的厚度显著增加,膜水通量从原始膜的  $64\%$  降低至  $59\%$ 。Davidkova 等<sup>[26]</sup>对苏格兰某水厂醋酸纤维素 NF 膜的研究中发现,在水温超过  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,微生物活性最高,膜表面产生了严重的生物污染,水通量损失  $30\% \sim 50\%$ 。一般而言,在较高水温条件下,膜表面生物膜生长速度快、微生物活性高,但附着强度较低;较低水温条件下,生物膜生长速度慢,但附着强度可能增强<sup>[27]</sup>。

##### 1.4.2 pH

pH 能够调控 NF 膜表面的电荷特性以及微生物生长环境。多数微生物在中性环境下呈现负电性。膜表面的 Zeta 电位随着 pH 的升高而下降,NF 膜表面电荷密度逐渐增加,静电斥力增强,从而抑制微生物的沉积<sup>[28]</sup>。Yu 等<sup>[29]</sup>研究了不同 pH 条件下 NF-3 膜处理伦敦海德公园地表水时表面膜污染的情况。随着 pH 值从  $5.0$  升高至  $7.3$ ,膜表面 Zeta 电位从  $-16\text{ mV}$  降至  $-19\text{ mV}$ ,负电性增强,膜水通量在 pH 值为  $7.3$  条件下达到最大,其原因在于较高的 pH 可减少膜表面生物污染。Li 等<sup>[30]</sup>研究了甘蔗汁净化过程中 pH 对自制 NF5 膜生物污染的影响,发现 pH 值为  $5 \sim 6$  时,主要污染菌葡聚糖乳杆菌生长速度最快。然而,pH 对 NF 膜生物污染的影响并非孤立存在,还受水通量、离子强度等运行条件的影响。

##### 1.4.3 有机污染、无机污染对膜生物污染的影响

生物污染通常伴随有机污染和无机污染同时发

生。微生物在 NF 膜上附着的过程会受到环境中有机物、无机离子的影响(图 1)。了解有机、无机污染对微生物在 NF 膜表面附着行为的影响对生物污染的有效控制具有重要意义。

大分子以及蛋白质类有机污染层能够改变膜表面的疏水性和表面自由能等,从而影响生物污染的形成过程<sup>[31]</sup>。Heffernan 等<sup>[32]</sup>利用荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)作为模型菌种,研究 NF 过程中腐植酸、海藻酸为主的有机污垢层对其黏附的物理影响。结果表明,清洁膜上细菌的表面覆盖率( $24\% \pm 3\%$ )远高于存在腐植酸( $9.8\% \pm 4.0\%$ )和海藻酸( $7.5\% \pm 4.0\%$ )污染的 NF 膜。这与有机污染层增强膜表面的亲水性、降低细菌黏附率有关。Subramani 等<sup>[33]</sup>利用恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)作为模型菌种,研究了有机物(牛血清白蛋白、海藻酸)对 NF270 聚酰胺 NF 膜上细菌沉积的影响,发现有机污染物的存在可提高膜表面的亲水性,恶臭假单胞菌的黏附速率相比原始膜降低了  $10\%$  以上,表现出更强的抗生物污染能力。

此外,无机离子也能与有机物发生交互作用对 NF 膜表面生物污染产生影响。Zhao 等<sup>[34]</sup>研究了有机物(海藻酸钠、牛血清白蛋白、腐植酸)与  $\text{Ca}^{2+}$  对商用聚酰胺复合 NF 膜表面生物污染的联合影响,发现  $\text{Ca}^{2+}$  ( $2\text{ mmol/L}$ ) 和牛血清白蛋白共存造成了严重的膜生物污染,较未加  $\text{Ca}^{2+}$  的对照组微生物数量增加了  $150\%$  以上;而  $\text{Ca}^{2+}$  浓度加到  $5\text{ mmol/L}$  和  $8\text{ mmol/L}$  时,膜表面的微生物数量较未加  $\text{Ca}^{2+}$  时反而减少了  $15\%$ 。Mo 等<sup>[35]</sup>的研究也有类似的发现,在  $\text{Ca}^{2+}$  与海藻酸盐共污染体系中, $\text{Ca}^{2+}$  浓度小于  $4\text{ mmol/L}$  时,膜表面海藻酸盐发生严重的聚集;而  $\text{Ca}^{2+}$  浓度增加到  $4 \sim 6\text{ mmol/L}$  时,膜表面有机物堆积减少,降低了微生物在膜表面的附着和生长。主要原因在于较高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  会抑制微生物的活性和形成结构更加致密的钙盐层,从而抑制生物污染<sup>[34-35]</sup>。

## 2 预处理技术对生物污染的防控

预处理是指在 NF 膜分离系统运行之前,为减少膜污染(微生物、有机物等)、提高运行效率对原水进行处理的措施。预处理策略分为物理过滤以及化学消毒 2 类:一是在 NF 膜过滤之前使用超滤、砂滤等物理截留方式去除营养物质以及减少微生物的数量<sup>[36]</sup>;二是在进水中添加化学消毒剂[如氯

(Cl<sub>2</sub>)、臭氧等],灭活细菌、病毒、原生动物的微生物,或者使用紫外辐射对微生物的遗传物质进行破坏达到减少细菌数量的目的,消毒后再进行 NF 处理<sup>[37]</sup>,表 2 总结了常见预处理方法及其优缺点。

### 2.1 超滤

超滤可作为 NF 的预处理手段,通常置于 NF 膜过滤系统前去除水中大分子蛋白质、天然有机物(NOM)、悬浮颗粒、细菌以及部分病毒。超滤预处理在 NF 膜生物污染控制方面具有显著的优势。李雨轩等<sup>[38]</sup>采用 6.5 m<sup>2</sup> 的聚醚砜(PES)超滤膜与 8 m<sup>2</sup> 聚酰胺 NF 双膜串联组合工艺处理年均浑浊度为 55.73 NTU、高锰酸盐指数为 4.24 mg/L 的东太湖水,发现超滤预处理工艺对 TOC 和 254 nm 处紫外吸光度(UV<sub>254</sub>)的去除率均可达到 70%以上,显著高于生物活性炭预处理的去除率(30%)。Ma 等<sup>[39]</sup>采用超滤与 NF 双膜工艺,对湖泊水源进行为期 1 a 的中试研究,发现在超滤阶段,对 UV<sub>254</sub> 以及荧光物质的去除率分别达到了 92%和 99%,藻类生物和微生物的去除率分别达到 99.8%和 99.9%。然而,分子质量小于 1×10<sup>4</sup> u 的 EPS、病毒(如诺如病毒、轮状病毒等)仍可能穿透超滤膜<sup>[40-41]</sup>。

