

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 15. 001

电赋能复合导电超滤膜的运行特性与抗污染机理

王健^{1,2,3}, 黄静^{2,3}, 万鹏^{2,3}, 孙荡荡², 管运涛¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 广东 深圳 518108; 3. 广东省水务大数据与水生态工程技术研究中心, 广东 深圳 518108)

摘要: 为缓解膜生物反应器(MBR)长期运行过程中的膜污染问题,构建了一种电赋能复合导电超滤膜(E-UF),并在实际市政污水条件下开展与普通超滤膜(UF)的长期对比实验,系统分析其运行特性及抗污染机理。结果表明,在实现COD、TN及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果稳定的前提下,E-UF的跨膜压差(TMP)显著降低,稳定期的TMP较UF降低83.6%~90.6%,抽吸比能耗同步下降;三维荧光光谱分析显示,E-UF出水中蛋白类有机物及微生物代谢产物的荧光强度明显减弱;微生物群落分析表明,E-UF中反硝化相关菌属富集、潜在电子竞争菌减少;KEGG功能预测显示反硝化关键功能基因丰度提高,氮循环网络向更完整的反硝化路径偏移。电赋能运行通过电子分配优化与氮循环功能重构,削减污染前驱物生成并抑制滤饼层压实,实现对膜污染发展的有效控制,为电化学与生物处理耦合调控膜污染提供了理论依据。

关键词: 膜生物反应器(MBR); 膜污染; 跨膜压差; 导电超滤膜; 电赋能

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0001-08

Operational Performance and Antifouling Mechanisms of a Conductive Ultrafiltration Membrane under Electrical Enhancement

Wang Jian^{1,2,3}, Huang Jing^{2,3}, Wan Peng^{2,3}, Sun Dangdang², Guan Yuntao¹

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Water Planning and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518108, China;

3. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Water Affairs Big Data, Shenzhen 518108, China)

Abstract: To mitigate membrane fouling in the membrane bioreactors (MBR), an electrically assisted conductive ultrafiltration membrane unit (E-UF) was developed and operated in parallel with a conventional ultrafiltration (UF) membrane under real municipal wastewater conditions. The operational performance and antifouling mechanisms were systematically investigated. The results showed that, while maintaining stable COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiencies, the E-UF system significantly suppressed transmembrane pressure (TMP) development, with steady-state TMP reduced by 83.6%~90.6% compared to the UF. The corresponding specific suction energy consumption was also markedly decreased. Excitation-emission matrix (EEM) analysis showed that the fluorescence regions associated with

基金项目: 深圳重点产业研发计划项目(可持续发展专项)(ZDCYKCX20250901093359008)

通信作者: 黄静 E-mail: huangj04@swpd.cn

protein-like organic matter and microbial metabolic products in the E-UF effluent were markedly reduced. Microbial community analysis indicated enrichment of denitrification-related genera and reduction of potential electron-competing bacteria in E-UF. KEGG-based functional prediction further demonstrated enhanced abundances of key denitrification genes, suggesting a functional shift toward a more complete denitrification pathway. Electrically assisted operation optimized electron allocation and reshaped nitrogen metabolic networks, thereby reducing fouling precursor production and mitigating cake layer compaction. This study provides mechanistic insights into the coupling of electrochemical regulation and biological nitrogen transformation for sustainable fouling control in MBR systems.

Keywords: membrane bioreactor (MBR); membrane fouling; transmembrane pressure; conductive ultrafiltration membrane; electrical assistance

膜生物反应器(MBR)因其出水水质稳定、占地面积小和运行管理灵活等优势,已在我国城镇污水处理及再生水回用工程中得到广泛应用^[1-3]。然而,在长期运行条件下,膜污染问题仍是MBR技术稳定、高效运行的关键瓶颈。污水中的悬浮颗粒、胶体物质以及微生物代谢产生的胞外聚合物(EPS)易在膜表面和膜孔内富集,导致膜孔堵塞和滤饼层形成,使跨膜压差(TMP)持续升高,进而引起通量衰减、能耗增加及运行维护成本上升^[4-5]。

近年来,电场调控技术在膜污染控制中的潜力逐渐受到关注^[6]。研究表明,电场可通过电泳、电渗等作用影响带电污染物的迁移行为,同时对微生物代谢活性、胞外聚合物分泌及污泥结构产生调控效应,从而在一定程度上延缓膜污染的发展^[7]。基于生物电化学系统(BES)与MBR的耦合体系(MBR-BES)被提出,污水中的微生物通过降解有机物实现能量回收的同时,电场对膜污染也具有一定抑制作用^[8-9]。然而,该耦合体系通常结构复杂、电极间距大、欧姆损失显著,电场强度和稳定性难以精确控制,限制了其在工程中的推广应用。

