

尉童, 韩敏, 田宝义, 等. 原水浊度变化对重力流超滤性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3054-3062.

Wei T, Han M, Tian B Y, et al. Effect of raw water turbidity variation on performance of gravity driven membrane filtration systems [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3054-3062.

原水浊度变化对重力流超滤性能的影响

尉童¹, 韩敏², 田宝义³, 李荣光³, 文刚¹, 黄廷林¹, 李凯^{1*} (1. 西安建筑科技大学, 西北水资源环境与生态教育部重点实验室, 陕西省水污染控制与水质安全保障协同创新中心, 陕西 西安 710055; 2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 天津水务集团有限公司, 天津 300202)

摘要: 考察了原水浊度阶段性升高对重力流超滤(GDM)系统稳定通量除污性能及生物滤饼层的影响. 结果表明, 原水浊度升高导致 GDM 通量明显下降, 但经过 17~30d 后重新达到稳定, 与始终低浊(1.8~3.7NTU)的对照组相比, 原水浊度升高至 10、50 和 100NTU 使 GDM 系统稳定通量分别降低 15%、36% 和 61%; 颗粒物携带的大分子有机物被生物滤饼层中微生物降解为小分子有机物后透过膜, 因此原水浊度升高导致出水中溶解性有机物增加; GDM 系统启动 9d 后对氨氮的去除率可达 80% 以上, 原水浊度升高导致氨氮去除能力暂时降低, 但经过 7~11d 的适应期后恢复; 原水浊度升高使生物滤饼层厚度增加 1.8~7.9 倍, 滤饼层中微生物胞外聚合物增加 37%~98%, 微生物种群结构发生一定变化. GDM 系统对原水浊度升高有一定的适应能力.

关键词: 重力流超滤(GDM); 原水浊度; 稳定通量; 氨氮; 生物滤饼层

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3054-09

Effect of raw water turbidity variation on performance of gravity driven membrane filtration systems. WEI Tong¹, HAN Min², TIAN Bao-yi³, LI Rong-guang³, WEN Gang¹, HUANG Ting-lin¹, LI Kai^{1*} (1. Collaborative Innovation Center of Water Pollution Control and Water Quality Security Assurance of Shaanxi Province, Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Inner Mongolia Water Resources & Hydropower Engineering Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 3. Tianjin Water Group Co., LTD, Tianjin 300202, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3054~3062

Abstract: This study investigated the effects of raw water turbidity variation on the stable flux, pollutants removal, and bio-cake layer of gravity flow ultrafiltration (GDM) system. The results showed that the increase of raw water turbidity led to a significant decrease in the flux of GDM system, but a new stable flux can be achieved in 17~30 days. Compared to control GDM with low influent turbidity (1.8~3.7NTU), the increase of raw water turbidity to 10, 50 and 100 NTU reduced the stable flux of GDM system by 15%, 36% and 61%, respectively. The macromolecular organic matter carried by particles was degraded by microorganisms in the bio-cake layer to low molecular weight organic matter, which passed through the membrane and resulted in increase of dissolved organic matter in the effluent with the increase of raw water turbidity. The ammonia removal rate of GDM system reached more than 80% after 9 days of start-up, and the temporary decrease in ammonia nitrogen removal capacity occurred due to the increase of raw water turbidity. However, it recovered after 7~11 days of adaptation period. With the increase of raw water turbidity, the thickness of bio-cake layer increased by 1.8 to 7.9 times and the microbial extracellular polymeric substances increased by 37 to 98%. Meanwhile, the microbial community structure underwent certain changes. This study shows that GDM system has certain adaptability to increase of raw water turbidity.

Key words: Gravity-driven membrane (GDM); raw water turbidity; stable flux; ammonia; bio-cake layer

地表水源普遍存在汛期浊度高、氨氮超标、微生物数量超标等问题^[1-2]. 在常规水处理工艺中, 对于汛期浊度升高的问题, 主要通过强化混凝和沉淀来解决^[3], 但由于药剂成本和建设投资费用较高, 操作复杂等, 该技术难以在农村分散供水中应用^[4]. 超滤技术可以有效的去除高浊度水中的悬浮固体颗粒, 并且对去除水中病原微生物有着其他净水工艺不可比拟的技术优势. 但是常规超滤工艺随着污染物

的累积会加重膜污染, 需要频繁的反冲洗, 增加维护运行费用. 重力流超滤(GDM)因为在膜表面形成松散异质的生物滤饼层, 可以仅依靠重力就可以保持稳定通量, 不需要反冲洗和化学清洗^[5-6]. 低能耗和低

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52470015); 陕西省教育厅协同创新中心专项(22JY036); 天津水务集团科研项目(2023KY-01)

* 责任作者, 教授, likai@xauat.edu.cn

维护特性使 GDM 成为分散式水处理中非常有竞争力的净水技术.在地表水和地下水处理^[7-9]、废水处理和回用^[10-11]、雨水收集^[12-14]等领域均有应用.然而,它对汛期原水浊度变化的适应性尚不明确.

为探究浊度阶段性升高对 GDM 系统的影响,本文在 GDM 系统运行稳定以后,阶段性将进水浊度升高至 10NTU(10NTU-GDM)、50NTU(50NTU-GDM)和 100NTU(100NTU-GDM),评估不同浊度下 GDM 通量和污染物去除效率,通过分析生物滤饼层的组成和形貌,阐明阶段性浊度升高影响 GDM 系统的机制,旨在为 GDM 系统在水质多变地表水中的应用提供参考.

1 材料与方 法

1.1 水质与检测方法

原水取自西安市金盆水库的地表水.原水水质的 DOC 为 1.67~2.08mg/L,UV₂₅₄ 为 0.048~0.053cm⁻¹,浊度为 1.8~3.7NTU,氨氮为 0.13~0.32mg/L,溶解氧为 7.4~9.7mg/L.不同地域和类型的水源汛期浊度变化范围差异较大(几十至上千 NTU)^[15-16],《重力驱动型超滤给水处理技术规程(征求意见稿)》规定单独采用 GDM 工艺时原水浊度不宜超过 2.0NTU^[17],本研究将考察的原水浊度设定为该推荐值的 50 倍(100NTU)以内.水库表层底泥由近期暴雨径流中颗粒物沉积形成,组成与汛期径流中浊度物质相似^[18],因此实验中通过向原水中投加不同量水库表层底泥使原水浊度分别达到 10,50 和 100NTU,对应的 DOC 增加至 1.70~2.19mg/L,UV₂₅₄ 增加至 0.050~0.056cm⁻¹.为了分析 GDM 系统去除氨氮的性能,在原水中加入 NH₄Cl 模拟受到氨氮污染的地表水^[19],使得实际进水中氨氮浓度为 0.90~1.16mg/L.