### 2.2 紫外辐射预处理

紫外辐射抑制生物污染的机制有 2 种:一是微生物细胞膜中蛋白质吸收紫外光,导致细胞膜受损、原生质泄漏甚至微生物细胞死亡;二是细胞核酸吸收辐射导致脱氧核糖核苷酸(DNA)损伤,微生物停滞在复制期无法繁殖<sup>[42]</sup>。Marconnet 等<sup>[42]</sup>利用低压汞蒸汽灯(254 nm)以 400 J/m<sup>2</sup> 的剂量进行紫外预处理,发现 NF 单元活菌数量相较无紫外预处理的对照组减少 60.2%。在过滤澄清河水 20 周后,紫外预处理组 NF 膜水通量仅下降了 6.6%,显著低于无紫外预处理组的 14.9%。Feng 等<sup>[43]</sup>研究了真空紫外线(VUV, 254、185 nm)预处理对重力驱动膜(GDM)过滤性能的影响。结果表明,VUV 预处理后的膜水通量相较无预处理组提高了 22.2%,低分子质量中性物质和蛋白质类物质去除率也分别提高了 22.5%和 40.1%。VUV 有效降低了细菌和蛋白质对膜的黏附。但紫外预处理只能抑制生物膜的形成,对成熟生物膜的影响较小<sup>[44]</sup>。紫外预处理还面临着细菌 DNA 修复等问题,紫外消毒后的细菌暴露于可见光后会通过光解酶进行损伤修复重新恢复活性,从而继续在膜上生长造成污染<sup>[45]</sup>。

### 2.3 化学消毒剂

次氯酸钠(NaClO)、臭氧等消毒剂常用于水厂 NF 单元前对饮用水中的微生物进行控制,以抑制微生物在 NF 膜表面生长繁殖。消毒剂的强氧化性可以有效灭活微生物、减少细菌 EPS 分泌<sup>[46]</sup>,减轻 NF 膜表面的生物污染,延缓 NF 膜通量的衰减。

Cl<sub>2</sub> 是饮用水中常用的化学消毒剂,主要用于微生物灭活与生长控制。Yu 等<sup>[47]</sup>研究了模拟地表水源(将生活污水与自来水按 1:50 的比例混合)预氯化对 DK NF 膜表面生物污染的影响。研究发现,1 mg/L NaClO 预氯化处理使得膜表面微生物死菌比例从 38.4%上升至 72.2%。但 NaClO 的强氧化性会对 NF 膜造成损伤,尤其是聚酰胺膜中的酰胺键对游离氯十分敏感,因此需要在 NF 前通过活性炭等方式去除余氯或者通过膜改性手段增强膜耐氯性<sup>[48]</sup>。Su 等<sup>[49]</sup>采用界面季铵化法制备了高耐氯抗菌 UA60 NF 膜。研究发现,该膜在 200 mg/L NaClO 溶液浸泡 20 d 仍保持着 80%以上的离子截留率,并且对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌抗菌率达到了 90%以上。通过共价改性、引入纳米材料、使用新型单体等方法设计耐氯膜是近年来膜材料研究和发展的方向。

臭氧氧化性强,能够有效杀灭水中的原生动物、细菌和病毒<sup>[50]</sup>,但臭氧的强氧化性会对膜表面结构造成破坏。在实践中,臭氧常与活性炭联用,以增强预处理效果。Chen 等<sup>[37]</sup>通过中试试验研究了臭氧-活性炭预处理控制 NF 膜污染的效果。结果发现,臭氧-活性炭预处理相较砂滤预处理,膜系统的运行时长增加 12.34 倍,氨基酸和酪氨酸类物质去除率分别达到了 72.26%和 69.27%,在去除中小分子质量的物质同时,也显著减少了微生物的附着。

### 3 材料改性提升 NF 膜抗污染性能

NF 膜改性的目的在于提高亲水性和抗污染能力。亲水性高的 NF 膜表面容易形成水合层,从而阻碍有机物、微生物直接接触膜表面,降低生成生物污染的风险。抗污染改性通常通过制膜过程中加入具有抗菌性能的纳米材料[银纳米粒子(AgNPs)、二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)、碳纳米管等]或有机抗黏附制剂[聚多巴胺(PDA)、聚乙二醇(PEG)、聚乙烯醇(PVA)等]赋予 NF 膜抗污染属性<sup>[54]</sup>。常用制备抗污染膜策略包括:1)通过相转化法或者界面聚合法将添加

表 2 NF 预处理工艺方法比较  
Tab. 2 Comparison of Pretreatment Methods for NF

处理方法	机制	优/缺点	影响	参考文献
紫外消毒	损伤微生物细胞膜和遗传物质	优点:安装简便、能耗低、易于操作; 缺点:持续效果不理想	类蛋白质物质去除率提高 40.1%、细菌数量减少 60.2%	[42,51]
超滤、微滤	物理过滤	优点:去除效果优异; 缺点:成本较高	UV <sub>254</sub> 去除率大于等于 92%、荧光物质去除率超过 98%;藻类、微生物去除率超过 99%	[39]
砂滤	物理过滤	优点:结构简单、适用于多种水源; 缺点:占地面积大	溶解性有机碳(DOC)、UV <sub>254</sub> 的去除率分别达到 18.56%和 47.33%	[37,52]
混凝	混凝沉淀	优点:操作简单、成本低; 缺点:会产生污泥、可能残留混凝剂	明矾和聚合氯化铝(PACl)对病毒去除率达到 90%以上;三氯化铁(FeCl <sub>3</sub> )除菌率达到 99.8%以上	[52]
臭氧(常与活性炭联用)	抑制微生物生长、改变天然有机物结构和性质	优点:杀菌效率高; 缺点:持续消毒效果不理想、强氧化性可损伤 NF 膜	氨基酸和酪氨酸类物质去除率达 72.26%和 69.27%;对大肠杆菌等细菌去除率达 99.9%以上	[37,53]
次氯酸(HClO)、次氯酸根离子(ClO <sup>-</sup> )	破坏微生物细胞膜、生物物质	优点:持续消毒效果好、工艺成熟、成本低; 缺点:强氧化性可损伤 NF 膜	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的去除率分别达到 99.99%、90.00%以上	[53]

剂、表面改性剂等与膜铸溶液混合制备出具有功能性的超薄纳米复合膜;2)通过表面涂层、接枝、共价偶联等方式将功能性物质涂覆在基膜表面<sup>[54-55]</sup>。尽管现有商业化膜组件中常用的聚酰胺薄膜复合 NF 膜、醋酸纤维素膜具有一定亲水性,但在实际运行条件下仍难以保证长期稳定的抗生物污染性能<sup>[56-58]</sup>。因此,通过表面改性进一步提升亲水性并增强抗污染稳定性,对提高 NF 膜长期运行性能与工程适用性具有重要意义。