因此,本文提出一种电赋能复合导电超滤膜构型,通过将导电材料引入超滤膜结构,在外加低强度直流电场条件下运行,构建电赋能复合导电超滤膜组件(E-UF)。在膜生物反应器中开展导电超滤膜与普通超滤膜的长期运行对比实验,考察其对膜污染的控制效果,同步对微生物群落结构及氮循环功能基因进行分析,研究其在COD、TN及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果稳定条件下的抗污染机理及运行特性,以期为MBR的膜污染控制提供新的技术思路。

1 材料与方法

1.1 电赋能复合导电超滤膜系统

MBR-BES耦合系统及E-UF系统见图1。

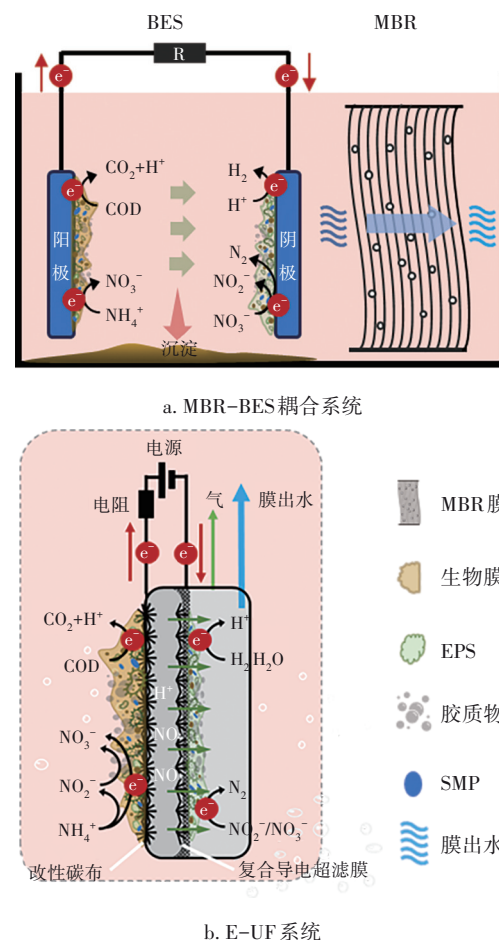


图1 MBR-BES耦合系统和E-UF系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of MBR-BES coupled system and E-UF system

膜生物反应器在长期运行过程中,活性污泥絮体及胞外聚合物在膜表面及膜孔内持续累积,易导

致高阻力污染层形成,引起TMP快速升高和通量衰减^[10],是限制其稳定运行的关键瓶颈之一。生物电化学系统通过微生物在阳极氧化有机物并向外电路释放电子,在外电路传输并于阴极发生还原反应,电场的引入、电荷迁移以及局部氧化还原条件变化,可显著影响溶解性有机物、胶体颗粒及带电污染物的传输行为^[7,11-12],因此将BES与MBR耦合,是一种具有潜力的膜污染调控思路。本研究构建的MBR-BES耦合电赋能复合导电膜应用构型,是在传统MBR与BES的基础上,将导电功能与超滤膜分离功能一体化,使膜组件在低强度直流电赋能条件下运行,并在膜表面附近形成稳定电场,实现对膜面污染演化过程的原位调控。

1.2 复合导电超滤膜的制备

复合导电超滤膜以导电碳布为支撑基底,采用导电层界面构建与分离层相转化原位形成相结合的一体化复合路线制备。分离层铸膜液以聚偏氟乙烯(PVDF)为成膜聚合物、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为致孔剂、N-甲基吡咯烷酮(NMP)为溶剂,引入纳米TiO₂作为无机纳米改性组分,以提升膜表面的亲水性并调控相转化过程中的孔结构形成。铸膜液在70℃条件下搅拌至完全溶解并静置脱泡备用。其中TiO₂粒径约为15nm,其加入量按NMP质量的约4%计。

导电支撑层以碳布为基底,通过纳米银与离子导体黏结相构建连续导电通路并增强界面结合稳定性:将(15±5)nm的纳米银分散于乙醇(约100mg/L)中,然后与质量分数为20%的全氟磺酸树脂(Nafion)溶液混合并经超声分散后涂覆于碳布表面,自然干燥得到改性导电碳布。随后将脱泡后的铸膜液均匀涂覆于改性碳布表面,采用浸没沉淀相转化在约60℃条件下原位形成分离层(凝胶时间约为20min),获得导电支撑层与分离层紧密耦合的复合导电超滤膜,总厚度约为0.63mm。

为表征膜材料本体的水力传质能力,采用恒压过滤法测定纯水通量(膜有效面积为25cm²,单次测试时间为15min,每个压力点重复3次)。经计算,在10.0、30.0与50.0kPa下导电膜的纯水通量分别为(57.23±7.90)、(193.89±9.71)和(308.88±5.06)L/(m²·h)。可见,通量与跨膜压差呈良好线性关系($R^2 \approx 0.998$),线性拟合得到水力渗透系数(L_p)约为 6.29×10^4 L/(m²·h·kPa),表明在测试压力范围内膜

