

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.019



# 曝气生物滤池预处理微污染水源水试验研究

蔡庆庆,高志伟,吴旭鹏,沈红池,毛林强,张文艺

(常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**针对饮用水源水中有机物、藻类及氮污染的问题,采用曝气生物滤池(BAF)处理微污染水源水,考察了不同水力负荷下BAF反应器对氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素a、MC-LR、UV<sub>254</sub>的去除效果。结果表明,当水力负荷为0.07 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,BAF上述污染物的平均去除率分别为74.71%、46.55%、81.8%、52.16%、67.99%、79.2%、34.8%,氨氮、总磷、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)最低出水浓度均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)II类水质要求。微生物镜检和高通量测序(454)分析表明,对于低碳源的微污染水源水,BAF滤料表面生物膜中的微生物群落极为丰富,运行初期(前2周)有6大门类17大种属,后期(3~4周后)增加到14大门类43大种属,还有线虫、草履虫、水蚤等原生动物;优势菌属有 *Sphaerotilus* (球衣菌属,2.41%~24.58%)、*Aeromonas* (气单胞属,4.16%~12.59%)、*Cloacibacterium* (黄杆菌属,1.85%~12.39%)、*Aquabacterium* (水杆菌属,1.53%~6.76%)、*Hydrogenophaga* (噬氢菌属,1.12%~5.9%)、*Methyloversatilis* (0.53%~1.52%)、*Rhodobacter* (红杆菌属,0.09%~1.39%)等。BAF对微污染水源水中的有机物及含氮污染物的降解以微生物降解为主,此外,还有沸石滤料的物理过滤、吸附和离子交换作用,表现出对氮、磷、藻类(叶绿素a)等污染物较高的同步去除率。

**关键词:**水源水;曝气生物滤池;生物预处理;微污染

中图分类号:X524;X703.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2018)05-0147-08

## Experimental analysis on treatment of micro polluted source water with biological aerated filter

Cai Qingqing, Gao Zhiwei, Wu Xupeng, Shen Hongchi, Mao Linqiang, Zhang Wenyi

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** This study aimed at the pollution problems of organic matter, algal and nitrogen pollution in drinking water sources, the biological aerated filter (BAF) was used to treat micro polluted source water. The removal effects of NH<sub>3</sub>-N, TN(total nitrogen), TP(total phosphorus), COD<sub>Mn</sub>, Chl-a, UV<sub>254</sub> under the different hydraulic load were examined. The results showed that the average removal rates of NH<sub>3</sub>-N, TN, TP, COD<sub>Mn</sub>, Chl-a, MC-LR and UV<sub>254</sub> were 74.71%, 46.55%, 81.8%, 52.16%, 67.99%, 79.2% and 34.8% respectively at the hydraulic loading of 0.07m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h). The minimum effluent concentration

收稿日期:2017-06-13

基金项目:国家自然科学基金(41571471);水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202—003)

作者简介:蔡庆庆(1991-),男,主要从事饮用水安全保障,E-mail:845523917@qq.com.

张文艺(通信作者),男,博士,教授,E-mail:zwy@cczu.edu.cn.

Received:2017-06-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 41571471); Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(No. 2017ZX07202-003)

Author brief: Cai Qingqing(1991-), main research interest: drinking water safety, E-mail: 1543598063 @qq.com.

Zhang Wenyi(corresponding author), PhD, professor, E-mail: zwy@cczu.edu.cn.

of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  met II class national standard of *Surface Water Environmental Quality Standards* (GB 3838-2002). The analysis of biological microscopy and high-throughput sequencing (454) showed that the microbial community on the biofilm of BAF was extremely rich in the micro-polluted source water of low carbon source. At the early stage (the first 2 weeks), the microflora on the biofilm had 17 major genera and 6 species. At the later stage (3 to 4 weeks later) the microflora increased to 43 major genera and 14 species. Protists such as nematodes, paramecium and daphnia, were also observed. The dominant species were *Sphaerotilus* (2.41%~24.58%), *Aeromonas* (4.16%~12.59%), *Cloacibacterium* (1.85%~12.39%), *Aquabacterium* (1.53%~6.76%), *Hydrogenophaga* (1.12%~5.9%), *Methyloversatilis* (0.53%~1.52%), *Rhodobacter* (0.09%~1.39%). Microbial degradation is mainly responsible for the treatment of organic matter and nitrogen pollution in drinking water sources by BAF. The physical filtration, adsorption and ion exchange of zeolite also play an important role in the treatment of organic matter and nitrogen pollution in drinking water sources. A high removal ratios for nitrogen, phosphorus and algae pollutants can be achieved in BAF. This study has certain theoretical significance and engineering application value for biological pretreatment of micro polluted source water.