### 3.1 聚合物改性 NF 膜

聚合物材料改性 NF 膜有以下 2 种方式实现抗生物污染:一是在 NF 膜表面形成阻碍微生物定植和减少营养物质黏附的水合层;二是改变 NF 膜表面粗糙度和结构等以减少污染物的附着。Miller 等<sup>[59]</sup>以 TS80 卷式 NF 膜为基底,通过表面涂覆方式将 PDA 以及 PEG 固定在膜表面,研究发现 PDA 与 PEG 联合改性的 NF 膜相较无改性膜在 24 h 内铜绿假单胞菌的覆盖量减少 75%。Zhu 等<sup>[60]</sup>采用沟槽法和涂层法将 PVA 固定在聚酰胺薄膜复合 NF 膜表面,发现 PVA 改性膜相较沟槽改性膜和未改性膜抗污性能强,每次水力冲洗后水通量恢复率均超过 80%,而 PVA 沟槽改性膜表现出更优的盐截留能力。然而,聚合物改性会导致膜孔径以及膜表面电荷的变化,从而使得膜分离效率降低。Wang 等<sup>[61]</sup>通过 PDA 自聚合方式改性 PES 膜发现当 PDA 质量分数从 0.05%增加到 0.1%时,改性膜对硫酸钠和

氯化镁的盐截留率都有所下降,从而影响到膜渗透性和分离能力。

### 3.2 纳米金属粒子改性膜

纳米金属粒子可通过化学键或物理吸附沉积在 NF 膜表面或孔道内,或是通过相转化等方式嵌入膜基质<sup>[62]</sup>。纳米金属粒子通过靶向作用于细菌细胞表面或者微生物结构蛋白,可实现对微生物的有效灭活<sup>[63]</sup>。有研究<sup>[64]</sup>表明,平均负载 9.7 mg AgNPs 的薄膜复合材料 NF90 膜对大肠杆菌杀菌率达到了 90%以上,并且在 24 h 之内表现出了持续杀菌的效果。Zhang 等<sup>[65]</sup>研究了 AgNPs 与纳米铜粒子(CuNPs)双金属体系改性的 NF 聚砜(PSF)膜,发现 AgCuNPs NF 膜对大肠杆菌抑菌圈直径从 1.5 mm 扩大到了 3.0 mm,表明该改性膜抗菌性能较原始膜得到了提升<sup>[66]</sup>。

纳米金属粒子还可与聚合物共同改性 NF 膜实现多功能协同作用。例如,Xu 等<sup>[67]</sup>采用 PDA 联合纳米材料 TiO<sub>2</sub> 改性纳米氧化石墨烯(GO)膜,PDA 改性显著提高了 GO 膜的亲水性,微生物细胞量和 EPS 覆盖量分别减少了 29.4%和 40.3%。当 PDA 搭载质量分数为 5%~10%的 TiO<sub>2</sub> 时,膜表面细菌附着率以及 EPS 覆盖量进一步减少至 2.0%和 11.4%。多孔材料能够优化纳米粒子的空间分布,增强膜的抗菌性能。Abadikhah 等<sup>[68]</sup>采用 TiO<sub>2</sub>-AgNPs 协同还原氧化石墨烯(rGO)改性聚酰胺薄膜复合 NF 膜发现质量分数为 0.4%的 TiO<sub>2</sub>-AgNPs 改

性膜对大肠杆菌的抑制率达到了 95% 以上同时降低了纳米材料的用量。虽然纳米金属粒子改性 NF 膜表现出了优异的抗菌性能,但纳米金属粒子在使用中仍会被氧化或脱落,造成 NF 膜抗生物污染性能下降以及对水体产生污染<sup>[54]</sup>。

### 3.3 碳基材料改性 NF 膜

碳纳米管(CNT)、石墨烯等碳基材料能够通过提高膜亲水性、改变膜表面形貌等多重机制赋予 NF 膜抗污染性能<sup>[69]</sup>。Zheng 等<sup>[70]</sup>以 PES 超滤膜为基底,通过界面聚合法制备出磺化多壁碳纳米管(SMWCNT)薄膜复合 NF 膜,研究发现改性膜水通量相较原始膜提升了 1.6 倍,并在牛血清白蛋白等蛋白类物质污染后,清洗后水通量恢复率能达到 91.2%。Geng 等<sup>[71]</sup>采用界面聚合法制备出咪唑改性羧基氧化石墨烯(Im-CGO)薄膜复合 NF 膜,该改性膜对大肠杆菌的抗菌率提升了 90%,并且水通量较原始膜提高 80.8%。但碳基材料生产成本低、合成复杂以及合成方法可重复性较差,使得碳基材料改性膜的研究仍局限于实验室探索阶段<sup>[72]</sup>。

## 4 膜清洗技术

在实际饮用水 NF 膜工程中,膜组件多为商业化标准化模块,运行过程中会不可避免地发生不同程度的生物污染。由于直接更换膜材料或更换膜组件成本高、停机影响大,工程端更依赖于针对在役膜组件的运行调控与清洗维护措施实现污染缓解与性能恢复。因此,膜清洗作为在役 NF 膜生物污染控制的关键手段,能够有效缓解 NF 膜生物污染,延缓跨膜压升高与通量衰减,延长膜使用寿命<sup>[73]</sup>。

膜清洗分为物理清洗和化学清洗 2 类。物理清洗包括海绵球清洗(适用于管式 NF 膜<sup>[74]</sup>)、正冲洗、反冲洗(去离子水冲洗)以及超声波等方式,具有操作简单、对膜损伤小等特点,但物理清洗效果有限,无法彻底去除顽固生物污染,对膜生物污染长期控制效果较差。化学清洗通过使用酸性剂(柠檬酸、盐酸、硝酸等)或者碱性剂(氢氧化钾、氢氧化钠、氢氧化铵等)去除膜污染,清洗效率高,可较彻底去除生物污染,但化学清洗长期使用会导致膜材料不可逆劣化。

不同物理清洗方式对 NF 膜污染的去以及膜性能恢复有不同的效果。Thombre 等<sup>[75]</sup>系统分析了超声波清洗、反冲洗对平板式聚酰胺 NF 膜处

