

DOI:10.11918/202110099

# GAC/GDM 组合工艺用于村镇饮用水净化机制及调控

公维佳<sup>1</sup>,王嘉硕<sup>1</sup>,刘宪武<sup>1</sup>,唐小斌<sup>2</sup>,梁 恒<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学 工程学院,哈尔滨 150038;2. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

**摘要:** 能耗高、操作复杂、运维量大、成本高是制约当前村镇饮用水处理技术发展和推广应用的瓶颈问题。为此,针对性地研发超低压重力驱动型膜滤净水技术(GDM),具有操作简单、近零维护、低能耗和无药剂等工艺优势;同时,为进一步提高污染物的去除效能,构建颗粒物活性炭(GAC)缓速滤池与 GDM 组合工艺(GAC/GDM)。结果表明,GAC 缓速滤池预处理可显著提升对 UV<sub>254</sub>、溶解性有机碳(DOC)和氨氮的去除效能,去除率分别高达 75%、86% 和 90%,同时有助于提升膜出水通量(较 GDM 对照组提升了 32%)。此外,考察了微循环(CGAC/GDM)和微曝气(AGAC/GDM)两种方式对组合工艺运行效能的调控作用,长期运行过程中,CGAC/GDM 与 AGAC/GDM 的稳定通量较 GDM 对照组分别提高约 36% 和 49%;然而,其对 DOC 和 UV<sub>254</sub> 的去除率较 GAC/GDM 工艺略有降低,这是由于微循环和微曝气措施增加了膜前溶解氧质量浓度,强化了膜表面生物滤饼层内微生物的水解作用。提出的 GAC/GDM 组合工艺可同步实现对膜通量和污染物去除效能的提升作用,为村镇地区膜滤供水技术的发展和推广应用提供了理论和技术支撑。

**关键词:** 重力驱动膜滤(GDM);GAC 缓速滤池;膜污染;低能耗;近零维护;农村供水

**中图分类号:** TU991.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)08-0034-09

## Mechanisms and regulations of GAC/GDM hybrid process for rural drinking water treatment

GONG Weijia<sup>1</sup>, WANG Jiashuo<sup>1</sup>, LIU Xianwu<sup>1</sup>, TANG Xiaobin<sup>2</sup>, LIANG Heng<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150038, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Water Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

**Abstract:** High energy consumption, complex operation, large amount of operation and maintenance, and high cost restrict the development and extensive application of drinking water treatment technology in rural areas. In this study, the ultra-low pressure gravity-driven membrane (GDM) filtration technology was specifically developed, which has the advantages of simple operation, low maintenance, low energy consumption, and chemical free. To further improve the removal efficiency of pollutants, we constructed a hybrid process of granular activated carbon (GAC) slow filter and GDM (GAC/GDM). Results show that pretreatment by GAC slow filter could significantly improve the removal efficiency of UV<sub>254</sub>, dissolved organic carbon (DOC), and ammonia nitrogen, with the average removal efficiency of 75%, 86%, and 90%, respectively. Meanwhile, the membrane flux was improved by 32% compared with GDM control. The regulation effect of either water cycle (CGAC/GDM) or weak aeration (AGAC/GDM) on the performance of the hybrid process was investigated. During long-term filtration, compared with GDM control, the stable flux of CGAC/GDM and AGAC/GDM was increased by 36% and 49%, respectively. However, the removal efficiency of DOC and UV<sub>254</sub> in CGAC/GDM and AGAC/GDM declined slightly compared with GAC/GDM, since water cycle and weak aeration increased the concentration of dissolved oxygen in the feed water before GDM filtration, which promoted the hydrolysis of organic pollutants retained within the bio-cake layer on the membrane surface by the microorganisms. Therefore, the proposed GAC/GDM hybrid process can simultaneously improve the stable flux level and pollutant removal, which will provide theoretical and technical support for the development and application of membrane filtration technology in the rural areas.

**Keywords:** gravity-driven membrane (GDM); GAC slow filter; membrane fouling; low energy consumption; low maintenance; rural drinking water supply

村镇供水系统面临的主要污染物是颗粒物、胶体、致病微生物、氨氮及有机物等,严重影响村镇地

区的供水安全和美丽乡村打造。基于城市供水及水处理相关经验,研究人员开发了一系列农村水处理设备及供水设施;然而,这些技术和设施在应用过程中存在工艺流程长、能耗高、运行费用高、操作复杂、运维困难、对操作人员技术要求高等不足,难以在村镇供水领域推广应用<sup>[1]</sup>。超滤能够高效地阻控水

收稿日期:2021-10-23

基金项目:东北农业大学“学术骨干”项目(20XG06)

作者简介:公维佳(1981—),女,教授,硕士生导师;

梁 恒(1978—),男,教授,博士生导师

通信作者:梁 恒,hitliangheng@163.com

中的颗粒物、悬浮物、胶体和病原微生物,解决村镇供水面临的主要水污染问题,且便于集成化、模块化和规模化设计,具有占地省、操作简单、出水水质好等特点,在村镇供水应用中具有显著的工艺优势<sup>[2]</sup>。然而,膜污染、药耗、能耗和运维问题,是制约其发展和推广应用的重要因素<sup>[3]</sup>。

以生物滤饼层为核心的重力驱动型膜滤净水技术(GDM),可在超低驱动压力(0.002~0.007 MPa,约为当前主流超滤工艺的5%~10%)下长期稳定运行,稳定通量为4~7 L/(m<sup>2</sup>·h),不需采取任何的水力反冲洗、维护性/恢复性化学清洗、错流、曝气和化学清洗等措施来控制膜污染;且有机地耦合了超滤膜和生物滤饼层双重截留屏障,强化了对污染物的深度脱除,具有操作简单、低能耗、近零维护、费用省和净水效果好等工艺优势<sup>[4]</sup>。在地表水处理方面,GDM工艺长期运行过程中,可同步实现对悬浮物、胶体、细菌、病毒、氨氮和可同化有机碳(AOC)的高效去除,膜表面形成的生物滤饼层还可强化对铁、锰的去除效能并阻控铁锰引起的膜孔堵塞污染,可有效地应对地表水季节性/突发性铁锰污染问题,是村镇供水系统的首选技术<sup>[5]</sup>。然而,目前国内外关于GDM的相关研究较少,对膜通量稳定机制缺乏系统认知,通量低和对溶解性有机碳(DOC)去除效果差仍是制约GDM技术工程化应用的关键问题。