**Keywords:** drinking water sources; biological aerated filter; biological pretreatment; micro-pollution

近年来,中国一些经济发达地区(如长三角、珠三角等地)饮用水源水污染问题日趋严重。据报道,城市污水排放导致全国超过 1/3 的河段遭到污染<sup>[1-3]</sup>。水源水污染主要表现在:水中氮污染较严重,氨氮、硝酸盐氮含量较高;水中细菌、病毒、藻类等微生物较多,微囊藻毒素(Microcystins,简称 MCs)超标严重;水中有机污染物、腐殖质等含量超标<sup>[4]</sup>。

对于微污染水源水的处理,20 世纪初混凝、沉淀、过滤等方法占有重要地位,但由于该类方法对有机物的去除能力有限,后来慢慢形成了吸附法<sup>[5]</sup>、膜分离法<sup>[6-8]</sup>、氧化法<sup>[10]</sup>等深度预处理方法。生物处理技术虽然投资及占地面积较大,但因具有对有机物、腐殖质、藻类及含氮污染物处理效果好、运行成本相对较低、毒副作用小等优点逐渐成为了微污染水源水预处理主流方法。

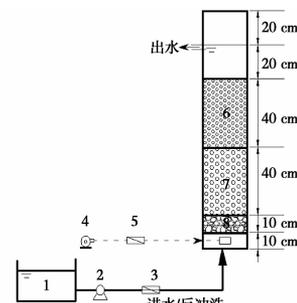
上向流曝气生物滤池(BAF)因同时具有普通滤池过滤及生物吸附降解的特点,近年来在微污染水处理领域应用较多<sup>[11-17]</sup>。张文艺等<sup>[18]</sup>曾采用 BAF 生物强化法处理重污染河水,其对高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、氨氮的平均去除率分别达到 87.3% 和 94.6%。笔者采用 BAF 工艺预处理微污染饮用水源水,考察其对有机物、藻类及含氮、磷污染物去除效果,并进行生物膜微生物群落结构分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

上向流单级 BAF 装置结构如图 1 所示,BAF 装置由 UPVC 管制成,有效高度为 1.2 m,总体积为 2.43 L。装置内填充物分为承托层和填料层 2 个部

分,其中,承托层高 10 cm,填充粒径 1~2 cm 的砾石;填料层高 80 cm,下层填充 40 cm 高的粒径 4~8 mm 的改性沸石,上层填充 40 cm 高的粒径 2~4 mm 改性沸石,孔隙率为 52%。进水装置包括进水箱、新道茨计量泵和流量计,微污染水源水通过进水装置由下端泵入 BAF 装置进行处理,出水经装置上端导管排出。曝气装置由空气泵、气体流量计和烧结砂芯曝气头构成,从下端均匀向上曝气。进水装置和曝气装置兼作为气水联合反冲洗装置。



注: 1.进水箱; 2.新道茨计量泵; 3.流量计; 4.气泵; 5.气体流量计; 6. 2~4 mm沸石填料层; 7. 4~8 mm沸石填料层; 8.承托层

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Flow diagram of down-flow BAF reactor

### 1.2 试验用水来源及水质

水样取自蓝藻爆发时的太湖湖水, pH 值为 7.07~8.56,其水质指标如表 1 所示。

表 1 试验水质指标

Table 1 Test water quality index ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

$\text{COD}_{\text{Mn}}$	氨氮	总氮 V	总磷	叶绿素 a	MC-LR
7.07~	3.18~	8.20~	0.37~	24.57~	2.89~
8.56	6.56	10.52	1.16	31.23	4.38

### 1.3 沸石改性方法

沸石改性方法参照文献[19]。

### 1.4 BAF的挂膜与启动

BAF试验装置的挂膜及气水联合反冲洗方法参照文献[20]。

运行:运行期间按水力负荷的递增分为0.07、0.11、0.22、0.37  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  4个阶段,反冲洗周期为7 d,反冲洗后稳定运行24 h,取水样进行水质分析。