理人工合成污水后膜水通量的恢复情况。结果表明,1 500 kPa、30 min 去离子水反冲洗后膜通量恢复率仅为 58%,对有机污染以及微生物去除效果不佳。24 kHz、150 W 的超声波清洗 NF 膜 1 min 后,膜恢复通量则达到了 78%,较反冲洗污染去除效率有所提升。但超声波清洗存在膜物理损伤以及清洗不均匀等问题,且超声波辅助膜清洗研究大多集中在平板膜上,对其他不同类型膜组件的研究<sup>[76]</sup>仍较少。

化学清洗较物理清洗能更加有效去除生物污染。Zhang 等<sup>[77]</sup>研究了 4 种化学消毒剂[柠檬酸、NaOH、乙二胺四乙酸四钠( $\text{Na}_4\text{-EDTA}$ )、十二烷基硫代硫酸钠( $\text{Na-SDS}$ )]对聚酰胺复合膜 NF270 处理松花江原水后膜清洗效率的影响,发现 4 种化学消毒剂在单循环清洗后,NF 膜的渗透率恢复效率分别达到 74.6%、84.1%、90.5% 和 94.2%,柠檬酸在控制长期膜生物污染方面清洗效果最差,而 Na-SDS 在第 4 个化学清洗循环后,渗透率恢复效率仍能保持 82%。但随着过滤系统长期运行,NF 膜上的不可逆污染逐渐累积,化学清洗也难以控制不可逆污染的发生。

物理清洗和化学清洗往往可以协同清洁 NF 膜,从而降低单一清洗方式的局限性。Wang 等<sup>[78]</sup>探讨了超声波辅助酸洗处理富砷咸水污染的聚酰胺 NF 膜(NF3A),发现超声波协同作用能使膜水通量恢复 95%,并且较单纯酸清洗时间缩短 30%。同时,超声波协同化学药剂清洗有效降低了化学药剂的用量。

总体而言,物理清洗可用于去除可逆污染并实现短期通量恢复,而化学清洗对生物膜与有机复合污染更有效,但需兼顾膜材料耐受性与长期性能衰减风险;因此,工程实践中更倾向于采用“运行优化 + 物理冲洗 + 定期化学清洗”的组合策略,以实现对在役膜组件生物污染的长期可控。

## 5 生物防控技术

生物防控通过干扰微生物群落行为或者代谢途径抑制生物污染的形成,以实现 NF 膜对污染物控制以及长期稳定运行的目的<sup>[79]</sup>。主要技术方式包括:1) 通过改性方式将群体感应(QS)抑制剂、酶等涂覆在 NF 膜表面,从而使膜具有抗污染能力;2) 利用噬菌体特异性识别宿主表面受体并裂解

NF膜上的细菌以控制膜生物污染<sup>[53]</sup>。与传统物理、化学处理方法相比,生物法在保持膜材料结构完整性的同时,还展现出环境低毒性、可生物降解等特点<sup>[80]</sup>。然而,受制于菌种活性维持、反应条件苛刻以及运行成本等因素,生物防控技术整体上仍局限于实验室研究阶段,尚未能实现工业化规模的应用<sup>[80-82]</sup>。

### 5.1 QS抑制剂抑制生物污染的形成

QS是细菌通过分泌和感知信号分子进行细菌间通信的方式。QS抑制剂(图2)已被证实是阻断细菌分泌QS信号因子的重要手段<sup>[83]</sup>。Kim等<sup>[84]</sup>

试验研究发现,将分解QS信号因子的酰化酶改性固定在聚酰胺NF膜上,在200 kPa恒定压力运行38 h后该改性膜生物膜厚度较无改性膜减少了25  $\mu\text{m}$ ,水通量、酶活性仍保持在初始的90%以上。Li等<sup>[85]</sup>将QS抑制剂槲皮素(黄酮类化合物)固定在平板式聚酰胺NF膜发现,当槲皮素的质量浓度升高到500 mg/mL,大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌的生物膜厚度分别从26.03  $\mu\text{m}$ 和28.31  $\mu\text{m}$ 降低到7.07  $\mu\text{m}$ 和9.75  $\mu\text{m}$ 。然而, QS抑制剂只能抑制细菌QS的行为,而无法直接杀死细菌,对于成熟的生物膜的控制能力有限<sup>[84-86]</sup>。

