



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202104151

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

蒋柱武, 杨龙斌, 李妍, 等. 新型生物膜-微絮凝滤池与高密度沉淀-纤维转盘过滤深度处理污水厂尾水效能对比[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2966-2975.

JIANG Zhuwu, YANG Longbin, LI Yan, et al. Comparative on the efficiency of novel biofilm-micro flocculation filter and high-density sedimentation-fiber carousel filtration for deep treatment of tail water from wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2966-2975.

新型生物膜-微絮凝滤池与高密度沉淀-纤维转盘过滤深度处理污水厂尾水效能对比

蒋柱武^{1,*}, 杨龙斌¹, 李妍¹, 裴炎炎¹, 焦澄远¹, 余海¹, 侯立安^{1,2}

1. 福建工程学院生态环境与城市建设学院, 福州 350118

2. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011

第一作者: 蒋柱武(1974—), 男, 博士, 教授。研究方向: 水污染控制与资源化。E-mail: 532881557@qq.com

*通信作者

摘要 为进一步去除污水厂二级处理出水中的氮、磷和悬浮污染物, 对比研究了一种新型生物膜-微絮凝滤池与高密度沉淀-纤维转盘过滤联用工艺(以下简称组合工艺)的深度处理性能。结果表明: 新型生物膜-微絮凝过滤的出水 TP 质量浓度 $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度 $\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、SS 质量浓度 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN 质量浓度 $\leq 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度 $\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水水质对受纳水体的环境影响小, 综合污染指数仅为 0.731, 远小于组合工艺的 2.734。此外, 新型生物膜-微絮凝滤池避免了频繁的反冲洗, 降低了反冲洗能耗, 水处理成本仅为 $0.207 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$, 比组合工艺低 $0.039 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

关键词 新型生物膜-微絮凝滤池; 高密度沉淀-纤维转盘过滤; 污水厂尾水; 对比实验

在我国南方地区污水厂碳源总量偏低的情况下, 采用全流程生物系统改造传统二级处理的方式对总氮和总磷削减的空间有限^[1], 难以达到日益严格的排放标准。在原处理工艺后增设合适的处理单元, 进一步去除污水厂二级处理出水中的氮、磷和悬浮物, 是目前污水深度处理面临的重要问题。采用常规的“混凝+沉淀+过滤”的物化处理工艺对磷和悬浮物(SS)有较好的去除效果, 但对进水 SS 质量浓度要求严格, 对硝酸盐氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)的去除效果不佳, 出水总氮(TN)难以达标^[2]; 生物滤池对 TN 和 SS 的去除效果较好, 但没有兼顾到磷的去除^[3], 导致深度处理的出水难以全面达到一级 A 标准。

本研究将二级处理出水的脱氮、除磷和去除 SS 融于一体, 通过降低滤层厚度和选用生物附着性能良好的轻质滤料, 研发设计了一种新型生物膜滤池设备。该生物膜滤池通过滤料表面所附着的生物膜进行反硝化作用来达到脱氮的目的^[4]。微絮凝过滤的特点是在滤池中投加多价金属离子盐, 从而将絮凝作用与沉淀过程集为一体^[5], 进行高效化学除磷。以生物膜脱氮技术融合微絮凝除磷工艺, 可同步去除二级处理出水中残留的 TN、总磷(TP)和 SS。本研究以福州某城镇污水处理

收稿日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878171); 福州市科技计划项目(2020-GX-19)

厂二级处理的出水为对象，在厂内搭设新型生物膜-微絮凝滤池，开展了生产性实验研究，对比研究了新型生物膜-微絮凝滤池与污水厂现有深度处理采用的组合工艺在污染物去除效果、反冲洗参数、处理成本和外排水对受纳水体的环境影响等，以期新型生物膜-微絮凝滤池的工程化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 污水厂现有处理工艺

所研究的污水处理厂现有处理工艺流程见图 1。高密度沉淀池通过在混合区投加混凝剂和絮凝剂，使药剂与原水充分混合，沉淀去除水中的正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)^[6]。纤维转盘滤池是近年来发展起来的一种表层过滤技术^[7]，由水平安装的转盘和中央给水管组成，滤池中采用的有机纤维毛滤布孔隙在 10 μm 以下，污水在重力压差的作用下截留悬浮固体物质，从外向内流经滤布，通过中空管收集过滤后的出水。