### 1.5 水质分析方法

参照《水和废水监测分析方法》<sup>[21]</sup>中酸性高锰酸钾氧化法、碱性过硫酸钾消解分光光度法、钼酸铵分光光度法、纳氏试剂光度法测定水样高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总氮、总磷、氨氮指标。

### 1.6 总DNA提取与高通量测序方法

从BAF取填料置于锥形瓶中,加入蒸馏水后振荡2~3 h,使填料表面及孔隙中的生物膜脱落,然后收集生物膜。预处理后通过PowerBiofilm试剂盒提取总DNA,生物膜总DNA的PCR扩增及高通量测序送由上海天昊生物科技有限公司完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 BAF对高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )的去除分析

高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )反映了水受还原性物质的污染程度,是表征水中有机物相对含量的重要指标<sup>[22]</sup>。图2为不同水力负荷下 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除效果。由图2可知,随着水力负荷的增大,去除率有轻微下降。4个阶段的去除率分别为52.16%、46.16%、44.01%、39.36%,水力负荷对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率的影响不大。试验期间BAF进水平均浓度为9.48  $\text{mg}/\text{L}$

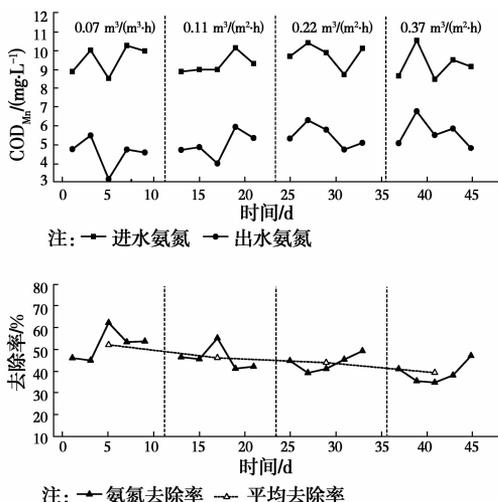


图2 水力负荷对高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )去除的影响  
Fig. 2 Effect of hydraulic loading on  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  removal

L,出水平均浓度为5.18  $\text{mg}/\text{L}$ 。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除主要依托附着在BAF生物膜上好氧异养菌的新陈代谢作用,实现对有机物的氧化、分解<sup>[23]</sup>,微生物对有机物的降解主要发生在靠近BAF进水端的位置,因为该区域有机负荷高、DO充足,有利于异养菌的大量繁殖<sup>[24]</sup>。

### 2.2 BAF对 $\text{UV}_{254}$ 的去除分析

相较于 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , $\text{UV}_{254}$ 主要反映的是水中天然存在的腐殖质类大分子有机物以及芳香族化合物,亦可表征细胞衰亡溶解后产生的细胞壁等惰性大分子物质<sup>[25]</sup>。图3为不同水力负荷下 $\text{UV}_{254}$ 去除效果。由图3可知,随着水力负荷的降低, $\text{UV}_{254}$ 去除率呈大幅上升趋势。当水力负荷为0.37  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,进水流速过快,水源水与沸石滤料接触反应时间较短,因此去除效果不明显,平均去除率仅为31.63%,而当水力负荷降低到0.11  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,BAF对 $\text{UV}_{254}$ 的去除率明显提高且趋于稳定,平均去除率达到86.64%,水力负荷成为了 $\text{UV}_{254}$ 去除效果的关键因素。