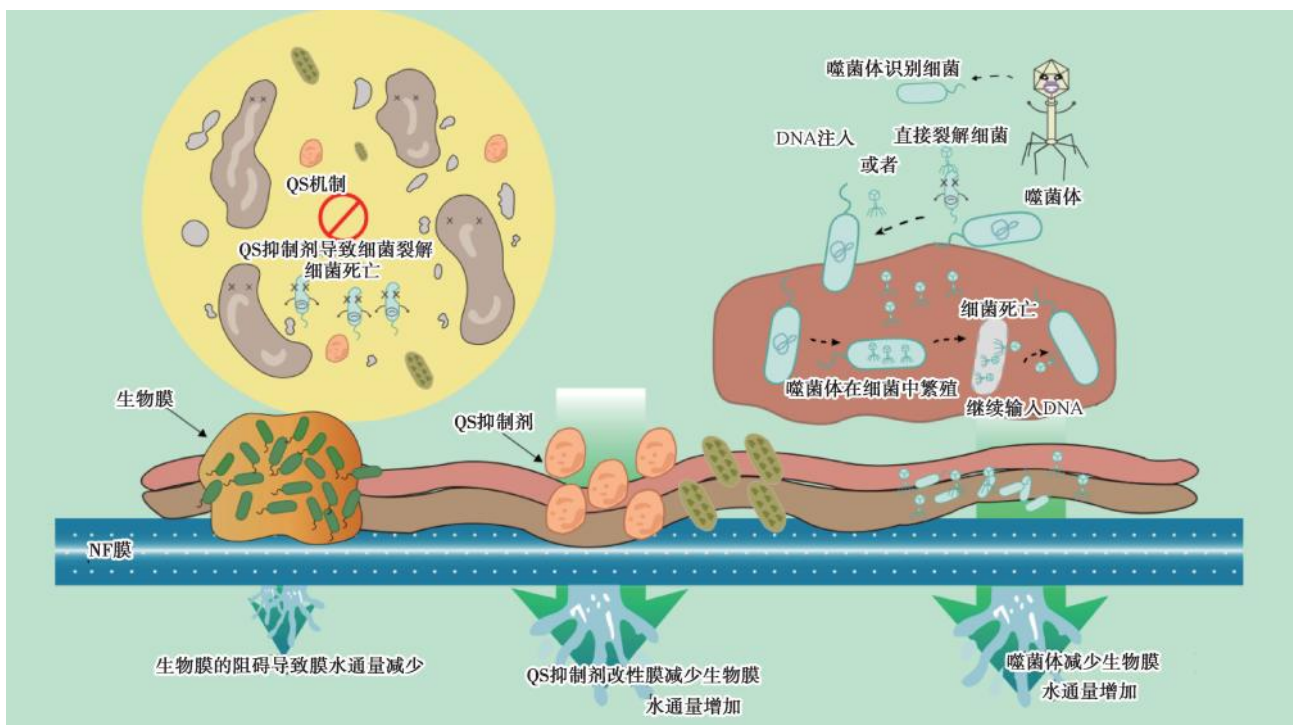


图2 NF膜生物污染生物控制机理

Fig. 2 Mechanism of Biological Control for NF Membrane Biofouling

### 5.2 噬菌体靶向控制

“噬菌体控制”可作为膜生物污染防控的补充手段,用于靶向调控生物膜相关菌群。噬菌体通过直接裂解细菌等方式(图2)发挥抗菌作用<sup>[87]</sup>。Goldman等<sup>[88]</sup>为了探究噬菌体控制超滤膜污染的效果,在处理农业灌溉水的膜处理系统中接种铜绿假单胞菌、约式不动杆菌(*Acinetobacter johnsonii*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)及这3种细菌对应的特异性噬菌体,发现接种噬菌体的膜系统在运行80 h后细菌数量较未接种组减少40%~60%。Wang等<sup>[79]</sup>进一步研究了噬菌体与群体淬灭(QQ)细菌协

同处理反渗透膜表面生物污染,通过双菌体系(*P. aeruginosa*和*S. wittichii*)模拟试验发现,QQ细菌能够通过降低QS信号分子,辅助噬菌体“搭便车”突破生物膜EPS层,感染膜生物污染的目标细菌,使得膜通量在严重生物污染系统中恢复率高达90%。目前,仅有个别文献<sup>[82]</sup>报道了实验室中噬菌体对膜表面生物污染的控制效果,虽然这些案例多针对超滤膜以及反渗透膜,但该方法对滤膜类型不存在选择性,在NF膜系统亦具有潜在的应用前景。

## 6 总结与展望

本文通过分析NF膜生物污染的特征以及综合

性控制措施,为全面防控膜生物污染提供了理论依据。基于当前对 NF 膜生物污染的认识,今后研究应着重注意以下几点。

(1)在提升膜亲水性、抗菌性的同时,应兼顾分离性能与结构稳定性,推动聚合物改性、纳米材料复合等方法的工程化应用。针对 NF 膜表面接枝和涂覆改性可能会增加膜表面的传质阻力、降低膜性能的问题,未来研究需优化聚合物添加剂的添加量,开发纳米级厚度的聚合物层,使得膜在获得抗污染性能的同时不牺牲选择性和渗透性。

(2)生物污染、有机污染和无机污染往往同时发生并相互作用。多数研究未能将生物污染与其他类型污染相互联系起来,因而无法有效控制 NF 膜过滤系统中的复杂污染。未来应针对不同污染类型和环境条件制定特定防污染策略,为 NF 膜长期稳定运行以及饮用水安全提供科学依据。

(3)NF 膜生物污染的早期识别是实现生物污染控制的基础。目前,适用于实际工程的生物污染的检测手段包括浊度测定法、培养计数法、共聚焦激光扫描显微镜、高通量测序等方法<sup>[89]</sup>,这些方法均属于污染发生后的间接表征,存在严重的滞后性。未来的研究应着重于开发可实时观测膜生物污染的原位快速检测技术,以实现生物污染的早期识别及精准干预。

(4)饮用水系统水温、盐度等因素以及工程操作条件均会影响微生物在 NF 膜表面的生长繁殖。现有研究多聚焦于特定水体条件下 NF 膜生物污染的表征与控制,较少考虑其他环境因素以及工程条件在生物污染发展过程中的动态影响。未来的研究应着眼于不同环境条件和实际操作条件对生物污染的影响机制,以提升研究的工程指导意义。

### 参考文献

- [ 1 ] Maroufi N, Hajilary N. Nanofiltration membranes types and application in water treatment: A review[J]. Sustainable Water Resources Management, 2023, 9(5): 142. DOI: 10.1007/s40899-023-00899-y.
- [ 2 ] Shao S L, Zeng F X, Long L, et al. Nanofiltration membranes with crumpled polyamide films: A critical review on mechanisms, performances, and environmental applications [ J ]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(18): 12811-12827.
- [ 3 ] Xu R, Qin W, Zhang B, et al. Nanofiltration in pilot scale for wastewater reclamation: Long-term performance and membrane biofouling characteristics [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2020, 395: 125087. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125087.
- [ 4 ] Singh R, Bhadouria R, Singh P, et al. Nanofiltration technology for removal of pathogens present in drinking water [ M ]// Waterborne pathogens. Amsterdam: Elsevier, 2020: 463-489.
- [ 5 ] Pezeshki H, Hashemi M, Rajabi S. Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: A mini review of nanofiltration and reverse osmosis techniques [ J ]. Heliyon, 2023, 9(3): e14246. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14246.
- [ 6 ] Du Y C, Pramanik B K, Zhang Y, et al. Recent advances in the theory and application of nanofiltration: A review [ J ]. Current Pollution Reports, 2022, 8(1): 51-80.
- [ 7 ] Nguyen T, Roddick F A, Fan L H. Biofouling of water treatment membranes: A review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures [ J ]. Membranes, 2012, 2(4): 804-840.
- [ 8 ] Liu L L, Liu Y, Huang J C, et al. Strengthening nanofiltration membrane: Strategies for enhanced antifouling performance [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2025, 508: 160964. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160964.
- [ 9 ] Zheng W J, Chen Y, Xu X H, et al. Research on the factors influencing nanofiltration membrane fouling and the prediction of membrane fouling [ J ]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 59: 104876. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.104876.
- [ 10 ] Tian L, Zhou P, Su Z Y, et al. Surface microstructure drives biofilm formation and biofouling of graphene oxide membranes in practical water treatment [ J ]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(27): 12281-12291.
- [ 11 ] Wolf-Baca M, Siedlecka A. Community composition and antibiotic resistance of tap water bacteria retained on filtration membranes [ J ]. Diversity, 2023, 15(3): 427. DOI: 10.3390/d15030427.
- [ 12 ] Qin Q, Lu H T, Zhu Z L, et al. Safety and security of household water purifiers against pathogenic microbial contamination and bio-risk evaluation of their microbial community structures [ J ]. Separation and Purification Technology, 2025, 357: 130012. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.130012.
- [ 13 ] Hu D Z, Zhong H, Indika S, et al. Membrane fouling characteristics and cleaning strategies for rural decentralized nanofiltration drinking water station based on groundwater source [ J ]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123531. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123531.
- [ 14 ] Yang X Y, Ju X R, Wang H B, et al. Controlling iron release and pathogenic bacterial growth in distribution pipes through nanofiltration followed by different disinfection methods [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 480: 136341. DOI:

10. 1016/j. jhazmat. 2024. 136341.
- [ 15 ] Park D, Kim H, Chung Y, et al. Impacts of monochloramine as an antifouling agent during nanofiltration (NF) of portable water [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 180: 67–73. DOI: 10. 5004/dwt. 2020. 25152.
- [ 16 ] El Allaoui B, Chakhtouna H, Zari N, et al. Recent developments in functionalized polymer NF membranes for biofouling control[J]. *Emergent Materials*, 2022, 5(5): 1345–1371.
- [ 17 ] Habimana O, Semião A J C, Casey E. The role of cell-surface interactions in bacterial initial adhesion and consequent biofilm formation on nanofiltration/reverse osmosis membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 454: 82–96. DOI: 10. 1016/j. memsci. 2013. 11. 043.
- [ 18 ] Abu-Zurayk R, Alnairat N, Khalaf A, et al. Cellulose acetate membranes: Fouling types and antifouling strategies—A brief review[J]. *Processes*, 2023, 11(2): 489. DOI: 10. 3390/pr11020489.
- [ 19 ] Abuwatfa W H, AlSawafah N, Darwish N, et al. A review on membrane fouling prediction using artificial neural networks (ANNs)[J]. *Membranes*, 2023, 13(7): 685. DOI: 10. 3390/membranes13070685.
- [ 20 ] Liu X H, Yang Y, Takizawa S, et al. New insights into the concentration-dependent regulation of membrane biofouling formation via continuous nanoplastics stimulation [J]. *Water Research*, 2024, 253: 121268. DOI: 10. 1016/j. watres. 2024. 121268.
- [ 21 ] Fonseca A C, Summers R S, Greenberg A R, et al. Extracellular polysaccharides, soluble microbial products, and natural organic matter impact on nanofiltration membranes flux decline [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(7): 2491–2497.
- [ 22 ] Song J L, Xu D L, Han Y H, et al. Surface modification of Fe III–juglone coating on nanofiltration membranes for efficient biofouling mitigation[J]. *Water Research*, 2023, 247: 120795. DOI: 10. 1016/j. watres. 2023. 120795.
- [ 23 ] Xu B C, Gao W, Liao B Q, et al. A review of temperature effects on membrane filtration[J]. *Membranes*, 2024, 14(1): 5. DOI: 10. 3390/membranes14010005.
- [ 24 ] Xu R, Zhou M Y, Wang H, et al. Influences of temperature on the retention of PPCPs by nanofiltration membranes: Experiments and modeling assessment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 599: 117817. DOI: 10. 1016/j. memsci. 2020. 117817.
- [ 25 ] Hitchin Y, Graham M, Charlton L, et al. Effect of temperature on organic fouling and cleaning efficiency of nanofiltration membranes for loch water treatment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 332: 125815. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2023. 125815.
- [ 26 ] Davidkova D F, Graham M C, MacLeod D, et al. Analysis of tubular NF plants in Scotland indicates that summer temperatures and redox-sensitive elements are correlated with membrane biofouling and shortened useful life [J]. *ACS ES&T Water*, 2024, 4(11): 5002–5012.
- [ 27 ] Farhat N M, Vrouwenvelder J S, van Loosdrecht M C M, et al. Effect of water temperature on biofouling development in reverse osmosis membrane systems [J]. *Water Research*, 2016, 103: 149–159. DOI: 10. 1016/j. watres. 2016. 07. 015.
- [ 28 ] Guo C Y, Wang Y, Kang X W, et al. From irreversible to reversible: Systematic pretreatment strategies mitigate nanofiltration membrane fouling in drinking water production by altering fouling mechanisms [J]. *Desalination*, 2026, 620: 119620. DOI: 10. 1016/j. desal. 2025. 119620.
- [ 29 ] Yu W Z, Liu T, Crawshaw J, et al. Ultrafiltration and nanofiltration membrane fouling by natural organic matter: Mechanisms and mitigation by pre-ozonation and pH [J]. *Water Research*, 2018, 139: 353–362. DOI: 10. 1016/j. watres. 2018. 04. 025.
- [ 30 ] Li Y K, Luo J Q, Wan Y H. Biofouling in sugarcane juice refining by nanofiltration membrane: Fouling mechanism and cleaning [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 612: 118432. DOI: 10. 1016/j. memsci. 2020. 118432.
- [ 31 ] Su Z Y, Liu T, Li X, et al. Beneficial impacts of natural biopolymers during surface water purification by membrane nanofiltration[J]. *Water Research*, 2021, 201: 117330. DOI: 10. 1016/j. watres. 2021. 117330.
- [ 32 ] Heffernan R, Habimana O, Semião A J C, et al. A physical impact of organic fouling layers on bacterial adhesion during nanofiltration[J]. *Water Research*, 2014, 67: 118–128. DOI: 10. 1016/j. watres. 2014. 09. 012.
- [ 33 ] Subramani A, Huang X F, Hoek E M V. Direct observation of bacterial deposition onto clean and organic-fouled polyamide membranes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 336(1): 13–20.
- [ 34 ] Zhao F, Xu K, Ren H Q, et al. Combined effects of organic matter and calcium on biofouling of nanofiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 486: 177–188. DOI: 10. 1016/j. memsci. 2015. 03. 032.
- [ 35 ] Mo Y H, Xiao K, Shen Y X, et al. A new perspective on the effect of complexation between calcium and alginate on fouling during nanofiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 82: 121–127. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2011. 08. 033.
- [ 36 ] Tomczak W. Fouling of the nanofiltration membrane NF270 used for separation of fermentation broths: Impact of feed pretreatment process [J]. *Processes*, 2023, 11(3): 817. DOI: 10. 3390/pr11030817.
- [ 37 ] Chen Y, Li H P, Pang W H, et al. Pilot study on the combination of different pre-treatments with nanofiltration for