结构具有稳定的水力传质特性^[13]。

膜表面孔结构通过SEM进行分析,基于比例尺完成像素-长度标定并对孔口进行统计($n=105$),结果显示孔分布较均匀,孔口表观等效孔径为(27.97±8.21)nm,中位数为29.09nm,孔径主要分布在20~40nm区间(见图2)。

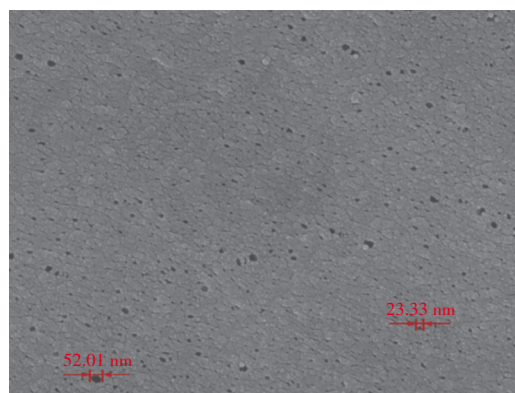


图2 复合导电超滤膜表面SEM形貌及孔径

Fig.2 SEM surface morphology and pore size of composite conductive ultrafiltration membrane

1.3 实验装置与运行条件

基于所制备的复合导电超滤膜构建电赋能复合导电超滤膜组件(E-UF),复合导电超滤膜在组件中同时承担膜分离单元与阴极(电子受体)的功能,碳布作为电子供体,二者通过导线连接至外部直流电源,在回路中串联限流电阻以保证电流输出的稳定性。膜组件采用平板式构型,可直接作为功能单元嵌入现有污水处理系统中运行;运行过程中施加恒定直流电压,电压范围控制在0.5~1.0V。

实验装置及在线监测系统如图3所示。系统由进水单元、生化反应池、膜组件区、出水与排泥系统以及在线监测单元组成。E-UF与UF组件作为独立膜分离单元安装于同一生化反应池内,与活性污泥体系直接接触运行。反应池通过连续曝气维持混合状态并提供溶解氧(DO),保证生化反应的稳定进行。为确保可比性,E-UF与UF组件在相同反应环境下平行运行,两类膜组件的布置位置、水力负荷及曝气强度保持一致,区别仅是否施加外加电压作为控制变量。E-UF组件运行过程中施加恒定直流电压,UF组件在相同水力条件下运行但不施加电赋能。

进水为市政污水,其COD为200~600mg/L,TN为16~30mg/L,NH₄⁺-N为12~25mg/L。运行期间混

合液悬浮固体浓度(MLSS)维持在3 500~5 500 mg/L,溶解氧维持在8.0 mg/L,污泥龄维持在14.0~18.7 d。系统连续运行60 d,在此期间对跨膜压差(TMP)进行在线监测,并定期采集进、出水水样分析COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等水质指标。

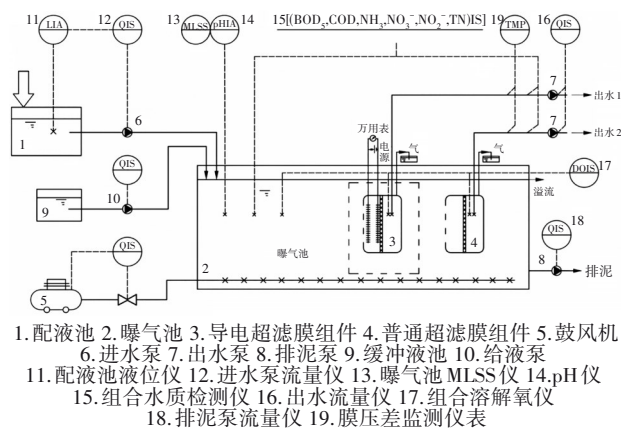


图3 E-UF与UF装置及监测系统示意

Fig.3 Schematic of E-UF and UF devices and monitoring system

2 结果与讨论

2.1 出水水质与系统运行稳定性

出水水质是评价膜生物反应器运行稳定性的重要指标。在整个运行周期内,各工况出水COD均处于较低水平,UF出水COD平均浓度为 (19.06 ± 13.77) mg/L;相比之下,E-UF在0.5和1.0 V电压条件下出水COD平均浓度分别为 (14.36 ± 10.88) 和 (10.00 ± 5.57) mg/L,较UF分别降低约25%和48%,表明电赋能条件下有机污染物去除过程的稳定性得到提升。