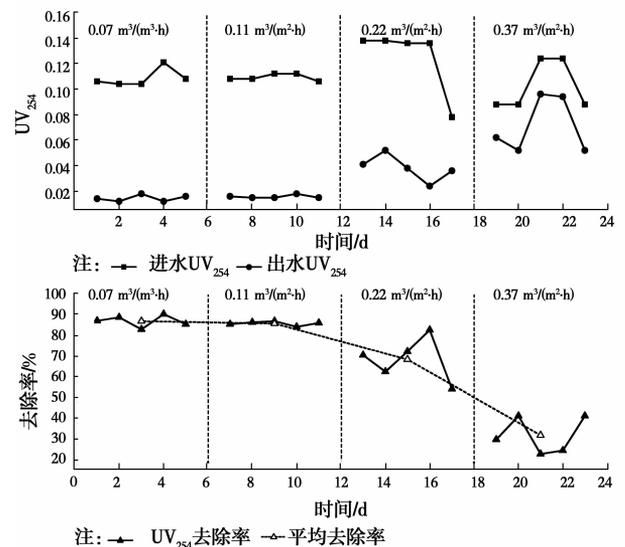


图3 水力负荷对 $\text{UV}_{254}$ 去除率的影响

Fig. 3 Effect of hydraulic loading on  $\text{UV}_{254}$  removal rate

### 2.3 BAF对MC-LR的去除分析

图4显示了BAF在不同水力负荷下对MC-LR(MCs有多种异构体,其中MC-LR分布最广,毒性最强)的去除效果。结果表明:在水力负荷分别为0.07、0.11、0.22、0.37  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的4个运行阶段内,MC-LR平均去除率分别为79.2%、48.25%、36.73%、22.6%。可以看出,随BAF运行水力负荷的上调,MC-LR的去除率急剧降低。当水力负荷为0.07  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,水力停留时间为6.13 h,水中污染物与生物膜接触时间较长,微生物能够接触氧

化 MC-LR,破坏其环状结构和 adda 基团的共轭双键,降低其毒性。因此,MC-LR 平均去除率达到 79.2%,出水 MC-LR 平均质量浓度降至 0.8 μg/L,满足《生活饮用水水质卫生规范》(GB 5749—2006)规定:饮用水源中 MC-LR 质量浓度不超过 1.0 μg/L,有效保障饮用水安全。而当水力负荷上调至 0.37 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,进水流速和有机污染负荷过大,冲刷生物膜致使微生物群落遭到破坏,水力停留时间仅为 1.11 h,水中污染物与沸石滤料接触时间短,形成的生物膜不够稳定,投加的菌种没有培养为优势菌种,致使 BAF 对 MC-LR 的平均去除率明显降低,仅为 22.6%。MC-LR 是一种七肽环状结构毒素,理化性质稳定难降解,需要高效稳定的生物膜以及足够的微生物接触氧化时间,因此,水力负荷是 BAF 去除 MC-LR 的关键调控因素。

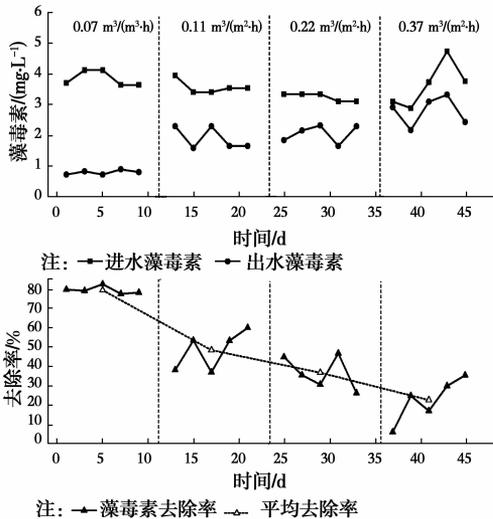


图 4 水力负荷对 MC-LR 降解率的影响

Fig. 4 Effect of hydraulic loading on MC-LR degradation rate

### 2.4 BAF 对叶绿素 a 的去除分析

叶绿素 a 主要来自于藻类细胞,是水源水富营养化程度的重要指标。BAF 控藻方式主要有 2 种:一是沸石物理截留;二是附着栖息在生物膜上的微生物(如细菌、真菌、原生动物等)的“溶藻”和“噬藻”作用。图 5 为不同水力负荷下叶绿素 a 去除效果。由图 5 可知,随着水力负荷的增大,叶绿素 a 去除率有小幅下降,水力负荷对叶绿素 a 去除效果影响较小。将水力负荷由 0.07 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)上调至 0.37 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),BAF 对叶绿素 a 的去除率在 34.8%~29.1% 的范围内,波动较小,去除效果较为平稳。BAF 装置运行期间进水中叶绿素 a 平均浓度为 27.65 mg/L,出水平均浓度降至 18.82 mg/L,平均去除率为 32.04%。