水样经 0.45μm 滤膜过滤后使用岛津总有机碳分析仪测量溶解性有机碳(DOC);使用 U-3900UV/Vis 分光光度计测量水样的紫外线吸光度(UV₂₅₄);采用日立 F7000 激发发射矩阵光谱仪分析水样中的荧光物质;用比色法测定水中氨氮浓度.用便携式仪器测定水样的浊度、水温和 pH 值.在马弗炉中用燃烧法测定生物滤饼层中有机和无机物含量.

1.2 实验材料和装置

使用商品聚偏氟乙烯中空纤维膜,内径 0.7mm,外径 1.3mm,截留分子量 100kDa,膜组件面积

36.74cm².新的膜在使用前先用 50%乙醇浸泡 2h.浸泡结束后用超纯水连续冲洗 5min 后在超纯水中浸泡 24h,期间更换一次超纯水,确保去除保存剂.

图 1 是重力驱动超滤实验装置示意.该装置由进水恒位水箱、GDM 膜池、溢流堰以及集水瓶组成.进水恒位水箱放置在其水位距离溢流堰溢流口以上 0.6m 的高度.通过浮球阀来保证恒定水位,原水从恒位水箱进入 GDM 膜池,经超滤膜过滤进入溢流堰,最后溢流至集水瓶中.

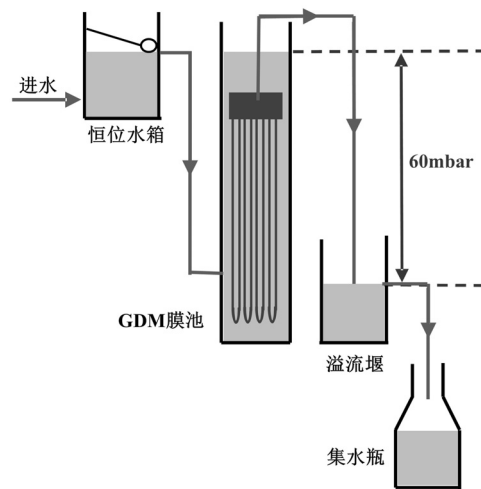


图 1 重力驱动超滤(GDM)实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the gravity-driven membrane experimental setup

1.3 分析方法

1.3.1 渗透通量和膜阻力分析 在整个运行期间,通过集水瓶中收集的产水量计算膜通量.每天在固定时间测定渗透通量(L/(m²·h)),考虑到水温变化会导致水的粘度系数发生改变,故通过式(1)将渗透通量归一化为 20℃ 下的渗透通量^[20]:

$$J_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{J_T \mu_T}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}} \quad (1)$$

式中: $J_{20^{\circ}\text{C}}$ 表示校正后渗透通量,L/(m²·h); J_T 表示未校正渗透通量; μ_T 表示实验温度下水的粘度系数; $\mu_{20^{\circ}\text{C}}$ 表示 20℃ 时水的粘度系数.使用经验方程计算粘度系数:

$$\mu_T = 1.784 - (0.0575 \times T) + (0.0011 \times T^2) - (10^{-5} \times T^3) \quad (2)$$

采用串联阻力模型结合实验结束后膜表面清洗计算膜阻力构成:

$$R_t = \frac{\text{TMP}}{\mu_{20^{\circ}\text{C}} J_{\text{stable}}} \quad (3)$$

$$R_t = R_m + R_p + R_c \quad (4)$$

式中:TMP 是跨膜压差(60mbar); J_{stable} 是 20℃ 的稳定通量; R_t 是总阻力; R_m 是实验开始前测得的膜自身阻力; R_p 是膜孔堵塞阻力,实验结束后通过水力清洗去除膜表面滤饼层后测得的阻力减去 R_m 得到, R_c 是滤饼层阻力, $R_c = R_t - (R_m + R_p)$.

1.3.2 生物滤饼层组分和结构分析 在试验结束后,将反应器中的膜组件取出,使用硅胶软刷将生物滤饼层从膜上刮下进行后续分析.有机物和无机物的含量通过在坩埚中进行燃烧处理测得.胞外聚合物(EPS)中多糖通过苯酚-硫酸法以葡萄糖为标准进行测量,蛋白质则通过改良型 BCA 试剂盒以牛血清白蛋白(BSA)为标准进行测量.使用生物化学发光仪 GloMax Multi Jr-PROMEGA 对三磷酸腺苷(ATP)进行测量分析.采用流式细胞仪 Accuri C6-BD 对滤饼层中的细菌数进行检测.在 Majorbio I-Sanger 云平台使用 16S rRNA 基因测序技术对微生物群落进行分析,探究微生物种群的物种多样性.使用场发射扫描电子显微镜 GeminiSEM500-ZEISS 对附着在膜表面的生物滤饼层进行形貌结构表征.

2 结果与讨论

2.1 进水浊度变化对膜通量的影响

如图 2(a)所示,启动阶段 4 组 GDM 进水均为低浊度原水,系统通量在 3d 内从 26.2L/(m²·h)迅速下降至 12.5L/(m²·h).在 4~23d,通量开始缓慢下降并维持稳定(8.5L/(m²·h)).这与文献报道一致^[6].第二阶段将实验组进水浊度提高.10NTU-GDM 系统的通量在 17d 内从 8.5 降至 7.2L/(m²·h)后保持稳定.50NTU-GDM 系统的通量在 22d 内从 8.6 降至 5.4L/(m²·h)后保持稳定.而 100NTU-GDM 系统的通量则需要 30d 才能保持稳定,并且通量下降幅度更大,从 8.6 降至 3.3L/(m²·h).与对照组 GDM 相比,10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统的稳定通量分别下降了 15%、36%和 61%.第 65d 时将进水浊度恢复至低浊水平,3 组 GDM 的通量均未明显回升.进水浊度阶段性升高会降低 GDM 系统的稳定通量,且随着浊度提高幅度的增加导致稳定通量更低、重新达到稳定通量的时间更长.