缓速滤池可有效地强化对DOC的去除效能,控制膜污染和提升稳定通量水平,且不会显著增加工艺的操作和运维。研究表明,一方面,缓速滤池可预去除水中的污染物(如生物聚合物、荧光性污染物等),缓解膜污染;另一方面,还可充当原生/后生动物孵化器,强化GDM膜表面生物滤饼层内的捕食作用,改善其粗糙多孔性,提高GDM工艺的的稳定通量水平<sup>[6]</sup>。唐小斌等<sup>[7]</sup>对比了不同滤料如颗粒活性炭(GAC)、沸石和生物陶粒构建的缓速滤池对GDM工艺过滤效能的调控作用,指出3种滤料的缓速滤池均有助于提升GDM的净水效能和稳定通量,其中,GAC效果最佳,沸石次之,生物陶粒效果最差。尽管耦合缓速滤池可有效地提升GDM工艺的过滤效能,然而,目前关于缓速滤池对GDM通量稳定性的调控研究相对较少,作用机制尚不明晰,尤其是关于二者间的耦合原理和调控策略,尚无系统研究。因此,构建了GAC缓速滤池与GDM组合工艺(GAC/GDM),考察其长期运行过程中的净水效能、通量变化规律和膜污染行为,明确不同运行参数(如内循环和微曝气)对GAC/GDM过滤效能的影响规律;通过系统解析GDM膜表面生物滤饼层的

结构和组成特性,揭示GAC缓速滤池对GDM通量稳定性的调控机制,为GDM技术在村镇供水系统中的推广应用提供理论和技术支撑。

## 1 实验

### 1.1 原水水质及检测方法

试验中采用生活污水与脱氯自来水勾兑,模拟微污染地表水,生活污水与自来水的混合比例为1:25,原水水质如下:UV<sub>254</sub>为0.043~0.063 cm<sup>-1</sup>,氨氮质量浓度为0.40~1.23 mg/L,DO质量浓度为7.89~9.12 mg/L,DOC质量浓度为2.64~3.82 mg/L,pH为6.5~7.5,浊度为2.87~4.56 NTU,温度为18~20℃。

### 1.2 水质检测方法及生物滤饼层表征

实验中定期监测原水和出水水质,并分析膜表面生物滤饼层的组成和结构特性。其中,氨氮采用纳氏试剂分光光度法检测,UV<sub>254</sub>采用紫外可见分光光度计(波长为254 nm,T6,普析,中国)检测,DOC采用TOC仪(N/C 2100S)检测,三维荧光采用Excitation-emission matrix(EEM,F7000,日立,日本)进行检测,溶解氧采用哈希HQ40D便携式溶解氧仪进行检测。生物滤饼层内的EPS采用超声-热处理法提取后,分别采用蒽酮-硫酸分光光度法、BCA试剂盒法与ATP试剂盒法对EPS中的多糖、蛋白质与ATP进行检测,生物滤饼层形态结构采用扫描电子显微镜(Quanta 200FEG FEI,美国)进行观测。

### 1.3 实验装置及方案

为了强化对污染物的去除效能,构建了GAC/GDM组合工艺,实验装置如图1所示。原水储存在原水箱(每日重新配置),自流进入恒位水箱(水力停留时间为50 min),再经配水管道进入GAC缓速滤池进行过滤,出水进入超滤膜组件进行过滤。GAC缓速滤池的底面积为0.002 m<sup>2</sup>,高度为40 cm,内部填充GAC颗粒(厚度为25 cm),缓速滤池内水力停留时间为50 min,流速为0.0007 L/h。膜组件与GAC缓速滤池间的液位高差为60 cm(即超滤膜的过滤驱动压力为0.006 MPa),膜出水进入集水瓶中。在GDM对照组,不采用GAC缓速滤池预处理措施,即原水直接从恒位水箱自流进入超滤膜组件进行过滤处理。此外,为了考察不同运行方式对组合工艺运行效能的影响,分别设置了微循环GAC/GDM(CGAC/GDM,循环流量为3 L/h)和微曝气GAC/GDM(AGAC/GDM,曝气强度为1.36 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)),实验方案详见表1。每组设置3个平行实验,每日定期监测各组GDM的膜通量和出水水质。

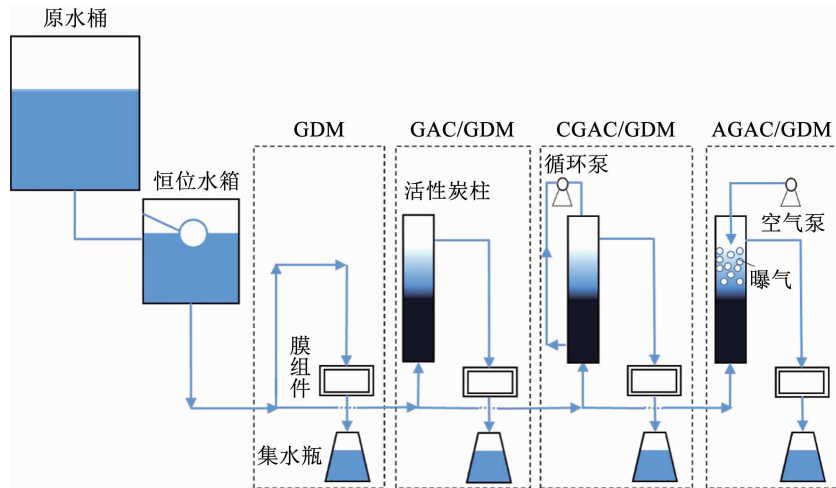


图 1 实验装置流程

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

表 1 各 GDM 实验条件

Tab. 1 Experimental conditions of each GDM process

组别	驱动水头/MPa	膜材质	截留分子量/ $10^5$ u	预处理	运行条件
GDM	0.006	PES	1.5	无	—
GAC/GDM	0.006	PES	1.5	GAC 缓速滤池	无
CGAC/GDM	0.006	PES	1.5	GAC 缓速滤池	内循环(强度为 $3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ )
AGAC/GDM	0.006	PES	1.5	GAC 缓速滤池	微曝气(强度为 $1.36 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

本实验中采用的 GAC(aladdin - C139586) 粒径为 1.5 mm。超滤膜是德国 Microdyn Nadir 公司生产的平板膜(UPI50, Microdyn Nadir, Germany), 聚醚砜(PES) 材质, 膜截留分子质量为  $1.5 \times 10^5$  u, 每个平板膜组件的有效膜过滤面积为  $76.87 \text{ cm}^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 通量变化规律及不同运行方式对其的影响