- efficiently restraining membrane fouling while providing high-quality drinking water [J]. *Membranes*, 2021, 11 (6): 380. DOI: 10.3390/membranes11060380.
- [38] 李雨轩. 超滤-纳滤双膜组合工艺在高品质饮用水处理中的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.  
Li Y X. Study on ultrafiltration-nanofiltration combined membrane process in high quality drinking water treatment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.
- [39] Ma Y H, Chen C R, Xue Y W, et al. Long-term pilot study on advanced treatment of lake water by ultrafiltration/nanofiltration [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 62: 105338. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105338.
- [40] Wei H C, Nong H B, Chen L, et al. Advanced materials-based nanofiltration membranes for efficient removal of organic micropollutants in water and wastewater treatment [J]. *Membranes*, 2025, 15(8): 236. DOI: 10.3390/membranes15080236.
- [41] Li W T, Chen R W, Zhang S N, et al. Application of high-dose UV irradiation as nanofiltration pretreatment for drinking water production: Organic fouling mitigation and micropollutant removal [J]. *Water Research*, 2024, 266: 122348. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122348.
- [42] Marconnet C, Houari A, Seyer D, et al. Membrane biofouling control by UV irradiation [J]. *Desalination*, 2011, 276 (1/2/3): 75-81. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.016.
- [43] Feng J Y, Li X, Li H, et al. Enhanced filtration performance of biocarriers facilitated gravity-driven membrane (GDM) by vacuum ultraviolet (VUV) pretreatment: Membrane biofouling characteristics and bacterial investigation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 660: 120859. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.120859.
- [44] Sperle P, Khan M S, Skibinski B, et al. Optimizing UVC-disinfection using LEDs as an energy efficient pre-treatment for biofouling control in spiral-wound membrane systems [J]. *Desalination*, 2023, 557: 116589. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116589.
- [45] Salcedo I, Andrade J A, Quiroga J M, et al. Photoreactivation and dark repair in UV-treated microorganisms: Effect of temperature [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(5): 1594-1600.
- [46] Lee J, Zhan M, Kim Y, et al. Comparison of different cleaning strategies on fouling mitigation in hollow fiber nanofiltration membranes for river water treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134764. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134764.
- [47] Yu W Z, Xu L, Graham N, et al. Pre-treatment for ultrafiltration: Effect of pre-chlorination on membrane fouling [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6513. DOI: 10.1038/srep06513.
- [48] Quezada-Renteria J A, Wu J S, Xiao M H, et al. Insights on the chlorine resistance of polyester composite nanofiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2024, 695: 122459. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122459.
- [49] Su Y F, Luo H, Peng H W, et al. Chlorine-resistant loose nanofiltration membranes based on interface quaternization of hexamethylenetetramine [J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 687: 122078. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122078.
- [50] Park M, Anumol T, Simon J, et al. Pre-ozonation for high recovery of nanofiltration (NF) membrane system: Membrane fouling reduction and trace organic compound attenuation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 523: 255-263. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.09.051.
- [51] AlSawafah N, Abuwatfa W, Darwish N, et al. A review on membrane biofouling: Prediction, characterization, and mitigation [J]. *Membranes*, 2022, 12 (12): 1271. DOI: 10.3390/membranes12121271.
- [52] Arhin S G, Banadda N, Komakech A J, et al. Membrane fouling control in low pressure membranes: A review on pretreatment techniques for fouling abatement [J]. *Environmental Engineering Research*, 2016, 21(2): 109-120.
- [53] Kucera J. Biofouling of polyamide membranes: Fouling mechanisms, current mitigation and cleaning strategies, and future prospects [J]. *Membranes*, 2019, 9(9): 111. DOI: 10.3390/membranes9090111.
- [54] Ahmad N N R, Mohammad A W, Mahmoudi E, et al. An overview of the modification strategies in developing antifouling nanofiltration membranes [J]. *Membranes*, 2022, 12(12): 1276. DOI: 10.3390/membranes12121276.
- [55] Guo X, Zhao B, Ding Q, et al. Surface modification of nanofiltration membrane using quaternary diethanolamine for efficient antibiotics/salt separation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2024, 701: 122740. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122740.
- [56] Mustapha S, Tijani J O, Egbosiuba T C, et al. Removal of pollutants from wastewater through nanofiltration: A review [M]//Ahmad A, Alshammari M B. *Nanofiltration membrane for water purification*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 247-268.
- [57] Du Y C, Pramanik B K, Zhang Y, et al. Recent advances in the theory and application of nanofiltration: A review [J]. *Current Pollution Reports*, 2022, 8(1): 51-80.
- [58] Maroufi N, Hajilary N. Nanofiltration membranes types and application in water treatment: A review [J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2023, 9(5): 142. DOI: 10.1007/s40899-023-00899-y.
- [59] Miller D J, Araújo P A, Correia P B, et al. Short-term adhesion and long-term biofouling testing of polydopamine and poly(ethylene glycol) surface modifications of membranes and feed