实验结束后,对不同 GDM 系统膜阻力构成进行分析,如图 2(b)所示.4 组 GDM 系统的滤饼层阻力(R_c)

均显著高于膜孔堵塞阻力(R_p)且进水浊度升高导致 R_c 显著增大,与对照组相比,10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 的 R_c 分别增加了 39%、106%和 276%.这表明进水浊度升高主要导致滤饼层阻力增加.

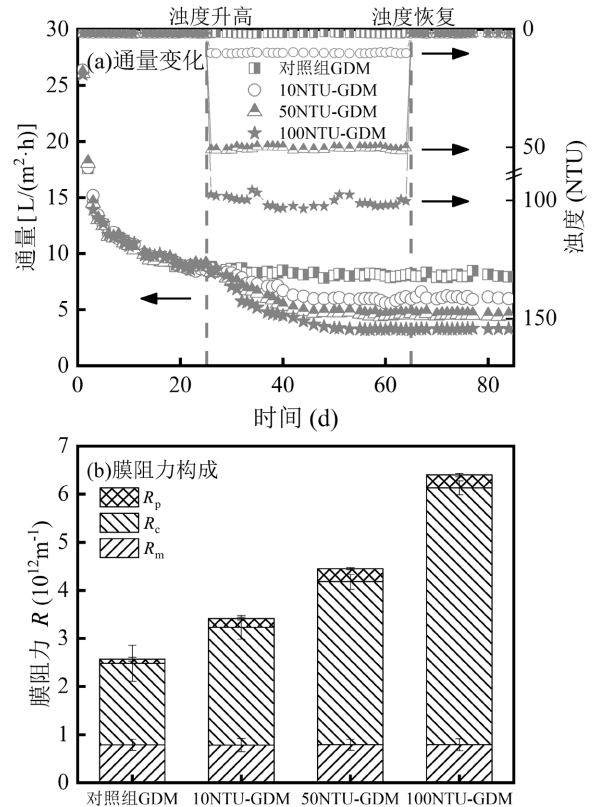


图 2 四组 GDM 系统的通量变化和实验结束时膜阻力构成
Fig.2 Flux development and membrane resistance distribution of GDM systems at the end of experiment

2.2 进水浊度变化对污染物去除的影响

2.2.1 溶解性有机物(DOM)的去除 由图 3 可以看出,4 组 GDM 出水的 DOC 均高于进水,且进水浊度越高,升高幅度越大;随着进水浊度升高,进水 UV₂₅₄ 也有所升高,但 4 组 GDM 进出水的 UV₂₅₄ 并无明显差异.研究表明,GDM 生物滤饼层中的微生物能将进水中大分子有机物分解为小于膜孔的小分子有机物,同时生物滤饼层中的微生物新陈代谢也会产生小于膜孔的有机物,因此 GDM 出水中 DOC 浓度会高于进水^[21-23].进水浊度升高时,颗粒物表面携带的大分子有机物也增加,微生物分解代谢后产生的小分子有机物随之增加,因此膜出水中 DOC 升高的幅度也有所增大.出水中 UV₂₅₄ 与进水相比没有明显增加说明微生物分解代谢产生的小

分子有机物主要是不具有紫外吸收特性的有机物. 荧光区域积分结果表明,GDM 进出水中均以区域 V 所代表的类富里酸和类腐殖酸类物质为主,且随着浊度升高而增加;GDM 出水的荧光体积积分值高于进水,这与 DOC 的趋势一致,区域 I 和区域IV代表的酪氨酸和可溶性微生物产物类物质在出水中含量都有上升^[24-25].