通量稳定性是评价 GDM 工艺能否成功应用的关键指标。图 2(a) 表明, 长期运行过程中, 各组 GDM 工艺的膜通量变化趋势基本一致, 可分为两个阶段。1 ~ 7 d 为第 I 阶段, 通量快速下降, GDM 对照组、GAC/GDM、CGAC/GDM 和 AGAC/GDM 的膜通量分别由  $60.56$ 、 $65.46$ 、 $60.78$  和  $64.26 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  下降到  $6.52$ 、 $6.13$ 、 $6.44$  和  $7.00 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 这是由于本试验采用无清洗过滤模式, 过滤过程中, 污染物不断在膜表面沉积, 快速形成滤饼层污染<sup>[8]</sup>。第 II 阶段( $> 8 \text{ d}$ ), 各 GDM 组的膜通量逐渐趋于稳定, GDM 对照组、GAC/GDM、CGAC/GDM 和 AGAC/GDM 的稳定通量分别为  $(3.93 \pm 0.38)$ 、 $(5.18 \pm 0.23)$ 、 $(5.35 \pm 0.25)$  和  $(5.84 \pm 0.13) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。相比 GDM 对照组, GAC/GDM、CGAC/GDM 和

AGAC/GDM 的稳定通量分别提升了约 32%、36.1% 和 48.6%, 表明采取 GAC 缓速滤池预处理有助于提升 GDM 的稳定通量; 且采取微循环和微曝气更有利于提升稳定通量水平, 尤其是微曝气措施, 这是由于曝气提高了膜前水溶解氧质量浓度, 有助于提高膜表面生物滤饼层内的微生物活性和生物捕食作用<sup>[9]</sup>。

### 2.2 对有机物的去除效能

原水中  $\text{UV}_{254}$  为  $0.043 \sim 0.063 \text{ cm}^{-1}$ , 经 GDM 对照组过滤处理后,  $\text{UV}_{254}$  平均下降了 10%, 但去除效果不稳定, 出现膜出水中  $\text{UV}_{254}$  与原水一致甚至略高于原水的现象, 这是由于截留在生物滤饼层内的胶体型或大分子有机物在微生物的作用下发生水解作用, 导致其分子质量减小而透过超滤膜, 引起出水水质恶化<sup>[4]</sup>。采用 GAC 缓速滤池预处理后,  $\text{UV}_{254}$  的去除效果大幅提升, GAC/GDM 出水中  $\text{UV}_{254}$  降至  $(0.014 \pm 0.007) \text{ cm}^{-1}$ , 平均去除率高达 75.02%, 这是由于 GAC 对水中的有机物具有高效吸附作用, 且 GAC 滤池的滤速较低 ( $0.2 \sim 0.4 \text{ m/h}$ ), 进一步提升了微生物对有机物的降解作用<sup>[10]</sup>。相比之下, 采用内循环和微曝气措施后, CGAC/GDM 与 AGAC/GDM 对  $\text{UV}_{254}$  去除率却略低于 GAC/GDM, 这是由于

内循环和微曝气增加了膜前水中溶解氧的质量浓度,加速了滤饼层内生物的水解作用<sup>[11]</sup>,导致截留在膜表面的有机颗粒和大分子有机物更易水解成溶解性小分子而透过超滤膜进入出水中。

此外,考察了通量稳定后各组 GDM 对 DOC 去除效能,结果如图 3(c) 所示。GDM 对照组对 DOC 的去除效果较差,去除率低于 10%,表明当

DOC 质量浓度较高时,若只采用单级 GDM 工艺难以满足饮用水水质要求。相比 GDM 对照组,采用 GAC 缓速滤池预处理后,GAC/GDM 耦合工艺对 DOC 的去除效能显著提升,平均去除率提升至 86%<sup>[12]</sup>。与 UV<sub>254</sub> 的去除效能类似,采用内循环和微曝气措施后,CGAC/GDM 与 AGAC/GDM 对 DOC 的去除率也低于 GAC/GDM 。

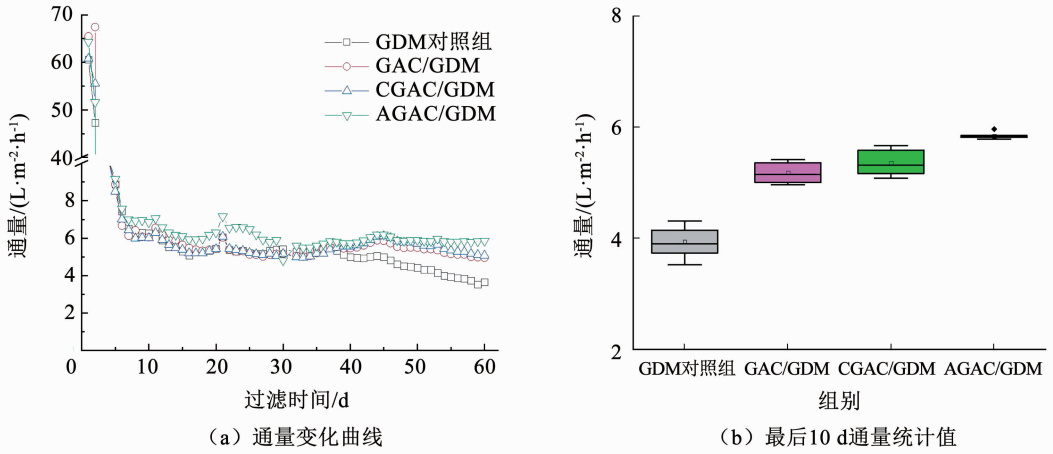


图2 长期运行过程中各 GDM 组通量随时间变化

Fig. 2 Development of membrane flux of each GDM process during long-term filtration