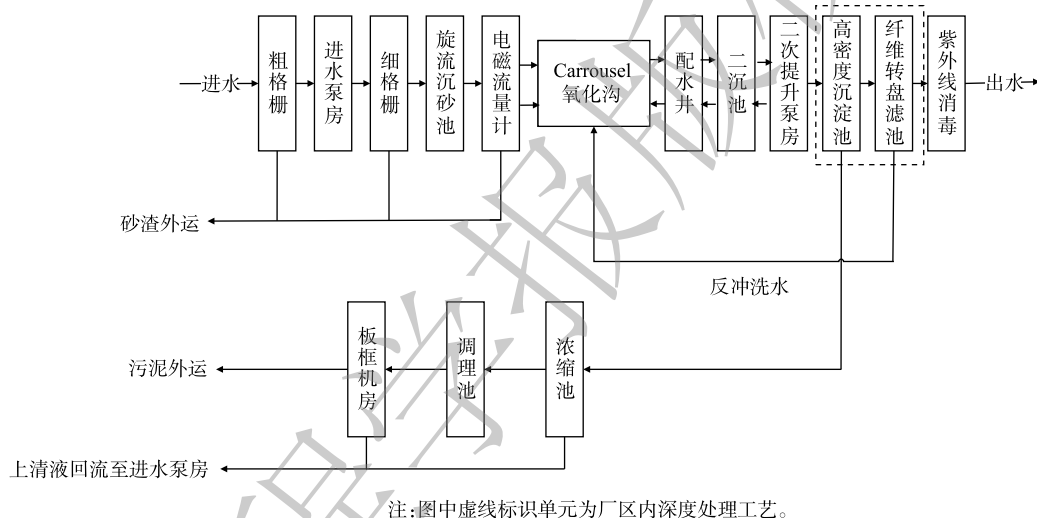


图 1 污水处理厂现有处理工艺流程

Fig. 1 Existing treatment process flow of sewage treatment plant

1.2 新型生物膜-微絮凝滤池装置

实验装置示意图见图 2，装置主体为反硝化生物膜滤池，附属设施包括碳源投加系统、除磷投药系统、反冲洗系统和自动控制系统。新型生物膜-微絮凝滤池为下向流，滤池长 2.2 m，宽 1.1 m，总高 5.0 m，自上而下分别为自由水层、工作层、承托层和配水层，高度分别为 1.0~1.5、1.0~1.5、0.3 和 0.2 m。日处理设计规模 120 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，水力停留时间 (HRT) 1.0~1.2 h。滤料层由工作层和承托层组成，工作层滤料采用圆形陶粒，粒径为 5~10 mm；承托层滤料为卵石，粒径为 30~50 mm。滤池的进水、出水、反冲洗及压缩空气通过可编程序逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 实现自动化

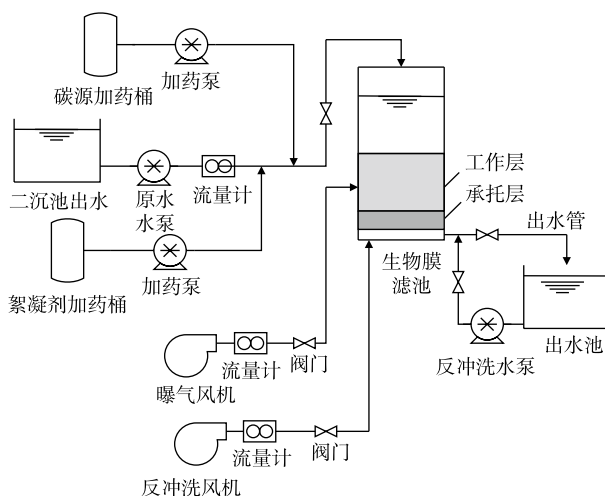


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

控制,可调节加药量、反冲洗强度、曝气量等运行参数。二沉池出水经提升泵由滤池顶部的配水堰进入滤池,经过浅层陶粒滤床的生物脱氮和微絮凝作用去除水中的TN、TP和SS。

1.3 实验水质与测试方法

福州某城镇污水处理厂二沉池出水的主要水质指标为:化学需氧量(COD) $12\sim 23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN质量浓度 $7.8\sim 15.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度 $6.6\sim 12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)质量浓度 $0.5\sim 2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP质量浓度 $0.19\sim 0.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度 $0.14\sim 0.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SS质量浓度 $14\sim 23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH为 $6.5\sim 7.3$, 水温 $19.5\sim 32.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验中COD值采用快速消解分光光度法测定, TN质量浓度采用碱性过硫酸钾分光光度法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度采用酚二磺酸分光光度法测定, $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度采用纳氏试剂分光光度法测定, TP质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定, 采集的水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后, 其滤液中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定, SS质量浓度采用重量法测定, pH值和水温采用便携式pH计测定。

1.4 新型生物膜滤池的启动

新型生物膜滤池的启动采用好氧池的活性污泥进行接种培养, 取100 L活性污泥, 将原水与污泥充分混合后注入滤池, 淹没最高处滤料水深达到0.5 m后, 打开底部曝气装置, 以曝气6 h静置6 h为1个周期, 持续2 d, 后放空滤池, 进行第2次挂膜, 重复上述操作。第5天开始逐渐增加负荷进行连续流培养, 碳源投加量由 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从运行第5天开始对进、出水中COD、TN、TP和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等指标进行监测, 经过15 d左右的连续培养后, 滤池成功启动。

1.5 对比实验

新型生物膜-微絮凝滤池与组合工艺2套系统在相同的进水情况下进行对比实验。新型生物膜-微絮凝滤池系统采用连续进出水模式运行, HRT为 $1.0\sim 1.2\text{ h}$, 聚合氯化铝(PAC)投加量为 $3\sim 6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 乙酸钠(CH_3COONa)投加量为 $25\sim 40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器内混合液的pH维持在 $6.7\sim 7.5$ 。组合工艺系统的PAC投加量为 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 聚丙烯酰胺(PAM)投加量为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