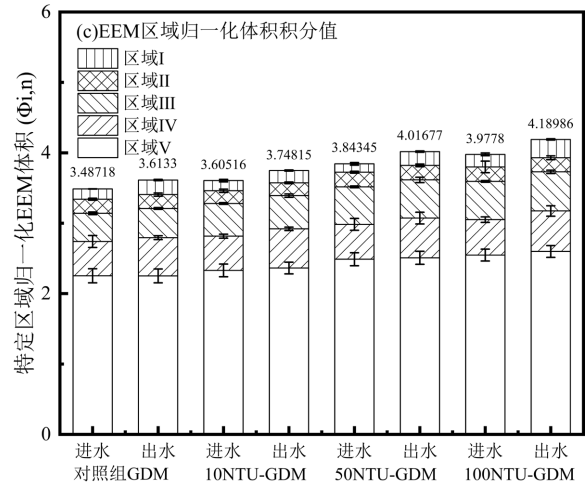
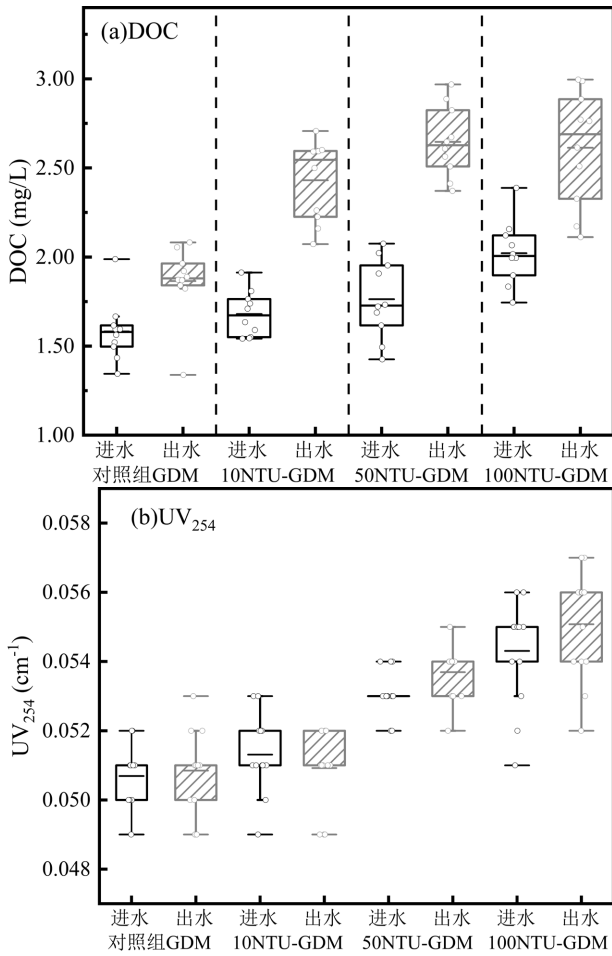
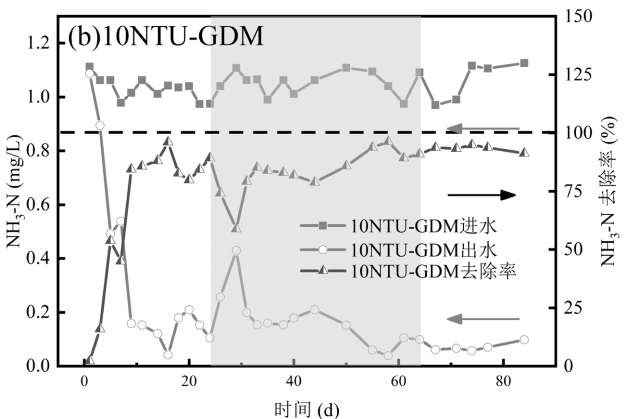
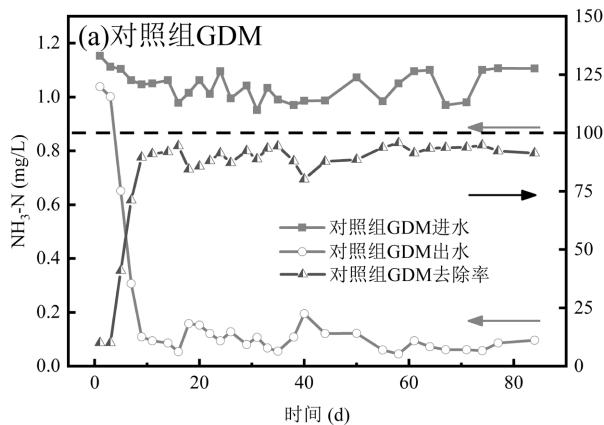


图 3 高浊阶段四组 GDM 进出水中 DOC, UV₂₅₄ 和 EEM 区域归一化体积积分值

Fig.3 DOC UV₂₅₄ and the volume integral normalized to the EEM region for different GDM systems during high-turbidity stage

2.2.2 氨氮的去除 如图 4 所示,GDM 系统开始运行初期,对氨氮去除率很低,随着生物滤饼层中硝化细菌的繁殖,氨氮的去除率逐渐增加^[25],第 5d 时出水中氨氮含量明显下降,第 9d 后稳定在(0.16 ± 0.06) mg/L,相应的氨氮去除率超过 80%.第 24d 进水浊度升高后,10NTU-GDM 系统氨氮去除率明显下降,但 7d 后恢复到原有水平.50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统变化趋势类似,但下降幅度更大、所需恢复时间更长,11d 左右去除率才恢复到 80%以上.这表明进水浊度突然升高会暂时抑制生物滤饼层中硝化细菌的活性,导致氨氮去除率下降,但经过一定的适应期后,硝化细菌的活性仍能恢复,最终保持良好的氨氮去除性能.



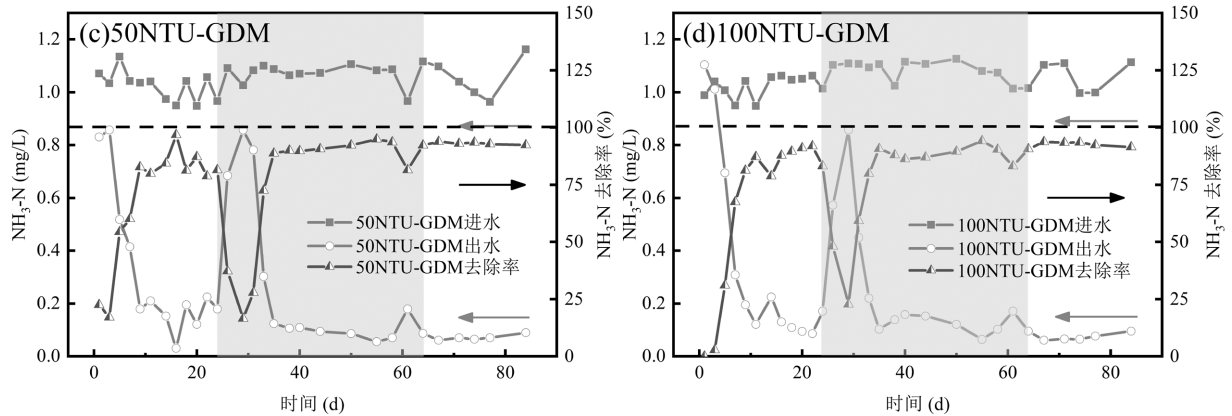


图4 GDM 系统进出水氨氮浓度及相应的氨氮去除率(阴影部分代表浊度升高阶段)

Fig.4 $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration and corresponding $\text{NH}_3\text{-N}$ removal rate in the influent and effluent of GDM (The shaded part indicates the high-turbidity stage)

2.3 阶段性浊度升高对生物滤饼层组成成分的影响

2.3.1 有机物与无机物分析 采用燃烧法对其有机物和无机物的含量进行分析.如图 5 所示, 10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统生物滤饼层中有机物含量分别为 6.37,7.07 和 7.92g/m²,相比于对照组 GDM 系统(5.84g/m²)分别升高 9.1%,20.4%和 35.6%.这应该是由于进水颗粒物上携带着有机物,进水浊度升高使生物滤饼层中有机物增加.无机物含量方面,10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统生物滤饼层中的无机物含量分别为 6.97,14.82 和 25.35g/m²,与对照组 GDM(4.34g/m²)相比,分别增加了 60.1%,241%和 484%.为分析高浊阶段增加的颗粒物被膜截留后的去向,测定了不同进水浊度对应的悬浮固体(SS)含量,结合累积过水体积计算可得,与对照组相比,进水浊度 10、50 和 100NTU 条件下被膜截留的 SS 分别增加 51.9,446.4 和 791.0mg,而对应的生物滤饼层质量分别增加 11.6,43.0 和 84.8mg,这说明高浊阶段增加的颗粒物仅有少部分积累在膜表面,大部分沉积到了膜池底部,实验过程中也确实观察到了膜池底部积累的泥,这可能是较高进水浊度下 GDM 仍能形成稳定通量的重要原因.