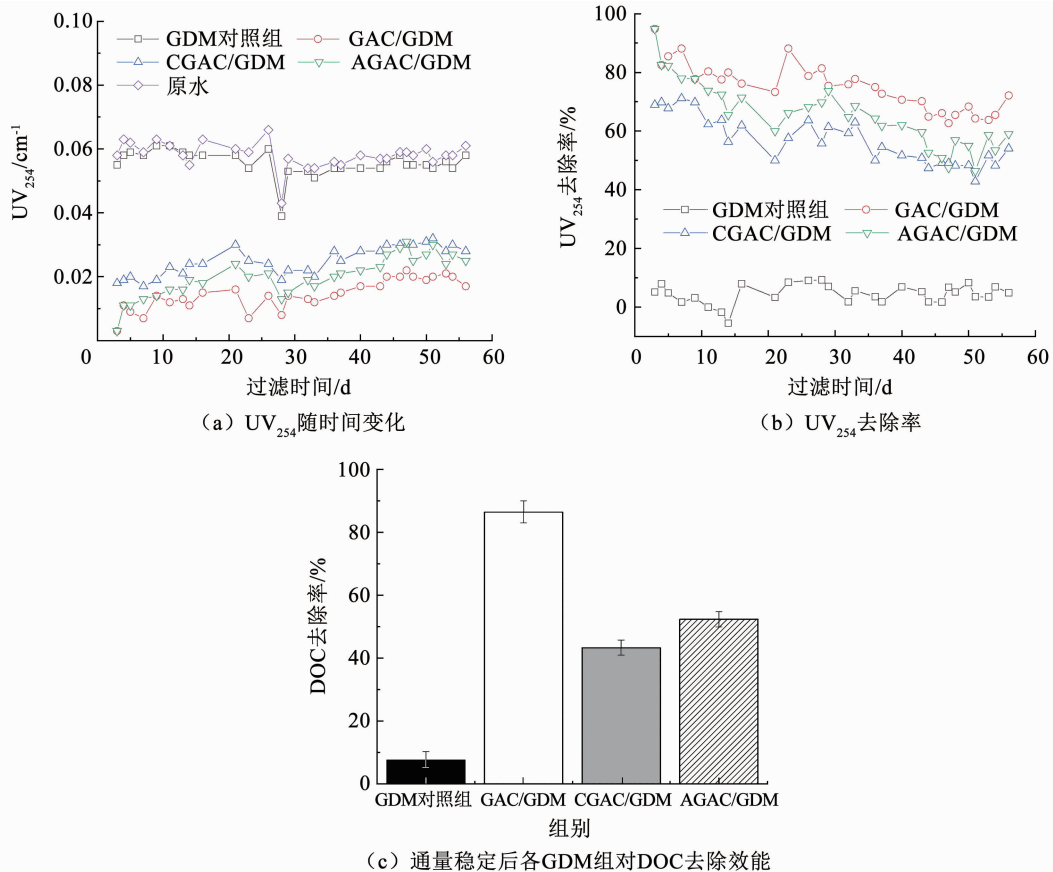


图3 UV<sub>254</sub>随时间变化规律及 DOC 去除效能(通量稳定后)

Fig. 3 Variation of UV<sub>254</sub> over time and TOC removal efficiency(after flux stabilization)

### 2.3 对氨氮的去除效能

氨氮属于亲水性小分子物质,极易穿过超滤膜而难以被去除,常规超滤工艺对其几乎没有去除作用。如图4所示,过滤初期,GDM对照组对氨氮去除效果不明显,即使采用GAC缓速滤池预处理,GAC/GDM组合工艺对氨氮的去除率仍较低( $\sim 25\%$ ),这是由于活性炭对亲水性小分子物质(如氨氮)的吸附效果较差。第10~20天,GDM对照组对氨氮的去除效果显著增强,去除率由41.86%提升到78.39%,这是由于随着过滤的进行,GDM膜表面逐渐形成了生物滤饼层,强化了对氨氮的硝化作用。采用GAC预处理后,GAC/GDM出水中氨氮质量浓度降低至 $(0.045 \pm 0.022)$  mg/L,氨氮的平均去除率增加至90.99%,较GDM对照组提升了约14%,这是由于GAC缓速滤池有利于微生物的附着生长,强化了生物作用。丁安等<sup>[13]</sup>研究亦表明,采用生物预处理可强化对氨氮的去除效能,氨氮的平均去除率可提升至80%~90%。相比GAC/GDM,采用内循环和微曝气措施后,CGAC/GDM和AGAC/GDM对氨氮的去除效能无显著提升作用,这是由于氨氮的去除率已高达90%,水中残余的氨氮质量浓度低于0.05 mg/L,难以被进一步去除。此外,长期运行过程中,GDM对照组对氨氮的去除效能受原水中氨氮质量浓度的影响波动较大,而GAC/GDM组合工艺对氨氮的去除率始终维持稳定,表明缓速滤池预处理可显著地提升组合工艺抗原水氨氮质量浓度冲击负荷的能力。

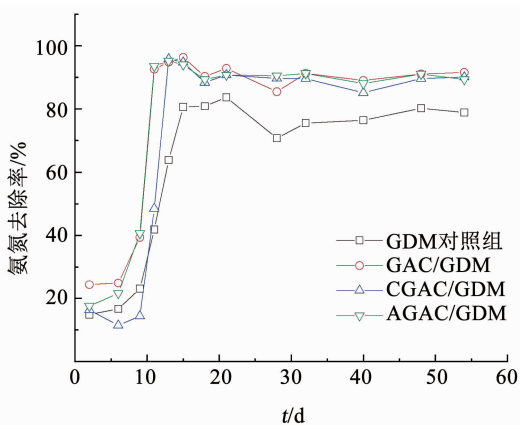


图4 氨氮的去除率

Fig. 4 Removal rate of ammonia nitrogen

### 2.4 对荧光性污染物的去除效能

进出水中的荧光性污染物特性分析如图5所示,原水中观测到4个荧光峰(峰A、峰B、峰C和峰D),分别代表腐殖酸、色氨酸、富里酸和芳香族类蛋

白质,对应的激发光和发射光波长分别为310~330/390~410 nm,275~300/340~360 nm,210~230/400~430 nm和200~250/330~360 nm。过滤20 d后,GDM对照组出水中峰A、峰B、峰C和峰D的强度下降率分别为7.77%、24.89%、4.12%和8.97%;继续运行至第40天,GDM对照组对荧光污染物的去除效能与第20天时基本一致,表明GDM工艺对水中荧光性污染物具有较好的截留作用,且长期运行过程中对荧光性污染物具有稳定的去除效果,这与唐小斌等<sup>[14]</sup>研究结果一致。采用GAC缓速滤池预处理后,GAC/GDM出水中荧光性污染物强度大幅下降(20 d),峰A、峰B、峰C和峰D的下降率分别高达86.01%、75.97%、81.07%和66.37%,这是由于GAC缓速滤池的吸附和生物降解协同作用强化了荧光性有机物的去除效能<sup>[15]</sup>。然而,相比GAC/GDM,采用内循环或微曝气措施后,AGAC/GDM和CGAC/GDM对荧光性污染物的去除效能反而略有降低,但显著高于GDM对照组。