在取样口处每24 h采集1次样品, 分别测定新型生物膜-微絮凝滤池与组合工艺2套系统进出水中TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和SS质量浓度, 对2套处理工艺的污染物去除效果、反冲洗参数、处理成本和综合污染指数进行对比分析; 在保证TP和SS去除效果的基础上, 调整新型生物膜-微絮凝滤池的碳源投加量, 根据滤池出水中的TN和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度及相应指标的去除率, 确定生物膜滤池反硝化脱氮的最佳C/N; 通过捞网从新型生物膜-微絮凝滤池上部打捞滤池内的滤料样品以及在浓缩池中获取组合工艺排出的污泥, 利用宏基因组微生物分类测序技术探究2组工艺内微生物群落结构的差异。

1.6 宏基因组微生物分类测序

样品的预处理: 对于组合工艺中的污泥, 取新鲜的污泥放入灭菌过的50 mL离心管中, 在 $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心15 min, 舍弃上清液, 留下底部污泥, 分装至灭菌过的1.5 mL离心管中, 每份0.5~2 g, 放入 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 保温箱中冷冻保存。对于新型生物膜-微絮凝滤池中的滤料样品, 取5~10 g滤料置于装有磷酸缓冲盐溶液(PBS缓冲液)的锥形瓶中, 放入恒温振荡器中, 调节温度为 $10\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$, 在 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下振荡30~60 min, 使生物膜完全脱落, 将振荡后的液体经2层无菌纱布过滤掉大颗粒杂质, 吸取过滤后的液体用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的硝酸纤维素滤膜进行抽滤, 过滤后的滤膜放入事先灭菌过的50 mL离心管中保存, 液氮速冻15 min后, 转移至 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 保温箱中保存。样品预处理后统一寄至第3方检测机构代为测试。

测序中采用试剂盒(E.Z.N.ATM Mag-Bind Soil DNA Kit)提取所有样品的DNA, 在聚合酶链式反应(PCR)时采用试剂盒(Qubit3.0)确定反应时DNA的应加量, 对16S rDNA基因的V3~V4区域进行

PCR 扩增，引物的序列采用 341F (CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG(barcode)CCTACGGGNGGCW GCAG) 和 805R (GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGACTACHVGGGTATCTAATCC)。经 2 轮 PCR 扩增后将产物回收纯化，在 Illumina MiSeq 测序平台进行高通量测序。

1.7 综合污染指数评价模型

综合污染指数评价模型是我国环保部门普遍采用的水质评价模型^[8]，利用该模型计算得出的数值代表水体的综合污染程度，综合污染指数的数值越大，说明对受纳水体的污染程度越严重。水质单项污染指数根据式 (1) 计算，综合污染指数的数值是在单项污染指数的基础上计算得到的，其计算方法选择内梅罗污染指数 (式 (2))^[9]。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中： P_i 为水样第 i 项的单项污染指数； C_i 为水样第 i 项指标的实测质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； S_i 为水样第 i 项指标的标准质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

$$P = \sqrt{\frac{(P_{imax})^2 + (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)^2}{2}} \tag{2}$$

式中： P 为综合污染指数； P_{imax} 为水样中单项污染指数的最大值； n 为参与评价的污染物指标因子数。

2 结果与讨论

2.1 主要污染物去除效果对比

1) 总磷、正磷酸盐和悬浮物去除效果对比。新型生物膜-微絮凝滤池工艺与组合工艺对 TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果分别见图 3 和图 4。由图 3(a) 和图 4(a) 可知，在新型生物膜-微絮凝滤池中，随着 PAC 投加量的增加，TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率均是先升高后趋于平稳；当 PAC 投加量为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率可达到 $76.1\% \sim 86.7\%$ ，质量浓度为 $0.042 \sim 0.078 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；TP 去除率可达到 $73.0\% \sim 76.0\%$ ，质量浓度为 $0.084 \sim 0.094 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，低于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率增长趋势与 TP 保持一致，说明 TP 的去除率主要受 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率的影响。组合工艺的 PAC 投加量恒定为 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 3(b) 和图 4(b) 可知，组合工艺处理后出水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为 $0.046 \sim 0.098 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率约为 $65.1\% \sim 76.5\%$ ；TP 质量浓度为 $0.072 \sim 0.164 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率约为 $53.5\% \sim 68.3\%$ 。

二级处理后的尾水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度占 TP 的 80% 左右，单靠生物膜滤池内存在的生物同化除