2.3.2 微生物特性 生物作用促使滤饼层形成松散的多孔结构,从而保持通量稳定^[26].因此,对生物滤饼层中 ATP 的浓度和细菌数量进行测定,以考察阶段性浊度升高对 GDM 系统内生物作用的影响(图 6).10NTU-GDM 系统生物滤饼层中的 ATP 含量为 0.14 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$,相较于对照组 GDM (0.15 $\mu\text{mol}/$

m²)略有降低,而 50NTU-GDM 系统和 100NTU-GDM 系统的总 ATP 浓度分别为 0.16 和 0.17 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$,相比于对照组 GDM 略有上升.因此,单独的 ATP 分析似乎难以解释阶段性的浊度增加对 GDM 生物作用的影响.

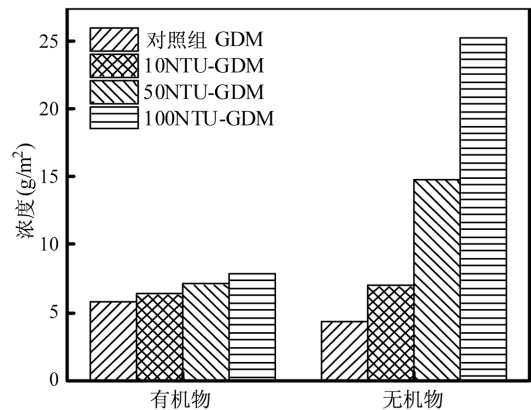


图5 实验结束时 GDM 生物饼层中有机和无机物的含量
Fig.5 Organic and inorganic matters in the bio-cake layer of different GDM systems at the end of the experiment

进一步对生物滤饼层中的细菌数进行了分析. 10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统细菌数分别为 0.74 $\times 10^{12}$,1.34 $\times 10^{12}$ 和 1.43 $\times 10^{12}$ cells/m²,比对照组 GDM(0.47 $\times 10^{12}$ cells/m²)增加了 57%,185%和 204%.这应该是由于高浊度进水中微生物含量也较高,被膜截留后不断积累.为了进一步揭示进水浊度改变升高对微生物活性的影响,将 ATP 总数与细菌数做比值,来反映单个细胞的生物活性.Bohme 等^[27]研究发现影响微生物活性的是原

生后动物的捕食作用.捕食作用会促进生物滤饼层中微生物的更新换代,提高生物活性.可以看到 10NTU-GDM 系统、50NTU-GDM 系统和 100NTU-GDM 系统的值分别为 0.19,0.13 和 0.12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$,比对照组 GDM(0.32 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$)降低了 41%、59%和 63%.相比对照组 GDM,其他 GDM 系统中的细胞活性随着浊度升高而显著降低.说明浊度升高会抑制原生后动物的捕食作用,进而降低了渗透膜通量.

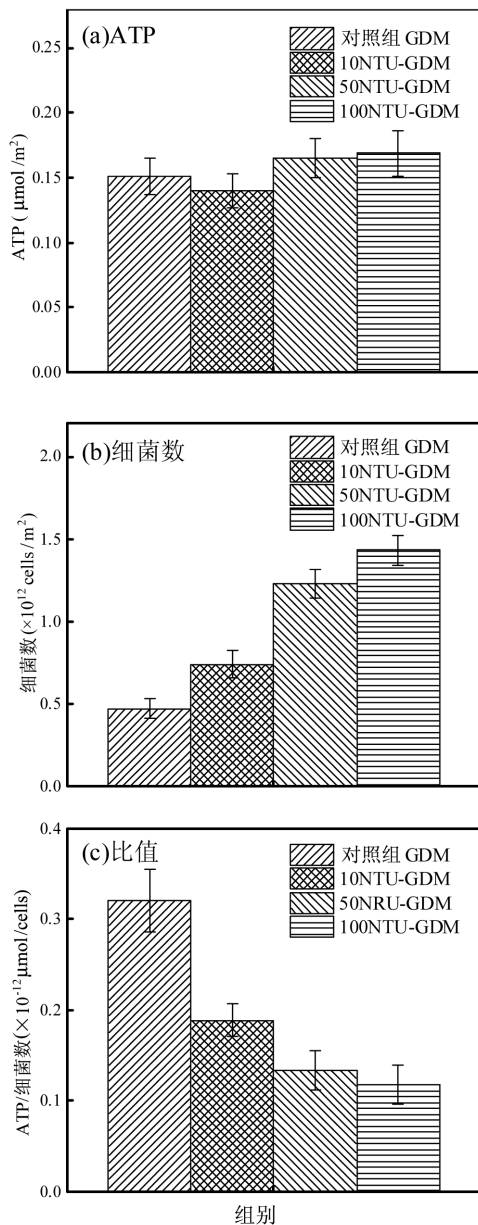


图 6 不同 GDM 系统生物滤饼层中 ATP 浓度,细菌总数和比值

Fig.6 ATP concentration, total bacterial counts and ratio in the bio-cake layer of different GDM systems

2.3.3 EPS 分析 EPS 具有粘性,容易与水中的金

属离子形成螯合物,从而堵塞膜孔,降低膜通量^[28-30].因此,分析不同 GDM 系统生物滤饼层中的 EPS 含量有助于明确通量下降的原因.实验结束后,对生物滤饼层中的 EPS(蛋白质和多糖)进行测定分析如图 7(a)所示.10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统生物滤饼层中的多糖含量分别为 4.24, 4.33 和 4.79 mg/m^2 ,比对照组 GDM 系统(3.49 mg/m^2)分别增加了 21%、24%和 37%.蛋白质含量分别为 0.71,0.89 和 1.03 mg/m^2 ,比对照组 GDM 系统(0.52 mg/m^2)分别增加了 37%、71%和 98%.相比对照组 GDM,其他 GDM 系统中多糖和蛋白质的浓度随浊度的提高而增加.实验结果进一步证实了阶段性浊度升高会增加生物滤饼层中 EPS 的含量,从而导致 EPS 对膜的污染加剧,降低稳定通量.