### 2.5 GAC滤池内溶解氧变化

原水及各实验组中缓速滤池的溶解氧质量浓度如图6所示,可以看出,原水中的DO质量浓度最高(7.92~9.15 mg/L),而GAC/GDM出水中DO质量浓度最低( $< 2$  mg/L),这是由于原水进入缓速滤池后,附着在滤料表面微生物的生物作用会消耗大量DO,如不采取措施,出水中DO质量浓度会进一步下降<sup>[16]</sup>。CGAC/GDM的DO质量浓度维持在5~6 mg/L,这是由于CGAC/GDM采用微循环措施,有助于提高水的流动和复氧过程而提升出水中溶解氧质量浓度<sup>[17]</sup>。然而,AGAC/GDM因采用连续微曝气措施,其出水中DO质量浓度(7.03~8.72 mg/L)显著高于其余两组。结合对污染物的去除效能可知,GAC/GDM对污染物的去除效能最优,而DO质量浓度相对较高的CGAC/GDM与AGAC/GDM对污染物去除效能反而略有降低,这可能是增加膜前水中溶解氧的质量浓度,会加速滤饼层内生物的水解作用,促进截留在生物滤饼层内的大分子颗粒/胶体型有机物水解成小分子溶解型有机物而透过超滤膜,导致DOC去除率下降。

### 2.6 生物滤饼层特性分析

生物滤饼层特性是影响GDM工艺连续稳定运行的关键因素。因此,重点分析滤饼层的生化组分特性和形貌结构,以进一步揭示GAC缓速滤池预处理对GDM通量稳定性的调控机制以及不同运行方式对GAC/GDM组合工艺的影响规律。

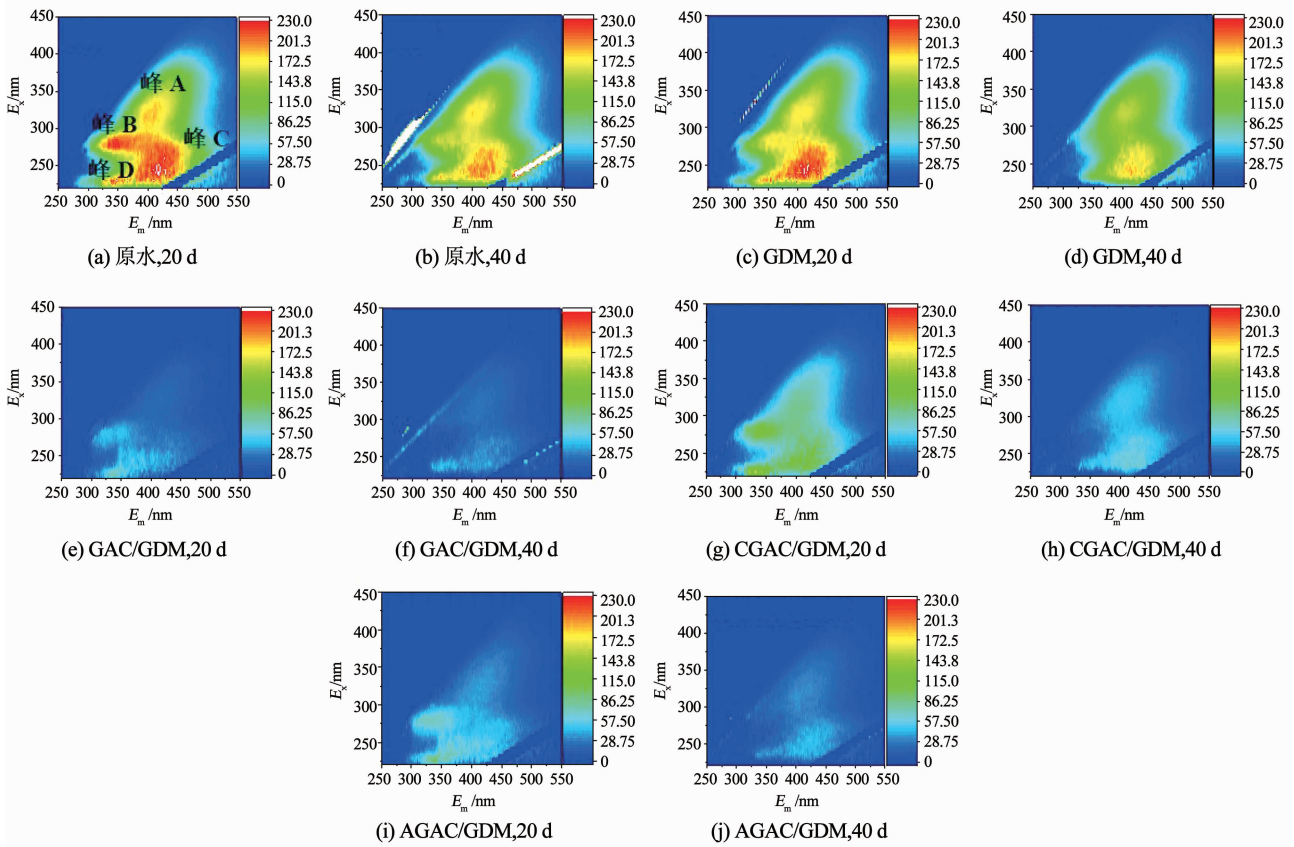


图 5 原水及各组出水中荧光污染物分析

Fig. 5 Analysis of florescent compounds in raw water and effluents

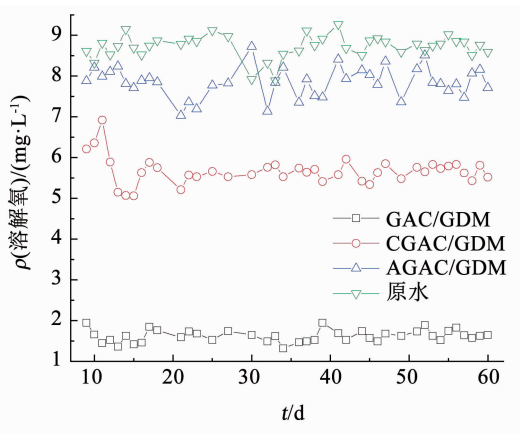


图 6 溶解氧质量浓度随时间的变化

Fig. 6 Variation of dissolved oxygen concentration with time

### 2. 6. 1 胞外聚合物 (EPS) 质量浓度分析

EPS 是引起滤饼层污染和膜孔堵塞污染的主要物质,其质量浓度和组成直接影响 GDM 工艺长期运行的通量稳定性和稳定通量水平。因此,实验末期,收集并提取各 GDM 组膜表面生物滤饼层和膜孔中的 EPS,分别命名为 Ex-EPS 和 In-EPS,并采用 BCA 试剂盒法和葱酮-硫酸法定量分析了 Ex-EPS 和 In-EPS 中的蛋白质和多糖质量浓度<sup>[16]</sup>。图 7 表明,各 GDM 组的 EPS 质量浓度和分布具有一定的相似性,即 Ex-EPS 的质量浓度均显著高于 In-EPS,