UF出水TN平均浓度为 (4.81 ± 4.47) mg/L,而在电压为0.5和1.0 V条件下E-UF出水TN平均浓度分别为 (4.46 ± 3.60) 和 (4.13 ± 2.66) mg/L,整体降低约7%~14%,且各工况的TN总体分布区间相近。UF出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 (0.289 ± 0.414) mg/L,最大值为1.51 mg/L;在电压为0.5和1.0 V条件下,E-UF出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度分别为 (0.237 ± 0.244) 和 (0.228 ± 0.160) mg/L,较UF降低约18%~21%,波动幅度与极值水平明显降低(见图4)。综上所述,与TN相对应,E-UF出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度整体呈下降趋势且波动幅度明显收敛,表明系统中的氮转化过程更加平稳,氨氧化与后续反硝化过程的耦合关系得到优化。

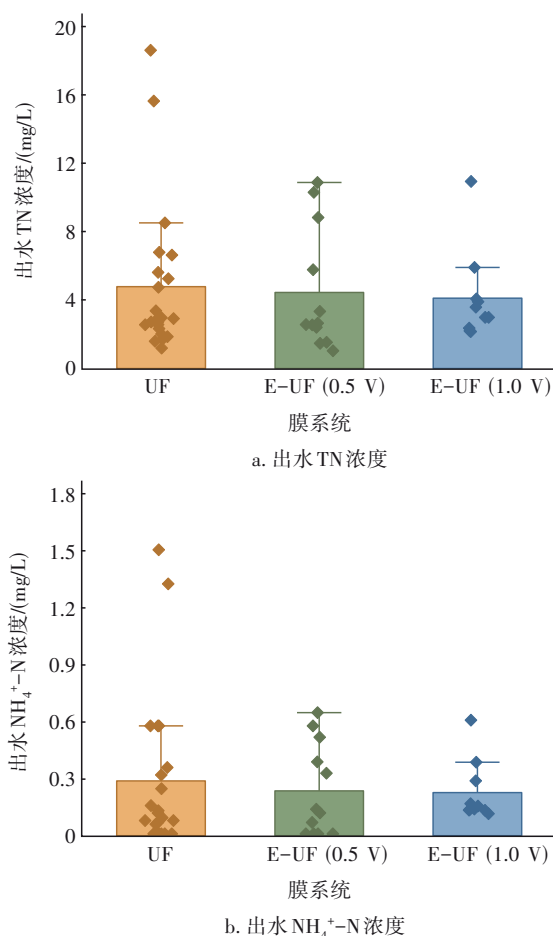


图4 不同工艺的出水水质对比

Fig.4 Comparison of effluent quality from different processes

2.2 跨膜压差的变化

在出水水质保持稳定的前提下,对不同膜组件运行过程中的TMP变化进行了分析,结果见图5。电赋能条件下,导电膜组件的TMP增长显著受抑制并快速进入稳定平台,表明电场作用能够有效减缓过滤阻力累积与膜污染发展。在启动阶段,E-UF(1.0 V)的TMP由1.0 kPa(第2天)升至3.0 kPa(第4天)后增长明显放缓,稳定阶段维持在约4.0 kPa;在后期稳定平台期,E-UF(0.5 V)的TMP约为7.0 kPa。UF的TMP随运行时间快速升高:由4.0 kPa(第2天)增至12.1 kPa(第8天),第20天达到42.7 kPa(约为初期的10.7倍),并维持在高位,表明膜污染持续加剧、运行稳定性较差。以UF第20天的TMP(42.7 kPa)为参照,在1.0 V与0.5 V电压条件下,E-UF的稳定期TMP分别降低约90.6%与83.6%,显示电赋能具有显著的抗污染增效作用;同时,较高电压对应更低的TMP,说明在一定范围内

外加电压可调控膜污染控制效果。

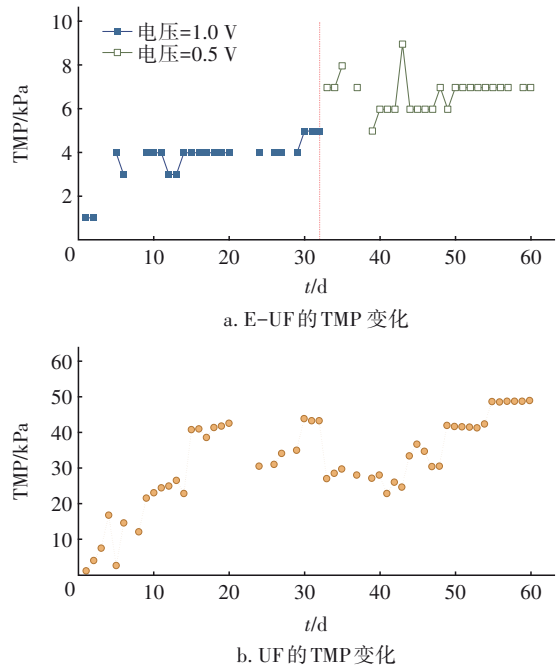


图5 不同膜组件的 TMP 随运行时间的变化
Fig.5 Variation of TMP with operation time under different membrane conditions