图 7(b)中,与对照组 GDM 系统相比,其他 GDM 系统中的 A、B 峰的峰值强度都有增强.同时,随着浊度增加,峰值强度也在逐渐增加,进一步验证了阶段性浊度升高会加重膜污染,降低稳定通量.

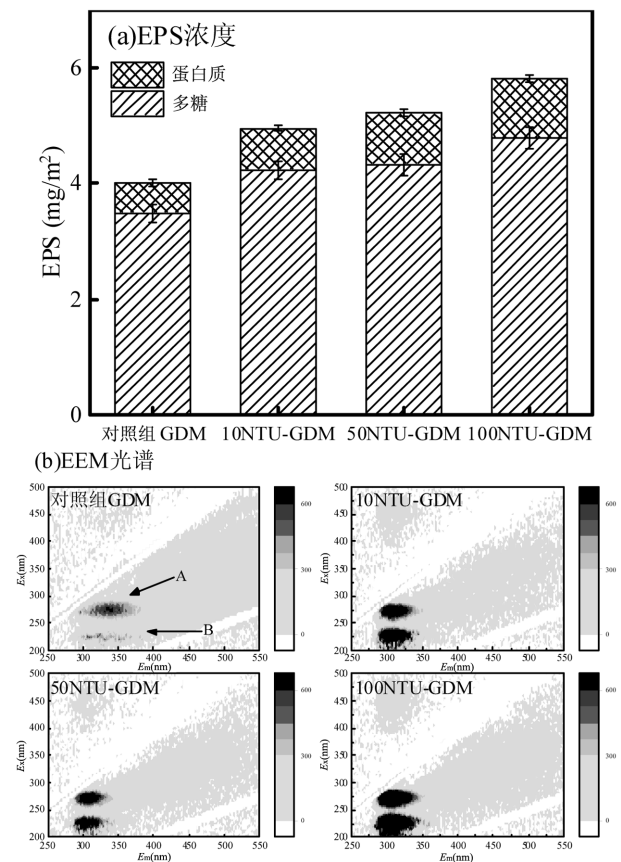


图 7 生物滤饼层中 EPS(蛋白质和多糖)浓度和 EEM 光谱
Fig.7 Concentration of EPS (proteins and polysaccharides) in the bio-cake layer and EEM spectra

2.4 微生物群落分析

由图 8(a)可以发现,生物滤饼层中的主要原核生物是变形菌门(*Proteobacteria*),它在 4 组 GDM 系统中的相对丰度都超过 40%. 研究表明, *Proteobacteria* 参与芳香族蛋白质类物质的水解和降解^[31]. 由于所有 GDM 系统中的 *Proteobacteria* 的相对丰度均较高,可将超滤膜截留的大分子有机物降解为小分子有机物,水解后的小分子有机物会透过超滤膜进入出水中,导致出水中的 DOC 浓度高于进水中 DOC 浓度. Ramirez 等^[32]研究发现,当体系中氨氮浓度升高时,会抑制酸杆菌门 (*Acidobacteriota*) 和疣微菌门 (*Verrucomicrobiota*) 的生长繁殖. 在对照组 GDM、10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统中 *Acidobacteriota* 的相对丰度分别为 23.1%、11.9%、9.8% 和 7.8%, *Verrucomicrobiota* 的相对丰度分别为 4.9%、2.8%、2.9% 和 1.2%. 在浊度升高的 3 组 GDM 中, *Acidobacteriota* 和 *Verrucomicrobiota* 的相对丰度逐渐降低. 可认为是进水浊度提高时, GDM 系统中氨氮去除速率降低,造成体系中氨氮含量增加,抑制了 *Acidobacteriota* 和 *Verrucomicrobiota* 的生长繁殖.

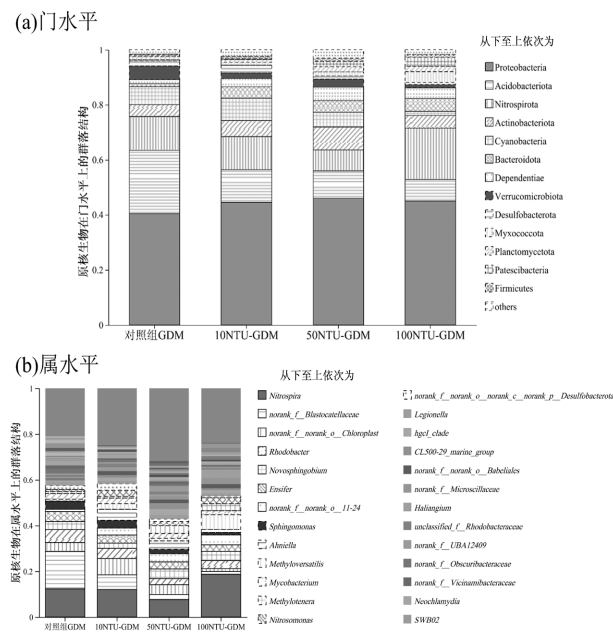


图 8 生物滤饼层中原核生物在门水平和属水平上的群落结构

Fig.8 Community structure of prokaryotes in the bio-cake layer at the phylum level and genus level

图 8(b)显示, *Nitrospira* 和 *norank_f_Blastocatellaceae* 在 4 组 GDM 系统中均占主导地位. *norank_f_Blastocatellaceae* 属于酸杆菌的一个新物种^[33]. 在 4 组 GDM 中 *norank_f_Blastocatellaceae* 的相对丰度随进水浊度升高而逐渐下降,这是因为氨氮浓度的提高会抑制其生长繁殖. 由于 4 个系统的结构基本相同,可推测细菌群落的显著差异是由阶段性浊度升高造成的. Pham 等^[34]的研究认为新鞘脂菌 (*Novosphingobium*) 会分泌胶状物质. 而在本研究中, *Novosphingobium* 的相对丰度在 4 种 GDM 系统中随着浊度升高而增加,进而可能会加剧膜污染,增加膜阻力,从而降低渗透通量.