这是由于 GDM 长期过滤过程中,膜表面的生物滤饼层起到了良好的预过滤效应,有效地降低了污染物进入膜孔并沉积在其中的风险,也表明生物滤饼层是影响 GDM 通量稳定性和稳定通量水平的关键因素。然而,因工艺组成和运行方式的不同,各 GDM 组的 EPS 质量浓度和分布也具有显著的差异性。相比 GDM 对照组,采用 GAC 缓速滤池预处理后,GAC/GDM 的 Ex-EPS 显著下降,其中,蛋白质和多糖的质量浓度分别降低至 0.076 和 0.084 g/m<sup>2</sup>,下降率分别为 21.57% 和 54.73%。同时,In-EPS 也有所降低,蛋白质和多糖质量浓度分别降低了 3.14% 和 64.13%,这一方面是由于 GAC 预处理可有效地将高分子/胶体型有机污染物预去除,避免其在膜表面和膜孔中沉积,另一方面是由于 GAC 预处理有助于减少 GDM 膜表面生物滤饼层内的微生物数量,从而降低 EPS 分泌量<sup>[18]</sup>。当采用内循环和微曝气措施后,CGAC/GDM 和 AGAC/GDM 膜表面滤饼层内的 Ex-EPS 质量浓度较 GAC/GDM 有所增加,结合图 3、6 和 7 可知,内循环或微曝气措施增加了 GDM 工艺进水中溶解氧质量浓度,加速了滤饼层内微生物的生长、繁殖和代谢活动,导致 EPS 质量浓度有所增加。

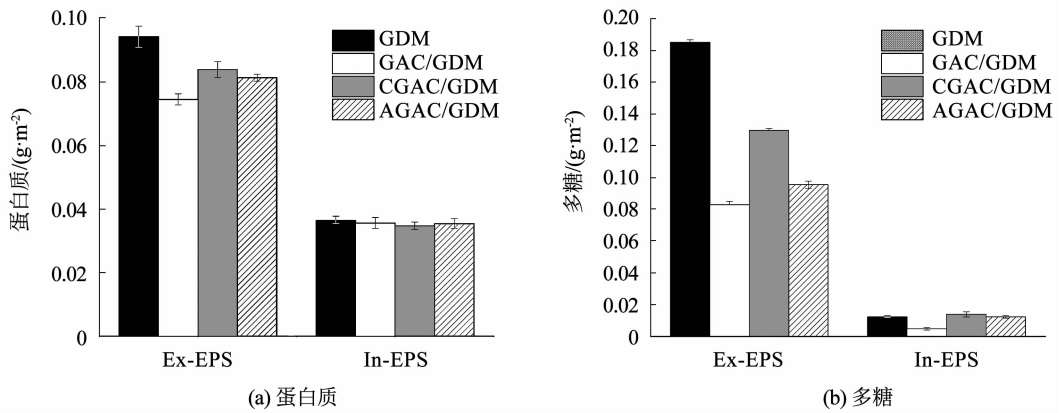


图 7 膜表面滤饼层内 EPS 质量浓度分析

Fig. 7 EPS concentration of bio-cake layer attached on membrane surface

### 2.6.2 ATP 浓度

Peter-Varbanets 等研究表明<sup>[19]</sup>,生物滤饼层内的微生物作用是影响 GDM 工艺长期稳定运行的关键因素。ATP 作为生物体最直接的能源物质,是表征微生物活性的重要指标。由图 8 可知,GDM 对照组生物滤饼层内的 ATP 浓度最高,表明其滤饼层内的微生物及生物活性较高,这也是 GDM 对照组长期运行过程中,膜通量能够达到稳定状态的主要原因。相比之下,采用 GAC 缓速滤池预处理后,GAC/GDM 生物滤饼层内的 ATP 浓度显著下降,这是由于 GAC 缓速滤池预处理大量消耗水中的营养物质(如 AOC),影响了后续 GDM 工艺膜表面生物滤饼层内微生物的生长、繁殖和生物活性,这与图 7 中滤饼层内 EPS 的质量浓度和分布特性相符。类似地,先前亦有报道指出生物预处理工艺会显著降低 GDM 膜表面生物滤饼层内微生物的数量及活性<sup>[17]</sup>。此外,相比 GAC/GDM,采取内循环工艺有助于促进 GAC 缓速滤池的吸附和生物降解作用,强化营养物质的预去除,影响 CGAC/GDM 生物滤饼层内微生物的生长、繁殖和生物活性,导致 CGAC/GDM 滤饼层内的 ATP 浓度进一步降低;而采用微曝气措施有助于提高膜前水中溶解氧质量浓度,提高微生物的活性,故 AGAC/GDM 生物滤饼层内的 ATP 浓度较 GAC/GDM 略有增加。

### 2.6.3 生物滤饼层形貌结构

研究表明,GDM 膜面生物滤饼层的粗糙结构是导致其长期运行过程中通量达到稳定状态的关键因素,GDM 滤饼层结构越粗糙、孔隙越发达,其稳定通量越高。因此,实验末期,利用 SEM 考察了各组 GDM 工艺膜表面生物滤饼层的微观形貌结构特性,结果如图 9 所示。GDM 对照组的生物滤饼层较为粗糙,可观测到凹凸结构,结合图 2 可知,这是其长期运行过程中通量能够达到稳定状态的主要原因。

相比 GDM 对照组,采取 GAC 缓速滤池预处理后,GAC/GDM 膜面生物滤饼层的粗糙度显著增加,沟壑纵横,可观测到明显的团簇结构,表明采用 GAC 缓速滤池预处理可有效地改善 GDM 膜表面生物滤饼层的形貌和结构特性,从而提升其稳定通量水平。此外,相比 GAC/GDM,采用微曝气措施后,AGAC/GDM 生物滤饼层变得更为粗糙,团簇结构更为明显,这是由于微曝气措施提高了 GDM 膜表面生物滤饼层内的微生物活性(图 8)。研究表明,GDM 生物滤饼层内的微生物活动是导致其粗糙多孔性结构形成的关键因素,当抑制微生物作用后,滤饼层变得匀实致密,通量也难以达到稳定状态<sup>[20]</sup>。因此,AGAC/GDM 的稳定通量较 GAC/GDM 有所提升(图 2)。