2.3 运行特性与工程效益评估

膜污染导致 TMP 升高将增加抽吸侧能耗,加速系统逼近清洗触发区间。以抽吸泵功率(P_e)及抽吸比能耗(E_{pump})为评价指标,同时采用表观产水能力(Q/TMP ,数值越大表示在更低压差下能维持更高产水量)来量化不同膜组件的运行差异,结果见表 1。

表 1 不同膜组件的 TMP、抽吸泵功率、抽吸比能耗及表观产水能力的定量比较

项目	TMP/ kPa	P_e/W	$E_{\text{pump}}/(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3)$	表观产水能力/ [$\text{mL}/(\text{h}\cdot\text{kPa})$]
UF	42.7	0.001 48~ 0.005 93	0.019 77	17.6~70.3
E-UF (0.5 V)	7.0	0.000 24~ 0.000 97	0.003 24	107.1~428.6
E-UF (1.0 V)	4.0	0.000 14~ 0.000 56	0.001 85	187.5~750.0

由表 1 可见,E-UF 通过显著降低 TMP,使抽吸比能耗降低了 83.6%~90.6%。与此同时,E-UF 的表观产水能力提升了 6.10~10.68 倍,说明电赋能导电膜在维持产水条件下可显著降低驱动压差需求,

在节能运行与减缓膜污染累积方面具有明显优势。

2.4 微生物群落结构与氮循环功能重构分析

为解释电赋能条件下膜污染演化路径的改变及其生物学基础,对 UF 与 E-UF 的微生物群落结构及氮循环功能基因进行了分析。微生物群落及功能网络的变化被视为影响污染前驱物生成与滤饼层结构演化的重要生物学因素^[14-15]。在门水平上,两种工艺的群落结构总体保持稳定,Proteobacteria、Firmicutes 和 Bacteroidota 为优势菌门,表明电赋能运行未改变系统的宏观生态框架;然而在属水平上群落组成呈现出明显的重构特征,提示电子供给可能调控了微生物代谢路径与功能分配(见图 6)。

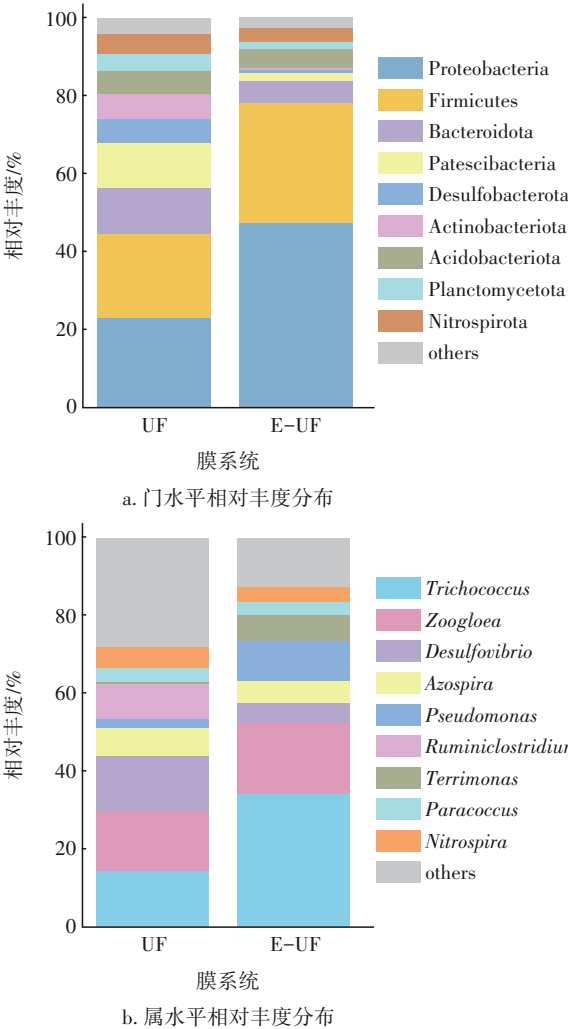


图6 UF与E-UF的微生物群落结构对比
Fig.6 Comparison of microbial community compositions between UF and E-UF

在 E-UF 系统中,Trichococcus 等发酵型菌属比例上升;Zoogloea 和 Pseudomonas 属中包含多种典型

反硝化菌,其富集可能增强了硝态氮的还原潜力;*Desulfovibrio*作为硫酸盐还原菌,其比例降低意味着电子在硫循环中的竞争分配减弱,而电子向氮还原路径的利用效率提高。*Trichococcus*等发酵型菌属的增加通过提供小分子有机酸等电子供体支持反硝化过程。硝化相关属*Nitrospira*在E-UF中略有下降,但变化幅度有限,结合2.1节 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 波动区间收敛的结果,说明电赋能运行并未削弱氮转化能力,而是通过优化硝化与反硝化之间的耦合关系,使氮转化过程更加平稳。