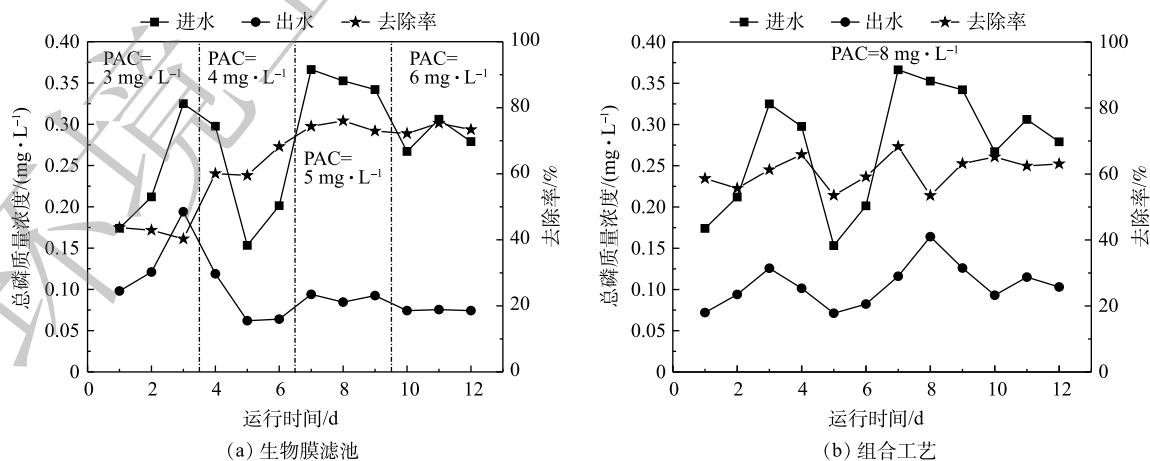


图 3 生物膜滤池及组合工艺对 TP 的去除效果

Fig. 3 Effect of biofilm filter and combined process on TP removal

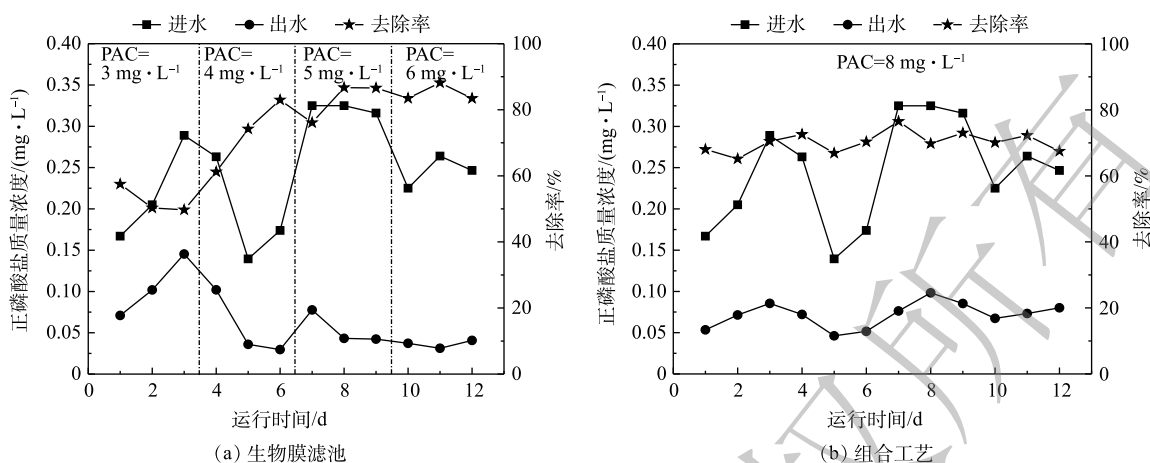


图4 生物膜滤池及组合工艺对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果

Fig. 4 Effect of biofilm filter and combined process on $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal

磷^[10], 去除率仅为19%~21%。通过外加少量的除磷药剂构成生物/化学协同除磷, 将大幅度提高处理效果。当PAC投加量为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 新型生物膜-微絮凝滤池中生物/化学协同除磷效果最为显著, TP去除率达到76.0%, 出水质量浓度 $<0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率达到86.7%, 出水质量浓度 $<0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 对比单靠化学除磷的组合工艺, TP的去除率为53.5%~65.9%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率为69.8%~72.6%, 可见生物/化学协同除磷对TP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果明显高于组合工艺单纯的化学除磷作用, 在保证TP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果的基础上, 生物/化学协同除磷的PAC加药量少于组合工艺的除磷加药量。

对比新型生物膜-微絮凝滤池工艺与组合工艺对SS的去除情况, 结果见图5。由图5可知, 进水SS质量浓度为 $14\sim 23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 新型生物膜-微絮凝滤池的出水SS质量浓度为 $5\sim 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 组合工艺的出水SS质量浓度为 $4\sim 7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经新型生物膜-微絮凝滤池处理后的出水澄清透明, 对SS处理效果良好, 与现有污水处理厂深度处理后出水中的SS质量浓度相近, 稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)^[11]的一级A($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的限值要求。

纤维转盘滤池虽然对SS有着较好的去除能力, 但要求进水中的SS质量浓度不宜过高^[12], 否则将引起纤维转盘滤池内水头损失的上升, 造成频繁的反冲洗。而新型生物膜-微絮凝滤池依靠陶粒过滤介质对悬浮物质进行截留, 由于陶粒滤料孔隙率高达50%~55%, 截污能力强, 大幅延长了滤池反冲洗周期, 对进水悬浮物的冲击负荷适应能力较强。

2) 总氮、硝态氮去除效果对比。新型生物膜-微絮凝滤池工艺与组合工艺对TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除效果见图6。由图6(a)可知, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度约占TN质量浓度的66%~78%。随着C/N的提高, 生物膜-微絮凝滤池出水中TN和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的质量浓度逐渐降低, 当C/N达到5.34时, 出水TN质量浓度 $<2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度 $<0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当碳源供应充足时, 对于TN去除效果可达到80%, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率可达90%。在此基础上继续提高C/N, 过量的碳源并未能继续提高TN的去除率, TN平均去除率维持