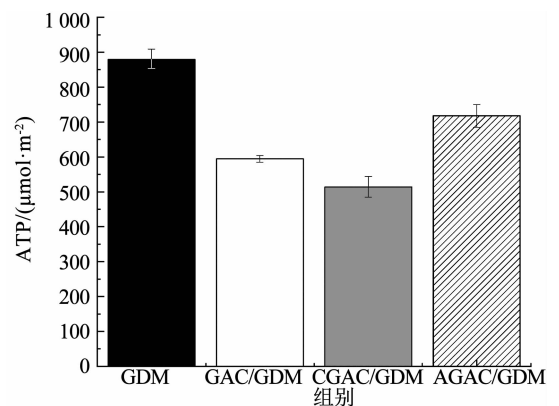


图 8 各实验组 ATP 的浓度

Fig. 8 Content of ATP in each experimental group

### 2.7 通量稳定机制分析

图 2 表明,各组 GDM 工艺长期运行过程中,通量均可达到稳定状态,但其稳定通量却有所差异。先前的研究表明<sup>[21]</sup>,GDM 工艺的通量稳定性与膜表面生物滤饼层内微生物作用、滤饼层的结构和生物组分显著相关。Derlon 等<sup>[22]</sup>的研究进一步表明,生物滤饼层越粗糙,GDM 的稳定通量越高,反之则

越低。结合图 7~9 可知,本实验中各 GDM 的稳定通量水平也与滤饼层的结构和组成显著相关。相比 GDM 对照组,耦合 GAC 缓速滤池后,GAC/GDM 的稳定通量提升了 32%,这是由于 GAC 缓速滤池一方面可强化水中污染物的预去除,改善 GDM 膜前进水水质,减少膜面及膜孔中污染物的含量,缓解膜污染;另一方面,缓速滤池还可充当生物预孵化器,

强化 GDM 膜面生物滤饼层内的捕食作用,改善生物滤饼层的粗糙多孔结构,提高 GDM 的稳定通量<sup>[18]</sup>。相比 GAC/GDM,采用内循环措施和微曝气措施可显著提高水中溶解氧的质量浓度(图 6),有助于促进 GDM 膜表面微生物的作用,提高生物滤饼层的粗糙度(图 9)。因此,CGAC/GDM 和 AGAC/GDM 的稳定通量较 GAC/GDM 有进一步提高。

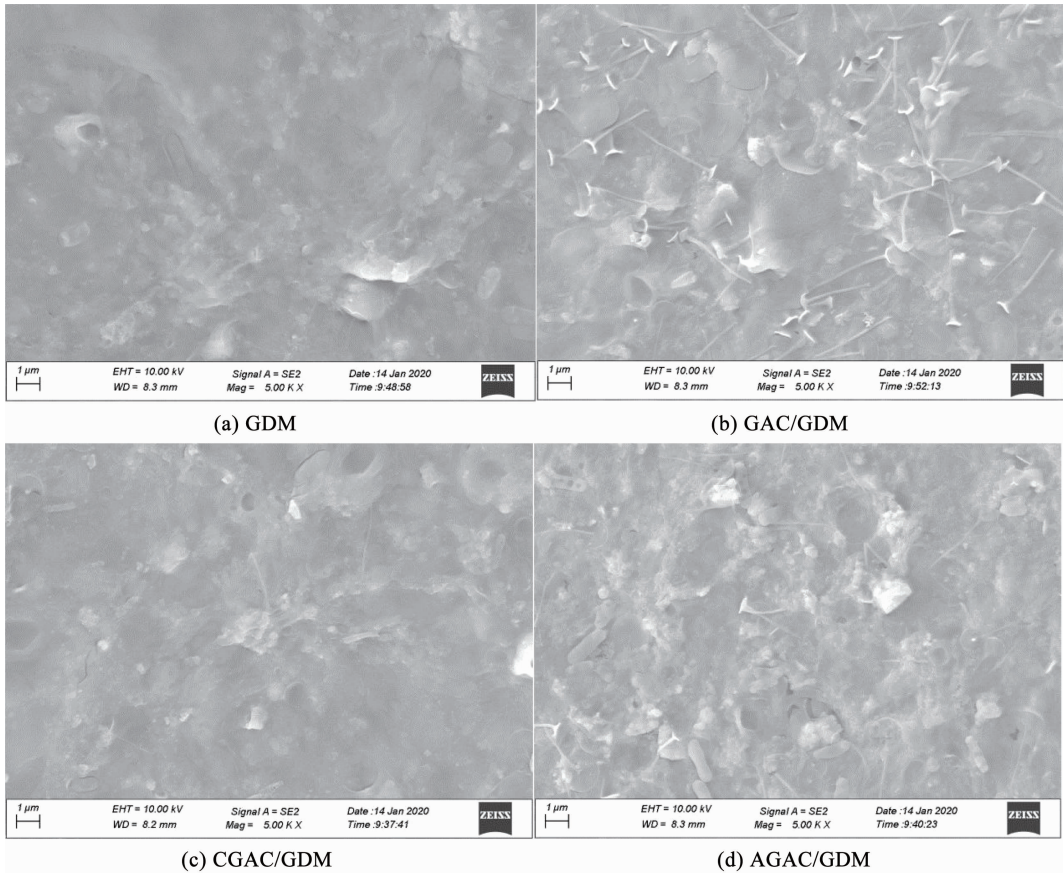


图 9 各实验组 SEM 图像

Fig.9 SEM images of each experimental group

### 3 结 论

1) GDM 工艺直接处理微污染地表水,在无清洗和超低压(0.006 MPa)重力驱动条件下,长期运行过程中其通量可达到稳定状态,且有机地结合了生物滤饼层和超滤膜双重截留作用,强化了对氨氮的去除效能(平均去除率 78%),对溶解性有机物也具有一定的去除作用(~10%),且兼具低维护、低能耗、操作简单等工艺特点,适用于村镇饮用水处理。

2) 采用 GAC 缓速滤池预处理,GAC/GDM 可有效地提升对  $UV_{254}$ 、DOC、氨氮和荧光性污染物的去除效能,平均去除率分别高达 75%、86%、90% 和 77%;且有助于降低膜表面生物滤饼层内 EPS 的质量浓度,改善滤饼层的粗糙多孔结构,稳定通量较 GDM 对照组提升了约 32%。