基于KEGG功能预测的氮循环(见图7)关键基因分析进一步揭示了功能层面的差异:两种运行条件下硝酸盐初级还原相关基因(*narGHI/napAB*)丰度差异相对有限,但UF整体略高;然而,在后续反硝化关键步骤中,E-UF中*nirK/nirS*、*norBC*及*nosZ*等功能基因丰度整体提高,尤其是*nosZ*的增强表明终端反硝化潜力得到强化,向更有利于 N_2 生成的方向发展;同时,固氮相关功能基因在E-UF中呈显著下降趋势,说明体系具备更有利于缺氧反硝化的微环境。

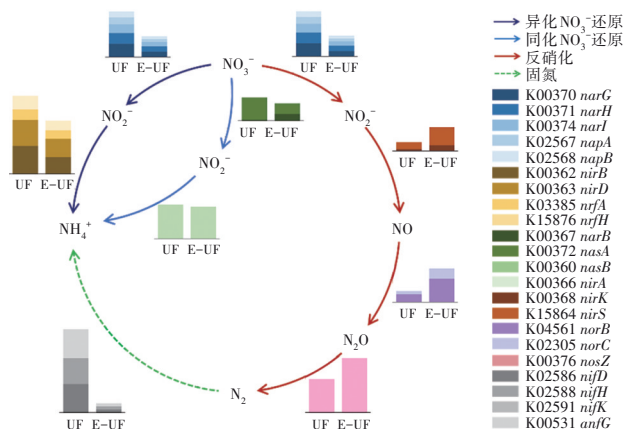


图7 UF与E-UF中基于KEGG功能预测的氮循环关键功能基因相对丰度差异

Fig.7 Relative abundances of key nitrogen cycling genes predicted by KEGG under UF and E-UF operation

电赋能通过调控电子流向与氮循环功能结构,改变了微生物代谢分配模式,表现为反硝化关键功能基因(*nir*→*nor*→*nos*)的增强及电子竞争途径的相对减弱。功能网络的调整表明,E-UF中氮循环功能网络整体向完整反硝化通路偏移,有助于降低蛋白类污染前驱物的生成与释放水平,从而削弱滤饼层形成与压实的物质基础^[16];而UF中终端反硝化

步骤未表现出明显强化趋势,氮转化路径停留于中间阶段或分配至多种转化通路,显示出系统去除效果稳定的微生物机理。

2.5 复合导电膜在电赋能下的抗污染机理分析

在运行过程中,UF与E-UF呈现出显著差异的污染演化特征(如图8所示)。在UF条件下,污泥絮体及其释放的EPS与可溶性微生物代谢产物(SMP)在跨膜压差的驱动下向膜面迁移并发生界面富集,逐渐构建连续的滤饼层结构^[17],随着运行压力的持续作用,滤饼层内部孔隙率降低、结构压缩性增强,比阻显著增加,最终表现为TMP的持续上升与污染层向高阻力状态转化^[18]。相比之下,在E-UF条件下,复合导电膜作为阴极在膜面边界层建立稳定的电场,并可作为电子供体参与硝态氮的生物电化学还原过程。 NO_3^- 在阴极界面获得电子,经反硝化途径逐步转化为 N_2 ,在实现氮素去除的同时改变膜面附近的氧化还原与电子分布环境,电极参与的反硝化过程及局部电场效应通过多层级机制调控膜污染行为。

外加电子供给改变了膜面微环境下的代谢电子受体结构与能量分配路径。SMP中蛋白类荧光组分的生成通常与代谢胁迫及能量失衡相关,而反硝化条件下代谢过程趋于稳定,有助于调控SMP的生成与组成。三维荧光光谱分析结果显示,E-UF出水中与蛋白类有机物相关的荧光区域及微生物代谢产物荧光区域(区域I与II分别对应酪氨酸与色氨酸蛋白,区域IV为微生物代谢产物)信号显著减弱,表明易致污的蛋白类SMP在体系中得到有效削减。蛋白组分作为滤饼层黏附与压实的重要前驱物质,其含量的降低削弱了污染层结构致密化的物质基础,从源头抑制了高比阻污染层的形成。

膜面电场对带负电污染前驱物的迁移与沉积行为产生调控作用。EPS与胶体颗粒在电场驱动下迁移路径与停留行为发生改变,其在膜面边界层内的有效富集程度降低,初始沉积速率受到抑制;同时,电场增强了污染层内部的电荷排斥作用,降低颗粒间的压实程度,使已形成的滤饼层保持相对疏松结构并表现出较低的结构压缩性,减缓了滤饼层比阻随运行时间增长的上升速率。此外,反硝化过程中生成的 N_2 在膜面形成局部微扰动,对污染层附着产生一定辅助削弱作用。