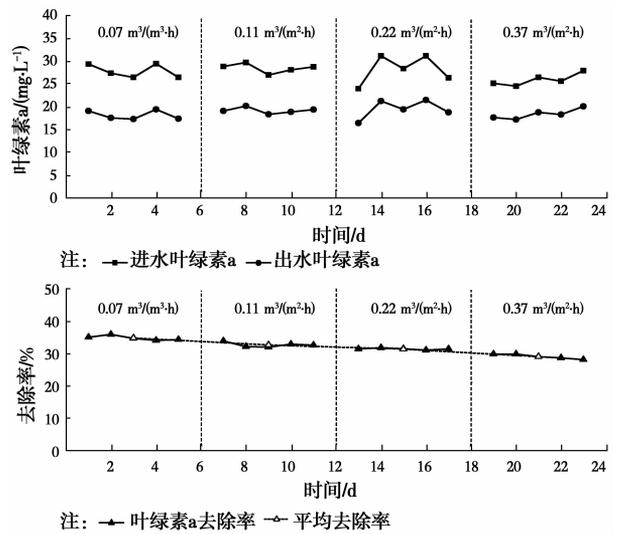


图 5 水力负荷对叶绿素 a 去除率的影响

Fig. 5 Effect of hydraulic loading on Chl-a removal rate

### 2.5 BAF 对氨氮的去除分析

水源水中氨氮主要以 NH<sub>3</sub> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 两种形式存在。BAF 对其去除机制主要表现在 3 个方面:1) 生物膜中某些微生物菌(如芽孢杆菌)通过新陈代谢作用将氨氮转化为自身细胞成分;2) 在硝化细菌的作用下转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>;3) 沸石填料离子交换作用和生物膜的物理吸附作用<sup>[26]</sup>。图 6 为不同水力负荷下氨氮去除效果。由图 6 可知,随着水力负荷的增大,去除率逐渐下降。水力负荷为 0.07~0.22 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,去除率平稳下降,从 93.57%下降至 74.48%;而当水力负荷提升至 0.37 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,去除率陡然下降至 47.95%,高水力负荷对氨氮去除率的影响较大。试验期间 BAF 进水平均浓度为 5.02 mg/L,出水平均浓度为 1.30 mg/L,平均去除率分别为 74.71%,最低浓度为 0.21 mg/L,达到

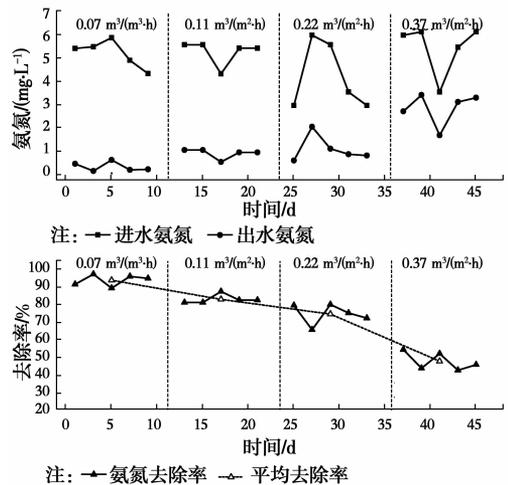


图 6 水力负荷对氨氮去除的影响

Fig. 6 Effect of hydraulic loading on NH<sub>3</sub>-N removal

了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质要求( $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ )。

### 2.6 BAF 对总氮的去除分析

图 7 为不同水力负荷下总氮去除效果。由图 7 可知,随着水力负荷的增大,去除率呈现轻微波动,但基本稳定在 45%左右,去除效果较为一般。试验期间 BAF 装置进水平均浓度为  $8.99 \text{ mg/L}$ ,出水平均浓度为  $4.85 \text{ mg/L}$ ,平均去除率 46.55%。总氮的去除是硝化和反硝化作用的共同结果,而试验针对的是微污染饮用水源水,有机负荷较低,生物膜厚度较小,氧气容易穿透,难以形成稳定缺氧微环境,不利于反硝化反应进行,不稳定的缺氧环境成为了总氮去除率不高的最主要原因<sup>[27]</sup>。

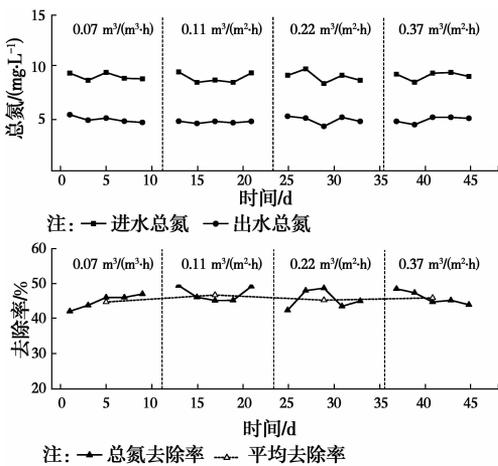


图 7 水力负荷对总氮去除的影响

Fig. 7 Effect of hydraulic loading on TN removal

### 2.7 BAF 对总磷的去除分析

图 8 为不同水力负荷下总磷去除效果。由图 8 可知,随着水力负荷的增大,去除率总体呈下降趋势。当水力负荷为  $0.07 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,平均去除