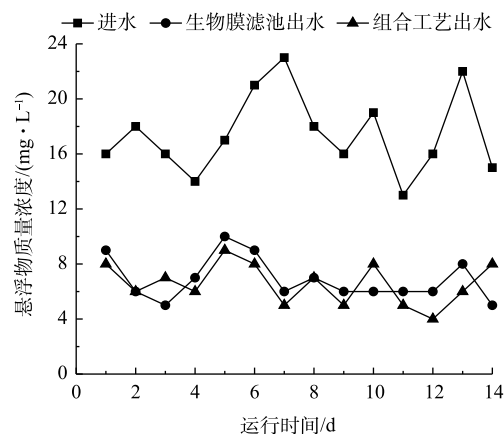


图5 生物膜滤池及组合工艺对SS的去除效果

Fig. 5 Effect of biofilm filter and combined process on SS removal

在 83% 左右。控制新型生物膜-微絮凝滤池中 C/N 为 5.3~5.4:1, 可使出水 TN 质量浓度降至 2 mg·L⁻¹, NO₃⁻-N 质量浓度降至 0.5 mg·L⁻¹。在保证 TP 和 SS 去除效果的基础上, 通过外加碳源即可实现 TN 的高效去除。而在组合工艺中缺乏生物脱氮的条件, 进水中的氮元素为可溶性的。由图 6(b) 可知, 组合工艺对 TN、NO₃⁻-N 基本没有去除效果。

采集进水 C/N=5.3~5.4:1 及 PAC 投加量为 5 mg·L⁻¹ 条件下生物膜-微絮凝滤池稳定运行期间的滤料样品以及浓缩池中组合工艺排出的污泥进行宏基因组微生物分类测序, 分析结果见图 7 和图 8。由图 7(a) 可知, 滤料表面微生物在门水平主要包括: 变形菌门 (*Proteobacteria*) 75.07%、拟杆菌