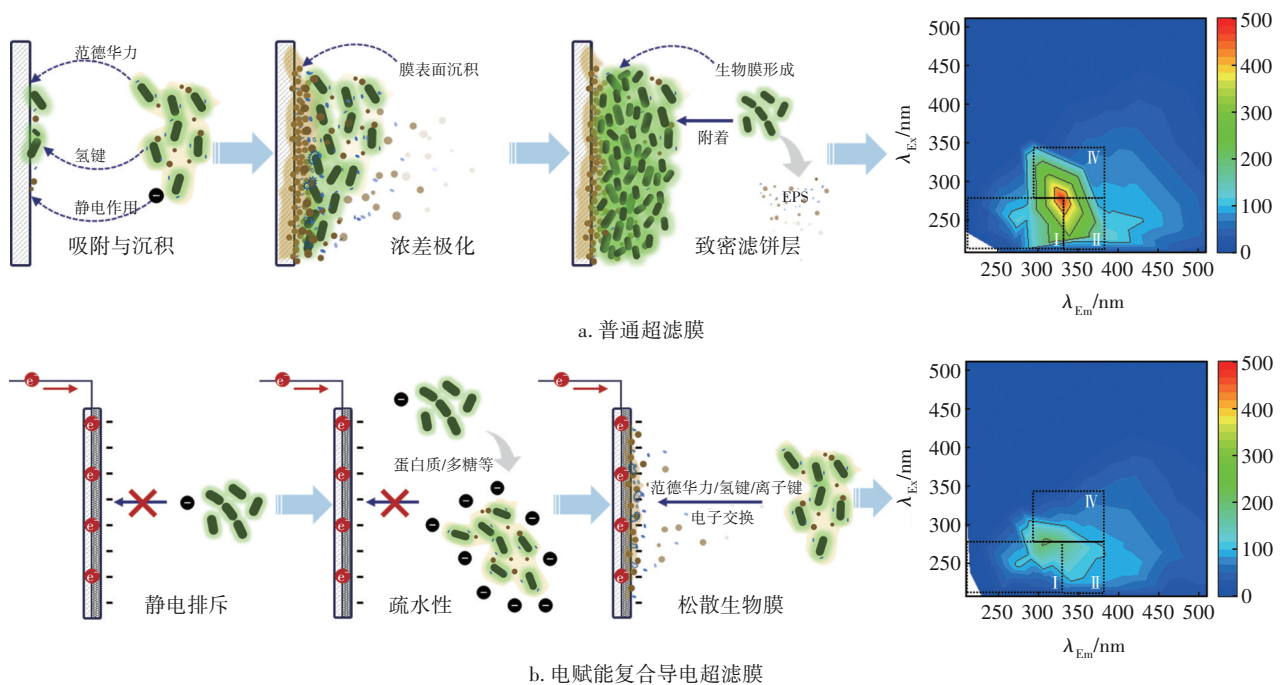


图 8 普通超滤膜与电赋能复合导电超滤膜抗污染机理示意

Fig.8 Schematic diagram of fouling evolution pathways under UF and E-UF operation

3 结论

① E-UF 系统在保证 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果稳定的前提下,出水氨氮浓度波动幅度明显收敛,表明电赋能运行有助于提升氮转化过程的稳定性与系统运行的平稳性。

② 与普通超滤膜相比,E-UF 的 TMP 上升速率显著降低,运行期间未出现明显压实阶段,同时在相近运行条件下系统能耗未显著增加,体现出良好的工程可行性。

③ 电赋能运行在属水平引起显著重构,表现为反硝化相关菌属富集以及 *Desulfovibrio* 等潜在电子竞争菌减少,表明电子利用路径发生调整。

④ E-UF 的反硝化关键功能基因丰度提高,氮循环网络向更完整的反硝化路径偏移,与运行期 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 波动相一致。

⑤ 结合三维荧光分析与污染演化分析,电赋能运行通过“电子供给调控-氮循环功能重构-污染前驱物削减-滤饼层压实受限”的多层级协同作用,实现对膜污染发展的有效抑制。

参考文献:

[1] 简德武,孙巍,刘向荣,等. 大型污水处理厂 MBR 膜设备间设计新思路[J]. 中国给水排水,2026,42(2):

54-57.

Jian Dewu, Sun Wei, Liu Xiangrong, et al. Novel design concept for MBR membrane equipment room in large-scale sewage treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2026, 42(2): 54-57 (in Chinese).