- spacers for biofouling control [J]. *Water Research*, 2012, 46 (12): 3737–3753.
- [60] Zhu X W, Yang Z, Gan Z D, et al. Toward tailoring nanofiltration performance of thin-film composite membranes: Novel insights into the role of poly (vinyl alcohol) coating positions [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 614: 118526. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118526.
- [61] Wang T, Wang J, Zhao Z Z, et al. Bio-inspired fabrication of anti-fouling and stability of nanofiltration membranes with a poly (dopamine)/graphene oxide interlayer [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60 (41): 14868 – 14883.
- [62] Othman F, Marpani F, Shafiq Mat Shayuti M, et al. A mini review on polydopamine and silver functionalized membrane for antibiofouling in water and wastewater application [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 87: 172 – 179. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.393.
- [63] Kanjarawy Y M, Khadour G A, Darwish W S, et al. Sterilization device using silver nanoparticles [J]. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 2023, 10(2): 1–8.
- [64] Khaydarov R, Gapurova O, Abdukhakimov M, et al. Antimicrobial properties of nanofiltration membranes modified with silver nanoparticles [J]. *Emergent Materials*, 2022, 5(5): 1477–1483.
- [65] Zhang W J, Wang Z, Zhao Z L, et al. High-stable bimetallic AgCu nanoalloys with core-shell structures for sustainable antibacterial and biofouling mitigation in nanofiltration [J]. *Water Research*, 2025, 271: 122986. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122986.
- [66] Yu Y Y, Zhou Z B, Huang G C, et al. Purifying water with silver nanoparticles (AgNPs)–incorporated membranes: Recent advancements and critical challenges [J]. *Water Research*, 2022, 222: 118901. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118901.
- [67] Xu X S, Tesfai M, Ma G Y, et al. Polydopamine-assisted modification of anion-exchange membranes with nanomaterials for improved biofouling resistance and electrodialysis performance [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2021, 1(6): 1009–1020.
- [68] Abadikhah H, Naderi Kalali E, Khodi S, et al. Multifunctional thin-film nanofiltration membrane incorporated with reduced graphene Oxide@TiO<sub>2</sub>@Ag nanocomposites for high desalination performance, dye retention, and antibacterial properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(26): 23535–23545.
- [69] Lazarenko N S, Golovakhin V V, Shestakov A A, et al. Recent advances on membranes for water purification based on carbon nanomaterials [J]. *Membranes*, 2022, 12(10): 915. DOI: 10.3390/membranes12100915.
- [70] Zheng J F, Li M, Yu K, et al. Sulfonated multiwall carbon nanotubes assisted thin-film nanocomposite membrane with enhanced water flux and anti-fouling property [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 524: 344–353. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.11.032.
- [71] Geng C B, Zhao F B, Niu H Y, et al. Enhancing the permeability, anti-biofouling performance and long-term stability of TFC nanofiltration membrane by imidazole-modified carboxylated graphene oxide/polyethersulfone substrate [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 664: 121099. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.121099.
- [72] Li C, Yang J, Zhang L Y, et al. Carbon-based membrane materials and applications in water and wastewater treatment: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(2): 1457–1475.
- [73] Rajendran D S, Devi E G, Subikshaa V S, et al. Recent advances in various cleaning strategies to control membrane fouling: A comprehensive review [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2025, 27(2): 649–664.
- [74] 湛晓华, 金磊, 郭春禹. 管式膜海绵球清洗 [J]. *清洗世界*, 2010, 26(5): 10–13, 32.  
Chen X H, Jin L, Guo C Y. Sponge ball washing of tubular membrane [J]. *Cleaning World*, 2010, 26(5): 10–13, 32.
- [75] Thombre N V, Gadhekar A P, Patwardhan A V, et al. Ultrasound induced cleaning of polymeric nanofiltration membranes [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 62: 104891. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.104891.
- [76] Aghapour Aktij S, Taghipour A, Rahimpour A, et al. A critical review on ultrasonic-assisted fouling control and cleaning of fouled membranes [J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106228. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106228.
- [77] Zhang X Y, Gan Z D, Wang Y R, et al. Effect of chemical cleaning on nanofiltration process in treating surface water [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 50: 103271. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103271.
- [78] Wang J, Gao X L, Xu Y, et al. Ultrasonic-assisted acid cleaning of nanofiltration membranes fouled by inorganic scales in arsenic-rich brackish water [J]. *Desalination*, 2016, 377: 172–177. DOI: 10.1016/j.desal.2015.09.021.
- [79] Wang X J, Ruan C J, Shen C F, et al. Synergistic treatment of reverse osmosis membrane biofouling with quorum quenching bacteria and hitchhiking phages [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(11): 5647–5660.
- [80] Yu Z D, Schwarz C, Zhu L, et al. Hitchhiking behavior in bacteriophages facilitates phage infection and enhances carrier bacteria colonization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(4): 2462–2472.
- [81] Whiteley M, Diggle S P, Greenberg E P. Progress in and promise of bacterial quorum sensing research [J]. *Nature*, 2017, 551(7680): 313–320.

(下转第 47 页)

- 55-60.
- Shen Y D, Li Q, Liu Z J, et al. Application of walking plate and frame filter press for sludge dewatering in waterworks with Beijiang River water source [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(15): 55-60.
- [64] 陈越. 给水污泥“变身”新建材, 水务集团拓展资源化产品新应用[EB/OL]. (2025-10-31)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/X9MvZjQ524SkqvYiBXKVPw>.
- Chen Y. Waterworks sludge ‘transformed’ into new building materials: Nanjing Water Group expands innovative applications for resource recovery products [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/X9MvZjQ524SkqvYiBXKVPw>.
- [65] 陈志伟, 王浩泽, 彭秀华. 石灰与水泥改良水厂污泥进行资源化利用的研究[J]. *供水技术*, 2023, 17(2): 27-30.
- Chen Z W, Wang H Z, Peng X H. Research on improvement of utilization of sludge resourcization in waterworks by lime and cement[J]. *Water Technology*, 2023, 17(2): 27-30.
- [66] 顾雍. 自来水厂泥渣资源化——协同堆肥[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ytXrre71FQ4U97WphX5cxQ>.
- Gu Y. Resource recovery of waterworks sludge: Co-composting approach[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-02-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ytXrre71FQ4U97WphX5cxQ>.
- [67] 张亚朋, 吴荣波, 冯一军, 等. 水务一体化背景下杭州市污泥处理处置规划研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(10): 15-20.
- Zhang Y P, Wu R B, Feng Y J, et al. Study on sludge treatment and disposal planning under the background of water affairs integration in Hangzhou[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(10): 15-20.
- [68] 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部, 等. 关于推进污水资源化利用的指导意见: 发改环资[2021]13号[EB/OL]. (2021-01-04)[2026-02-28]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111\\_1264794.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html).
- National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, & Ministry of Industry and Information Technology. Guidance on promoting wastewater resource utilization: Development and Reform Environmental Resources [2021] No. 13 [EB/OL]. (2021-01-04)[2026-02-28]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111\\_1264794.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html).

(上接第 21 页)

- [82] Moreno-Gómez S, Hochberg M E, van Doorn G S. Quorum sensing as a mechanism to harness the wisdom of the crowds[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3415. DOI: 10.1038/s41467-023-37950-7.
- [83] 张颖. 群体感应抑制剂改性制备抗生物污染分盐纳滤膜[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- Zhang Y. Fabrication of anti-biofouling salt-separating nanofiltration membranes modified by quorum sensing inhibitors [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [84] Kim J H, Choi D C, Yeon K M, et al. Enzyme-immobilized nanofiltration membrane to mitigate biofouling based on quorum quenching[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4): 1601-1607.
- [85] Li Y, Dai J X, Ma Y J, et al. The mitigation potential of synergistic quorum quenching and antibacterial properties for biofilm proliferation and membrane biofouling [J]. *Water Research*, 2024, 255: 121462. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121462.
- [86] Yu C, Wu J J, Contreras A E, et al. Control of nanofiltration membrane biofouling by *Pseudomonas aeruginosa* using D-tyrosine [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 423: 487-494. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.08.051.
- [87] Wu B, Wang R, Fane A G. The roles of bacteriophages in membrane-based water and wastewater treatment processes: A review[J]. *Water Research*, 2017, 110: 120-132. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.004.
- [88] Goldman G, Starosvetsky J, Armon R. Inhibition of biofilm formation on UF membrane by use of specific bacteriophages[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 342(1/2): 145-152. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.06.036.
- [89] Zheng W J, Niu Y L, Shi H J, et al. Elucidating the impact of dissolved organic matter on membrane fouling of combined nanofiltration processes using three-dimensional fluorescence with high-pressure size exclusion chromatography [J]. *Desalination*, 2025, 616: 119352. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119352.