2.5 进水浊度变化对生物滤饼层结构的影响

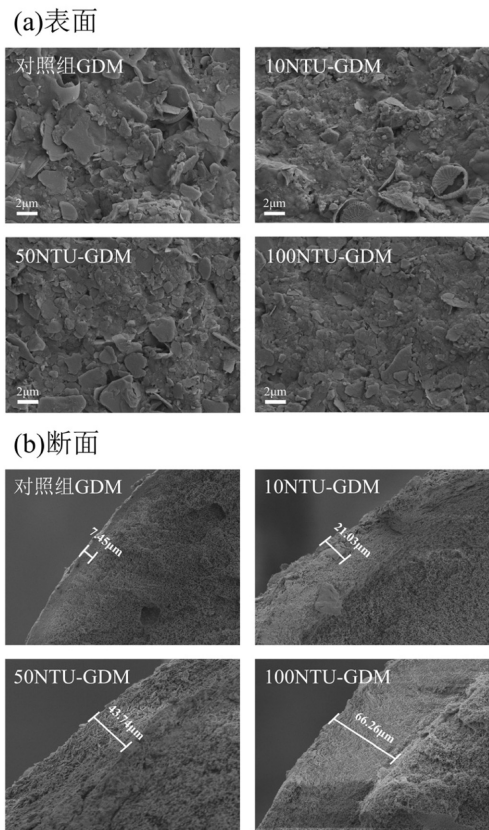


图 9 实验结束时生物滤饼层表面和断面的 SEM 图像
Fig.9 SEM image of the surface and cross section of the bio-cake layer at the end of the experiment

在较低运行压力条件下,膜表面逐渐形成的多孔异质生物滤饼层是维持 GDM 系统通量稳定的主要原因. 在 GDM 研究中, Peter-Varbanets 等^[35]发现稳定通量与生物滤饼层中疏松多孔的异质结构密切相关. 为了说明阶段性浊度升高对 GDM 稳定通量的

影响,实验结束后用 SEM 对 GDM 系统的生物滤饼层的表面和横截面进行表征.图 9(a)表明,对照组 GDM 系统的生物滤饼层具有更松散且异质的结构,其膜表面分布着更多更大的缝隙和孔洞,有利于水的通过.然而,随着浊度的升高,GDM 系统的生物滤饼层逐渐致密.如图 9(b)所示,分别对对照组 GDM、10NTU-GDM、50NTU-GDM 和 100NTU-GDM 系统的生物滤饼层横断面进行测定,厚度分别为 7.45、21.03、43.74 和 66.26 μm .随着进水浊度升高,累积在膜表面的物质增多而逐渐变厚.结合前述生物滤饼层组成成分分析可知,进水浊度升高会增加微生物数量但降低其活性,从而使 EPS 含量增加.因此,进水浊度升高致使生物滤饼层厚度及致密程度增加,最终导致稳定通量下降.

3 结论

3.1 原水浊度阶段性升高至 10、50 和 100NTU 使 GDM 通量明显下降,但经过一定时间(17~30d)后通量重新达到稳定,与始终低浊(1.8~3.7NTU)的 GDM 相比,原水浊度阶段性升高使 GDM 的稳定通量降低 15%~61%.

3.2 原水浊度升高导致出水中溶解性有机物增加,这是由于浊度物质携带的大分子有机物被生物滤饼层中微生物降解为小分子有机物后透过膜;进水浊度升高会暂时抑制生物滤饼层中硝化细菌的活性,导致氨氮去除率下降,但经过一定的适应期(7~11d)后,硝化菌的活性逐渐恢复,对氨氮的去除率仍保持在 80%以上.

3.3 原水浊度升高使生物滤饼层中细菌数量增加 57%~204%, EPS 增加 37%~98%,生物滤饼层厚度增加 1.8~7.9 倍,生物滤饼层厚度增加、致密程度增大是稳定通量降低的原因.

参考文献:

- [1] 黄康哲,薛睿康,侯毅,等.暴雨径流对峡谷型水库水质的影响[J]. 中国环境科学, 2024,44(11):6387-6396.
Huang K Z, Xue R K, Hou Y, et al. The influence of storm runoff on water quality of canyon reservoir [J]. China Environmental Science, 2024,44(11):6387-6396.
- [2] 吴子贤,陈浩东,李祝,等.澜沧江沉积物氨氧化及反硝化微生物丰度[J]. 中国环境科学, 2023,43(6):3107-3117.
Wu Z X, Chen H D, Li Z, et al. Abundance of aerobic ammonia-oxidizing and nir S type denitrifying microorganisms in sediments of Lancang River [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):3107-3117.
- [3] 吴志玲,徐培嘉,陈洪斌.混凝/微滤工艺用于青草沙水源水厂的生产废水回用研究[J]. 中国环境科学, 2014,34(3):623-629.
Wu Z L, Xu P J, Chen H B, et al. Production wastewater reuse in waterworks using Qingcaosha raw water by the coagulation/MF process [J]. China Environmental Science, 2014,34(3):623-629.
- [4] Du P, Li X, Yang Y, et al. Regulated-biofilms enhance the permeate flux and quality of gravity-driven membrane (GDM) by in situ coagulation combined with activated alumina filtration [J]. Water Research, 2022,209:117947.
- [5] Guo X, Jiang S, Wang Y, et al. Effects of pre-treatments on the filtration performance of ultra-low pressure gravity-driven membrane in treating the secondary effluent: Flux stabilization and removal improvement [J]. Separation and Purification Technology, 2022,303:122122.
- [6] Lee S, Goh S, Suwarno S R, et al. Characterizing spatial distribution of fouling on flat-sheet membranes in a pilot-scale gravity-driven membrane reactor for seawater pretreatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021,44:102436.
- [7] Truttmann L, Su Y, Lee S, et al. Gravity-driven membrane (GDM) filtration of algae-polluted surface water [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020,36:101257.
- [8] Schumann P, Andrade J A O, Jekel M, et al. Packing granular activated carbon into a submerged gravity-driven flat sheet membrane module for decentralized water treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020,38:101517.
- [9] 何强,左庆扬,陈子惟,等.预沉积生物炭强化重力驱动超滤膜处理受污染地表水的效能研究[J]. 中国环境科学, 2023,43(3):1122-1130.
He Q, Zuo Q Y, Chen Z W, et al. Pre-deposition of biochar layer improves the performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration system for polluted surface water treatment [J]. China Environmental Science, 2023,43(3):1122-1130.
- [10] Yang Y, Deng W, Hu Y, et al. Gravity-driven high flux filtration behavior and microbial community of an integrated granular activated carbon and dynamic membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2022,825:153930.
- [11] Wang Y, Fortunato L, Jeong S, et al. Gravity-driven membrane system for secondary wastewater effluent treatment: Filtration performance and fouling characterization [J]. Separation and Purification Technology, 2017,184:26-33.
- [12] Ding A, Wang J L, Lin D C, et al. Effects of GAC layer on the performance of gravity-driven membrane filtration (GDM) system for rainwater recycling [J]. Chemosphere, 2018,191:253-261.
- [13] Du X, Xu J J, Mo Z Y, et al. The performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration for roofing rainwater reuse: Implications of roofing rainwater energy and rainwater purification [J]. Science of the Total Environment, 2019,697:134187.
- [14] Du X, Wang Z, Liu Y, et al. Gravity-driven membrane bioreactor coupled with electrochemical oxidation disinfection (GDMBR-EO) to treat roofing rainwater [J]. Chemical Engineering Journal, 2022,427:131714.