[2] 施春红,江嘉诚,张玉琦,等. MBR 处理农村生活污水及膜污染控制研究进展 [J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 20-25.

Shi Chunhong, Jiang Jiacheng, Zhang Yuqi, et al. Research progress of MBR treatment of rural domestic sewage and membrane pollution control [J]. Water Treatment Technology, 2024, 50(2): 20-25 (in Chinese).

[3] 郝晓地,陈峤,李季,等. MBR 工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7-12.

Hao Xiaodi, Chen Qiao, Li Ji, et al. Status and trend of MBR process application in the world [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 7-12 (in Chinese).

[4] 熊富忠,温东辉. 基于群体感应效应的 MBR 膜污染控制原理、实现途径及微生态响应 [J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 2911-2934.

Xiong Fuzhong, Wen Donghui. Quorum sensing-based fouling control in membrane bioreactors: mechanisms, strategies, and microbial ecological responses [J]. Bulletin of Microbiology, 2025, 52(7): 2911-2934 (in Chinese).

- [5] 张雷, 田雪咏, 史立伟, 等. MBR膜污染防治策略研究现状 [J]. 环境工程, 2023, 41(增刊1): 174-178.
Zhang Lei, Tian Xueyong, Shi Liwei, et al. Research status of MBR pollution prevention and control strategies [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S1): 174-178(in Chinese).
- [6] Chen M, Lei Q, Ren L H, et al. Efficacy of electrochemical membrane bioreactor for virus removal from wastewater: performance and mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2021, 330: 124946.
- [7] 刘嘉栋. 微电场导电膜E-MBR膜污染控制研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
Liu Jiadong. A study on membrane fouling control in E-MBR systems using micro-electric fields [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014(in Chinese).
- [8] Deng H Q, Ren H L, Fan J Z, et al. Membrane fouling mitigation by coagulation and electrostatic repulsion using an electro-AnMBR in kitchen wastewater treatment [J]. Water Research, 2022, 222: 118883.
- [9] 苏小莉. 基于外加电场和群感应效应的AnMBR膜污染控制效能与机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
Su Xiaoli. A study on the efficacy and mechanism of membrane fouling control in AnMBR systems based on applied electric fields and collective induction effects [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024(in Chinese).
- [10] 曾凯亮, 汪朝晖, 崔朝亮, 等. 超滤膜在处理农药废水过程中的膜污染行为分析 [J]. 膜科学与技术, 2018, 38(2): 98-105.
Zeng Kailiang, Wang Zhaohui, Cui Zhaoliang, et al. Membrane fouling during the ultrafiltration process for pesticide wastewater treatment [J]. Membrane Science and Technology, 2018, 38(2): 98-105(in Chinese).
- [11] 倪凌峰, 王沛芳, 王亚宜. 电化学氧化技术在MBR中的膜污染控制研究与应用进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(10): 127-135.
Ni Lingfeng, Wang Peifang, Wang Yayi. Research and application advances of electrochemical oxidation technology in MBR for membrane fouling control [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 127-135(in Chinese).
- [12] Su X, Xing D, Song Z, et al. Understanding the effects of electrical exposure mode on membrane fouling in an electric anaerobic ceramic membrane bioreactor [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 659: 120756.
- [13] Guldiken C G, Peng H, Li K. Crystalline nuclei-templated PVDF/PAN_PVDF ultrafiltration membranes prepared via a dual-casting technique: high water permeation with improved anti-fouling and flux recovery [J]. Journal of Membrane Science, 2025, 717: 123580.
- [14] El Hachimi O, Tiwari B R, Drogui P, et al. Advances in membrane bioreactor for landfill leachate treatment: a review of characterization, challenges, and novel configurations [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3): 116653.
- [15] Cayetano R D A, Bae S, Oh H S. Emerging biofouling control strategies in MBR systems: quorum quenching, electrochemical methods, and mechanically imposed membrane shear [J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 73: 107684.
- [16] 于伯洋, 苏帆, 孙境求, 等. 电控膜生物反应器技术回顾与展望 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4215-4224.
Yu Boyang, Su Fan, Sun Jingqiu, et al. Review and prospect of electrical membrane bioreactor technology [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12): 4215-4224(in Chinese).
- [17] Tian Y, Cheng H, He Y P, et al. Enhanced efficacy of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for treating pharmaceutical wastewater with abundant protein particles [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 527: 171889.
- [18] Yin X, Li X, Hua Z, et al. The growth process of the cake layer and membrane fouling alleviation mechanism in a MBR assisted with the self-generated electric field [J]. Water Research, 2020, 171: 115452.

作者简介: 王健(1969—), 男, 江西兴国人, 工程博士在读, 正高级工程师, 主要从事给排水设计与研究工作。

E-mail: wangj@swpdi.com

收稿日期: 2026-01-19

修回日期: 2026-02-14

(编辑: 李德强)