3) 采用内循环和微曝气措施有助于进一步改善生物滤饼层的形貌和粗糙多孔性结构,提升稳定通量水平,相比 GDM 对照组分别提升了约 36% 和 49%;然而,采用内循环和微曝气措施会强化膜表面生物滤饼层内微生物的水解作用,导致出水中 DOC 和  $UV_{254}$  较 GAC/GDM 略有增加。

### 参 考 文 献

- [1] 王学文, 曹少飞, 王慧娟, 等. 我国农村水环境污染现状与治理措施的思考[J]. 科技创新与生产力, 2018(6): 58  
WANG Xuewen, CAO Shaofei, WANG Huijuan, et al. Thoughts on status quo and treatment measures of water environment pollution in rural areas[J]. Sci - Tech Innovation & Productivity, 2018(6): 58
- [2] 梁晓菲, 薛罡, 王金波. 超滤净水技术的研究[J]. 环保科技, 2008(2): 13  
LIANG Xiaofei, XUE Gang, WANG Jinbo. Research on ultrafiltration water purification technology [J]. Environmental

- Protection and Technology, 2008(2): 13
- [3] CHANG Haiqing, LIANG Heng, QU Fangshu, et al. Hydraulic backwashing for low-pressure membranes in drinking water treatment; a review[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 540: 362. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.06.077
- [4] 梁恒, 唐小斌, 王金龙, 等. 无清洗重力驱动超滤工艺净水效能及机制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 103  
LIANG Heng, TANG Xiaobin, WANG Jinlong, et al. Performance and mechanisms of gravity-driven membrane filtration for water treatment without cleaning [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 103. DOI:10.11918/202003022
- [5] TANG Xiaobin, ZHU Xuewu, HUANG Kaijie, et al. Can ultrafiltration singly treat the iron- and manganese-containing groundwater? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020: 124983
- [6] TANG Xiaobin, CHENG Xiaoxiang, ZHU Xuewu, et al. Ultra-low pressure membrane-based bio-purification process for decentralized drinking water supply: improved permeability and removal performance[J]. *Chemosphere*, 2018, 211: 784. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.183
- [7] 唐小斌, 张洪嘉, 王元馨, 等. 缓速滤池耦合重力流超滤工艺净化微污染地表水研究[J]. *给水排水*, 2020, 56(11): 25  
TANG Xiaobin, ZHANG Hongjia, WANG Yuanxin, et al. Performance of integrated slow filter and gravity-driven membrane (GDM) filtration treating micro-polluted surface water[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(11): 25
- [8] PETER-VARBANETS M, MARGOT J, TRABER J, et al. Mechanisms of membrane fouling during ultra-low pressure ultrafiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 377(1/2): 42. DOI:10.1016/j.memsci.2011.03.029
- [9] 聂中林, 马赫, 梁鹏, 等. 不同填料曝气生物滤池处理微污染河水的效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 41  
NIE Zhonglin, MA He, LIANG Peng, et al. Treatment effect of micro-polluted river water by biological aerated filters with different media[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 41
- [10] QU Fangshu, YAN Zhongsen, WANG Hao, et al. A pilot study of hybrid biological activated carbon (BAC) filtration-ultrafiltration process for water supply in rural areas; role of BAC pretreatment in alleviating membrane fouling [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4(2): 315. DOI: 10.1039/c7ew00381a
- [11] DING An, LIANG Heng, LI Guibai, et al. Impact of aeration shear stress on permeate flux and fouling layer properties in a low pressure membrane bioreactor for the treatment of grey water[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 510: 382. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.03.025
- [12] 魏朝成, 于彩虹, 徐磊. 粉末活性炭预沉积强化超滤膜处理微污染水的效应研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(4): 458  
WEI Chaocheng, YU Caihong, XU Lei. Effect of powdered activated carbon deposited ultrafiltration membrane for enhanced micro-polluted water treatment[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(4): 458
- [13] DING An, SONG Ruilin, CUI Hao, et al. Presence of powdered activated carbon/zeolite layer on the performances of gravity-driven membrane (GDM) system for drinking water treatment; ammonia removal and flux stabilization [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149415. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149415
- [14] 唐小斌, 梁恒, 瞿芳术, 等. 低压无清洗浸没式直接超滤工艺中试研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(17): 29  
TANG Xiaobin, LIANG Heng, QU Fangshu, et al. Performance of gravity-driven low-pressure direct ultrafiltration system with submerged membrane[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(17): 29
- [15] DING An, WANG Jinlong, LIN Dachao, et al. Effects of GAC layer on the performance of gravity-driven membrane filtration (GDM) system for rainwater recycling[J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 253. DOI:10.1016/j.chemosphere.2017.10.034
- [16] TANG Xiaobin, DING An, PRONK W, et al. Biological pretreatments enhance gravity-driven membrane filtration for the decentralized water supply: linking extracellular polymeric substances formation to flux stabilization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 721. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.06.155
- [17] 包小波, 陈洁. 城市河道水流溶解氧分布影响分析[J]. *中国水能及电气化*, 2017(4): 57  
BAO Xiaobin, CHEN Jie. Impact analysis on distribution of dissolved oxygen in city river flow [J]. *China Water Power & Electrification*, 2017(4): 57
- [18] TANG Xiaobin, PRONK W, DING An, et al. Coupling GAC to ultra-low-pressure filtration to modify the biofouling layer and bio-community: flux enhancement and water quality improvement[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 333: 289. DOI:10.1016/j.cej.2017.09.111
- [19] PETER-VARBANETS M, HAMMES F, VITAL M, et al. Stabilization of flux during dead-end ultra-low pressure ultrafiltration [J]. *Water Research*, 2010, 44(12): 3607. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.020
- [20] CHOMIAK A, MIMOSO J, KOETZSCH S, et al. Biofilm formation and permeate quality improvement in gravity driven membrane ultrafiltration[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2014, 14(2): 274. DOI:10.2166/ws.2013.197
- [21] DESMOND P, BEST J P, MORGENROTH E, et al. Linking composition of extracellular polymeric substances (EPS) to the physical structure and hydraulic resistance of membrane biofilms [J]. *Water Research*, 2018, 132: 211. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.058
- [22] DERLON N, PETER-VARBANETS M, SCHEIDEGGER A, et al. Predation influences the structure of biofilm developed on ultrafiltration membranes [J]. *Water Research*, 2012, 46(10): 3323. DOI: 10.1016/j.watres.2012.03.031

(编辑 刘 彤)