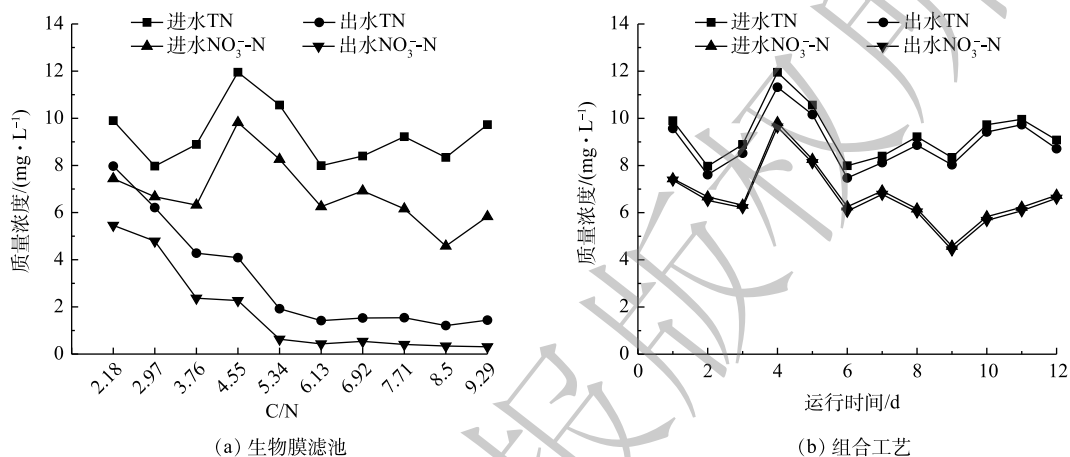


图 6 生物膜滤池及组合工艺对 TN、NO₃⁻-N 的去除效果

Fig. 6 Effect of biofilm filter and combined process on TN and NO₃⁻-N removal

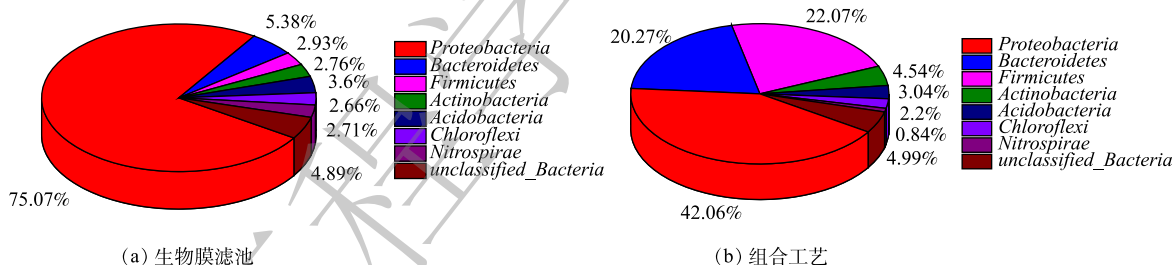


图 7 微生物群落门水平饼状图

Fig. 7 Microbial community analysis at phylum level

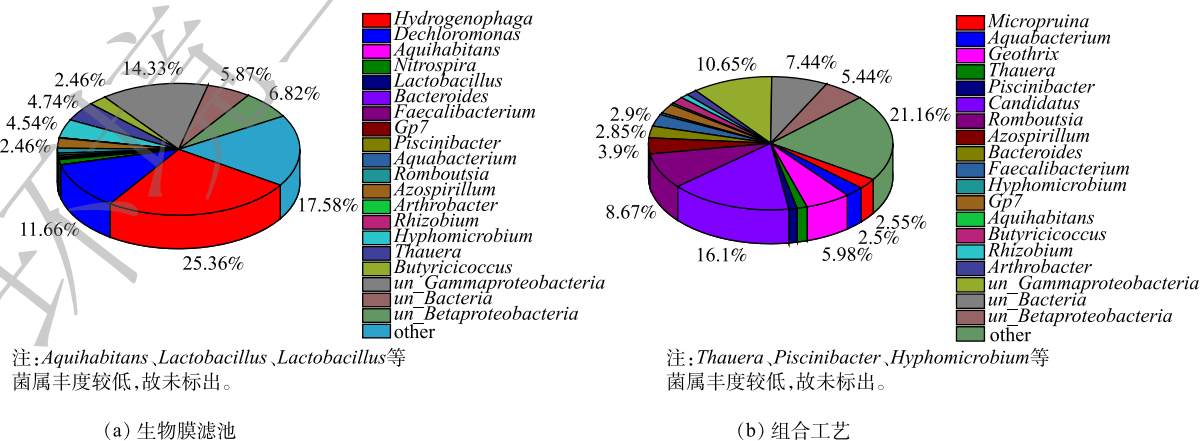


图 8 微生物群落属水平饼状图

Fig. 8 Microbial community analysis at genus level

门 (*Bacteroidetes*)5.38%、酸杆菌门 (*Acidobacteria*)3.60%、厚壁菌门 (*Firmicutes*)2.93%、放线菌门 (*Actinobacteria*)2.76%、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*)2.71%、绿弯菌门 (*Chloroflexi*)2.66%。由图 7(b)可知,组合工艺外排污泥中微生物在门水平主要包括变形菌门 (*Proteobacteria*)42.06%、厚壁菌门 (*Firmicutes*)22.07%、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*)20.27%、放线菌门 (*Actinobacteria*)4.54%、酸杆菌门 (*Acidobacteria*)3.04%、绿弯菌门 (*Chloroflexi*)2.20%。

由图 8(a)可知,滤料表面微生物在属水平主要包括噬氢菌属 (*Hydrogenophaga*)25.36%、脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*)11.66%、陶厄氏菌属 (*Thauera*)4.74%、生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*)4.54%、固氮螺菌属 (*Azospirillum*)2.46%、丁球菌属 (*Butyrivococcus*)2.46%。由图 8(b)可知,组合工艺外排污泥中微生物在属水平主要包括罗姆布茨菌属 (*Romboutsia*)8.67%、地发菌属 (*Geothrix*)5.98%、固氮螺菌属 (*Azospirillum*)3.90%、粪杆菌属 (*Faecalibacterium*)2.90%、拟杆菌属 (*Bacteroides*)2.85%。

从门水平分析,新型生物膜-微絮凝滤池中丰度最高的为变形菌门 (*Proteobacteria*),其次为拟杆菌门 (*Bacteroidetes*)和酸杆菌门 (*Acidobacteria*)。根据文献报道^[13],大多数硝化菌与反硝化菌归属于变形菌门,说明生物膜-微絮凝滤池内的缺氧环境适合变形菌的生长。从属水平分析,滤料表面微生物中的反硝化菌属主要包括 2 个优势菌属 (噬氢菌属 (*Hydrogenophaga*)^[14]、脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*)^[15])和 3 个非优势菌属 (陶厄氏菌属 (*Thauera*)^[16]、固氮螺菌属 (*Azospirillum*)^[17]、生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*)^[18]),这几类菌属均已被证实与反硝化作用密切相关。而在组合工艺外排的污泥中,所能检测到的硝化菌属与反硝化菌属丰度较低,因此,组合工艺中不具备生物脱氮的条件。

2.2 运行方式和成本对比

1) 反冲洗对比。图 9 为新型生物膜-微絮凝滤池反冲洗后出水污染物质量浓度随时间的变化。0 min 代表反冲洗刚结束的出水情况,此时出水水质最差;反冲洗后 0~20 min 内,污染物质量浓度逐渐下降,且在 40 min 时滤池恢复至稳定运行期的高效处理水平。其原因是:滤池为下向流,反冲洗作用是自下而上将滤池中的颗粒物质及老化脱落的生物膜排出滤池,对于滤池中上部的微生物群落影响较小,利于反冲洗后迅速恢复滤池的高效处理能力。反冲洗结束后 40 min 内,即可恢复至出水 TN 质量浓度 $<2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度 $<0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 TP 质量浓度 $<0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高效处理水平。

2 组工艺的反冲洗参数对比情况见表 1。新型生物膜-微絮凝滤池的反冲洗方式采用气冲-气水联合冲洗-水冲,冲洗时间分别为 2~4、4~6、5~8 min,反冲洗总时长约为 15 min。纤维转盘滤池在过滤过程中由于滤布上悬浮物质的积聚,过滤阻力增加,滤池内水位逐渐上升。反冲洗作用可使滤布恢复纳污容量,降低了滤布内外的压差。纤维转盘滤池反冲洗频率高,反冲洗后即可恢复处

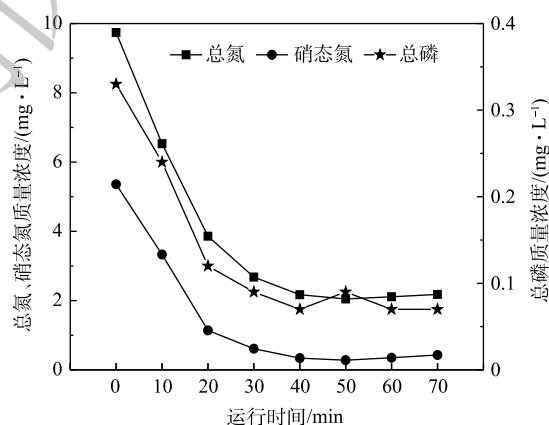


图 9 生物膜滤池反冲洗后污染物质量浓度随时间变化
Fig. 9 Change of pollutant mass concentration with time after backwashing of biofilm filter