- [15] 周莉,冯胜,李忠玉,等.夏季太湖浊度分布特征及其在水-沉积物界面识别中的应用[J]. 中国环境科学, 2015,35(10):3108-3116.
Zhou L, Feng S, Li Z Y, et al. Characteristics of turbidity in summer in Lake Taihu and its application to the identification of water-sediment interface [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(10):3108-3016.
- [16] 布多,李明礼,许祖银,等.西藏拉萨河流域巴嘎雪湿地水化学特征[J]. 中国环境科学, 2016,36(3):793-797.
Bu D, Li M L, Xu Z Y, et al. Study on aquatic chemistry characteristics of Bagaxue wetland in Lhasa river basin, Tibet [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(3):793-797.
- [17] 花昱,王旭晨,苏宇亮.季节性高浊度原水的处理研究[J]. 供水技术, 2024,18(5):39-42.
Hua Y, Wang X C, Su Y L, et al. Research on the Treatment for Seasonal High Turbidity Raw Water [J]. *Water Technology*, 2024,18(5):39-42.
- [18] T/CUWA XXXXXX-2022 重力驱动型超滤给水处理技术规程(征求意见稿) [S]. <https://www.cuwa.org.cn/usr/uploads/2023/11/2960856665.pdf>.
T/CUMA XXXXXX-2022 Technical specification for gravity-driven ultrafiltration process in drinking water treatment. (Draft for comment) [S]. <https://www.cuwa.org.cn/usr/uploads/2023/11/2960856665.pdf>.
- [19] Li K, Xu W H, Han M, et al. Integration of iron-manganese co-oxide (FMO) with gravity-driven membrane (GDM) for efficient treatment of surface water containing manganese and ammonium [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022,282:119977.
- [20] Derlon N, Grutter A, Brandenberger F, et al. The composition and compression of biofilms developed on ultrafiltration membranes determine hydraulic biofilm resistance [J]. *Water Research*, 2016,102:63-72.
- [21] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003,37(24):5701-5710.
- [22] Akhondi E, Wu B, Sun S Y, et al. Gravity-driven membrane filtration as pretreatment for seawater reverse osmosis: Linking biofouling layer morphology with flux stabilization [J]. *Water Research*, 2015,70:158-173.
- [23] Ding A, Wang J L, Lin D C, et al. A low pressure gravity-driven membrane filtration (GDM) system for rainwater recycling: Flux stabilization and removal performance [J]. *Chemosphere*, 2017,172:21-28.
- [24] 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):3323-3333.
- [25] Wang Z, Wu Z, Tang S. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Research*, 2009,43(6):1533-1540.
- [26] Derlon N, Mimoso J, Klein T, et al. Presence of biofilms on ultrafiltration membrane surfaces increases the quality of permeate produced during ultra-low pressure gravity-driven membrane filtration [J]. *Water Research*, 2014,60:164-173.
- [27] Bohme A, Risse-Buhl U, Kusel K. Protists with different feeding modes change biofilm morphology [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009,69(2):158-169.
- [28] Wang W, Yan Y, Zhao Y, et al. Characterization of stratified EPS and their role in the initial adhesion of anammox consortia [J]. *Water Research*, 2020,169:115223.
- [29] Deng L, Guo W, Ngo H H, et al. Biofouling and control approaches in membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2016,22:656-665.
- [30] Meng F G, Zhang S Q, Oh Y, et al. Fouling in membrane bioreactors: An updated review [J]. *Water Research*, 2017,114:151-180.
- [31] Song W L, Lee L Y, You H, et al. Microbial community succession and its correlation with reactor performance in a sponge membrane bioreactor coupled with fiber-bundle anoxic bio-filter for treating saline mariculture wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2020,295:122284.
- [32] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes [J]. *Global Change Biology*, 2012,18(6):1918-1927.
- [33] Huber K J, Geppert A M, Gross U, et al. *Aridibacter nitratireducens* sp. nov., a member of the family Blastocatellaceae, class Blastocatellia, isolated from an African soil [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2017,67(11):4487-4493.
- [34] Pham D N, Clark L, Li M. Microplastics as hubs enriching antibiotic-resistant bacteria and pathogens in municipal activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2021,2:100014.
- [35] 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):3607-3616.

作者简介: 尉童(2000-),男,河南灵宝人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要研究方向为重力流超滤与纳滤膜制备.发表论文 1 篇. 18329707352@163.com.