表 1 2 组工艺反冲洗参数对比

Table 1 Comparison of backwash parameters of two sets of processes

工艺名称	气冲洗强度/(L·(s·m ²) ⁻¹)	水冲洗强度/(L·(s·m ²) ⁻¹)	反冲洗时间/min	反冲洗周期/h	单次反冲洗废水率/%
新型生物膜-微絮凝滤池	10~15	5~10	15	168	0.69~0.91
纤维转盘滤池	—	30~40	1~2	1~2	1.23~1.64

理能力。新型生物膜-微絮凝滤池与纤维转盘滤池相比，反冲洗周期长，反冲洗能耗低，单次反冲洗废水率低。

2) 处理成本对比。新型生物膜-微絮凝滤池协同脱氮除磷时 PAC 最适宜投加量为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，组合工艺中 PAC 和 PAM 的最适宜加药量分别为 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。新型生物膜-微絮凝滤池中 PAC 药剂费为 $0.009 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，外加乙酸钠作为碳源进行反硝化作用，乙酸钠费用为 $0.11 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，则总药剂费为 $0.119 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，电耗估计约为 $0.088 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，水处理费用约为 $0.207 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。组合工艺中 PAC 药剂费为 $0.014 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，PAM 药剂费为 $0.00108 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，总药剂费为 $0.016 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，电耗估计约 $0.230 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，水处理费用约为 $0.246 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

新型生物膜-微絮凝滤池在 PAC 投加量上要少于组合工艺，但生物膜滤池需要外加碳源来保障 TN 的去除，从而增加碳源投加的成本；在电耗方面，生物膜-微絮凝滤池仅需较低的电耗就能维持正常的运转；在处理费用上，新型生物膜-微絮凝滤池较组合工艺低 $0.039 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.3 外排水对受纳水体的环境影响对比

新型生物膜-微絮凝滤池与组合工艺的出水水质见表 2。单看表 2 的出水指标，虽然 2 组工艺处理后的出水均能达到一级 A 排放标准，但是污染程度存在差异，无法判断 2 组工艺出水对受纳水体的环境影响。为此，引入综合污染指数评价模型进一步深入分析，用于衡量 2 组工艺出水水质的污染程度，分析其对受纳水体的环境影响。

研究选取 5 项指标作为评价因子 (COD、SS、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)。对于式 (1) 中 S_i 的选取，参考《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)^[19] 中 V 类水体标准；COD、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 标准值分别为 40 、 2.0 、 0.4 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；对于 SS，《地表水环境质量标准》中没有明确要求，因此，SS 的标准值取自《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准中的 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据式 (1) 计算出不同水样的单项污染指数，得到新型生物膜-微絮凝滤池与组合工艺的 $P_{i\max}$ 分别为 0.9 和 3.7 ；将单项污染指数代入式 (2)，计算得到新型生物膜-微絮凝滤池与组合工艺的综合污染指数 P 分别为 0.731 和 2.734 ；将计算得到的 2 组工艺的综合污染指数与综合污染指标评价分级^[20] 进行比较，确定外排水的污染分级 (表 3)。

依据表 3 进行综合污染指标评价分级，新型生物膜-微絮凝滤池工艺处理后的出水属于合格级别，各项水质指标能达到相应的功能标准。虽然组合工艺出水的各项指标均在一级 A 的标准范围内，但组合工艺出水中 TN 质量浓度高于《地表水环境质量标准》中 V 类水体 TN 标准值的数倍，导致最终计算得到的综合污染指数 >2.0 ，其外排水对受纳水体存在严重污染。

3 结论

1) 新型生物膜-微絮凝过滤的出水 TP 质量浓度 $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度 $\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TP 去除率达到 76.0% ， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率达到 86.7% ，处理效果优于组合工艺，PAC 投加量少

表 2 2 组工艺处理后的出水水质
Table 2 Effluent water quality after two sets of processes treatment $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

工艺名称	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	SS
新型生物膜-微絮凝滤池	17~22	1.6~2.2	0.05~0.1	0.5~0.8	5~8
组合工艺	14~18	7.2~8.5	0.1~0.2	1.2~1.8	4~7

表 3 综合污染指标评价分级
Table 3 Comprehensive pollution index evaluation classification

P	级别	水质现状阐述
$P < 0.8$	合格	各项指标基本符合标准
$0.8 \leq P \leq 1.0$	基本合格	少数指标超过标准
$1.0 < P \leq 2.0$	污染	多项指标超过标准
$P > 2.0$	重度污染	部分项目指标超过标准限值数倍

于组合工艺。在保障 TP 和 SS 去除效果的基础上,通过外加碳源实现对 TN 的高效去除, TN 去除率可达 80%,滤料表面微生物中反硝化菌属相对丰度可达到 48.76%。

2) 新型生物膜-微絮凝滤池采用浅层陶粒滤床,陶粒滤料孔隙率高达 50%~55%,截污能力强,大幅延长了滤池反冲洗周期,对进水悬浮物的冲击负荷适应能力强。新型生物膜-微絮凝滤池工艺的处理成本仅为 0.207 元·m⁻³,较组合工艺低 0.039 元·m⁻³。

3) 新型生物膜-微絮凝过滤的出水水质对受纳水体的环境影响小,综合污染指数仅为 0.731,远小于组合工艺的 2.734。

参 考 文 献

- [1] 孙高升,王东东,弋凡,等.淮河流域地表水类Ⅳ类标准污水深度处理工艺研究[J].中国给水排水,2020,36(19):16-23.
- [2] ARNALDOS M, PAGILLA K. Effluent dissolved organic nitrogen and dissolved phosphorus removal by enhanced coagulation and microfiltration[J]. *Water Research*, 2010, 44(18): 5306-5315.
- [3] KIM Y, TANAKA K, LEE Y, et al. Development and application of kinetic model on biological anoxic/aerobic filter[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6): 990-1001.
- [4] JEONG J, HIDAKA T, TSUNO H, et al. Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal: biological filter for tertiary treatment[J]. *Water Research*, 2006, 40(6): 1127-1136.
- [5] MONICA B, EMELKO. Removal of viable and inactivated cryptosporidium by dual- and tri-media filtration[J]. *Water Research*, 2003, 37(12): 2998-3008.
- [6] 蒋富海,安鹏.高密度澄清池-滤布滤池在污水深度处理中的应用及控制[J].给水排水,2017,53(4):24-28.
- [7] 陈积义,邓小华.滤布滤池在污水深度处理工程中的试验研究[J].给水排水,2014,50(s1):65-68.
- [8] 孟洁,李伟芳,李佳音,等.天津市中心城区河流水质现状与成因分析[J].中国给水排水,2017,33(17):68-72.
- [9] 赵杰,罗志军,赵越,等.环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J].环境科学学报,2018,38(6):2475-2485.
- [10] 吴燕,安树林.废水除磷方法的现状与展望[J].天津工业大学学报,2001,20(1):74-78.
- [11] 国家环境保护总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918-2002[S].北京:中国环境出版社,2002.
- [12] 阳佳中,张学兵,孟广,等.转盘滤池在污水处理厂深度处理中的应用[J].给水排水,2012,48(2):38-40.
- [13] RAMIREZ R, SERRANO N, NAVARRO Y E, et al. 454 pyrosequencing-based characterization of the bacterial consortia in a well established nitrifying reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72(6): 990-997.
- [14] CHUNG B S, RYU S H, PARK M, et al. *Hydrogenophaga caeni* sp. nov., isolated from activated sludge[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, 57(5): 1126-1130.
- [15] ACHENBACH L A, MICHAELIDOU U, BRUCE R A, et al. *Dechloromonas agitata* gen. nov., sp. nov. and *dechlorosoma suillum* gen. nov., sp. nov., two novel environmentally dominant (per)chlorate-reducing bacteria and their phylogenetic position[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001, 51: 527-533.
- [16] SHINODA Y, SAKAI Y, UENISHI H, et al. Aerobic and anaerobic toluene degradation by a newly isolated denitrifying bacterium, *Thauera* sp. strain DNT-1[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(3): 1385-1392.
- [17] SOUMITRA P C, MICHAEL S, ANTON H, et al. Identification of diazotrophs in the culturable bacterial community associated with roots of *Lasiurus sindicus*, a perennial grass of thar desert[J]. *Microbial Ecology*, 2007, 54(1): 82-90.
- [18] BRAM S, DARIELA N, GERMAN A, et al. Inoculation and start-up of a biotricking filter removing dimethyl sulfide[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 113(2): 127-134.
- [19] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].北京:中国环境出版社,2002.

[20] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 185-190.

(责任编辑: 曲娜)

Comparative on the efficiency of novel biofilm-micro flocculation filter and high-density sedimentation-fiber carousel filtration for deep treatment of tail water from wastewater treatment plant

JIANG Zhuwu^{1,*}, YANG Longbin¹, LI Yan¹, PEI Yanyan¹, JIAO Chengyuan¹, YU Hai¹, HOU Lian^{1,2}

1. College of Eco-Environment & Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

2. Design and Research Institute of Secondary Artillery, Beijing 100011, China

*Corresponding author, E-mail: 532881557@qq.com

Abstract To further remove nitrogen, phosphorus, and suspended pollutants from the secondary treated effluent of a wastewater plant, the depth treatment performances of a novel biofilm-micro flocculation and high-density sedimentation-fiber carousel filtration process (hereafter referred to as the combined process) were comparatively studied. The result shows that the water quality of new biofilm-micro flocculation filtered effluent was following: TP mass concentration $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ mass concentration $\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SS mass concentration $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN mass concentration $\leq 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ mass concentration $\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The environmental impact of the effluent water quality on the receiving water body was small, and the comprehensive pollution index was only 0.731 and was much smaller than 2.734 of the combined process. Besides, the new biofilm-micro flocculation filter avoids frequent backwashing, reduces backwashing energy consumption, and the cost of water treatment was only $\text{RMB } 0.207\cdot\text{m}^{-3}$, which was $\text{RMB } 0.039\cdot\text{m}^{-3}$ lower than the combined process.

Keywords novel biofilm-micro flocculation filter; high-density sedimentation-fiber carousel filtration; tail water from wastewater treatment plant; comparative test