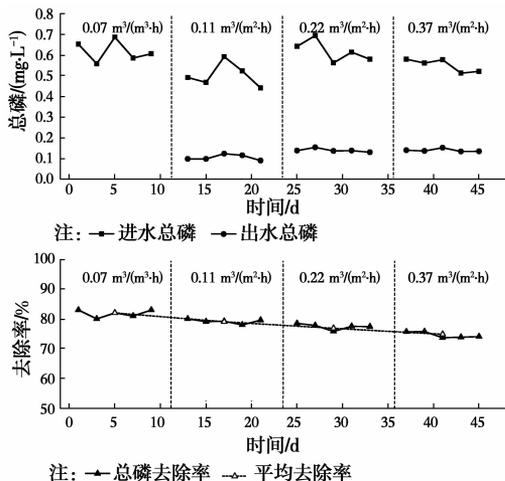


图 8 水力负荷对总磷去除的影响

Fig. 8 Effect of hydraulic loading on TP removal

率最高,为 81.8%;随着水力负荷的增大,去除率逐渐下降,当水力负荷为  $0.37 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,总磷去除率仅为 74.6%。水源水中的磷最常见的形态有磷酸盐( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ )、聚磷酸盐和有机磷。同总氮去除机制相同,试验中 BAF 反应器难以形成稳定的缺氧环境,去除率不高,难以保证 BAF 出水总磷低于  $0.1 \text{ mg/L}$ 。但通过高通量 454 显示,生物膜上存在黄杆菌、假单胞菌等具有好氧反硝化特性的菌属,因此,BAF 对微污染水源水中的氮磷具有一定的去除性能。

## 3 BAF 微生物群落特性分析

### 3.1 微生物镜检分析

采用生物倒置显微镜观察生物膜,由图 9 所示,生物膜上有原生生物线虫、草履虫、水蚤等,说明生物膜上微生物较为丰富,利于水中有机物污染的降解。线虫属寄生性,在污染水中独立生活,可同化微生物不易降解的固体有机物;草履虫属纤毛类,喜食细菌及有机颗粒,在污染水处理中竞争力较强;水蚤为微型甲壳类动物,以细菌和藻类为食料,可降解污染水中微囊藻。同时,镜检还发现生物膜上出现了团藻,团藻可通过自身新陈代谢作用,利用微污染水中的 N、P 进行生物代谢,实现微污染水中氮磷的去除。

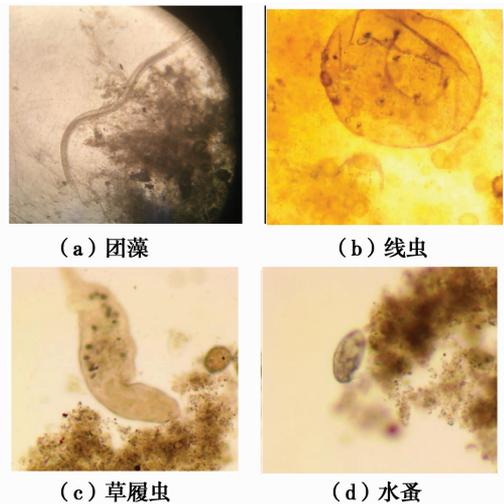


图 9 生物膜微生物镜检

Fig. 9 The examination of biological membrane microbial microscopic

### 3.2 微生物群落结构分析

BAF 反应器运行初期(前 2 周)与后期(3~4 周后)微生物群落在门分类水平上的分布见图 10。由图 10 可知,启动运行初期与后期 BAF 中微生物主要隶属于 6 个门,其中变形菌门

(*Beta* proteobacteria) 占优势, 所占比例均超过了 50%, 其他优势菌门分别为 *Bacteroidetes* (拟杆菌门, 24.37%~24.9%)、*Planctomycetia* (浮霉菌门, 0.18%~3.86%)、*Actinobacteria* (放线菌门, 0.08%~2.48%)、*Cytophagia* (绿弯菌门, 0.15%~1.86%)、*Flavobacteriia* (厚壁菌门, 1.4%~20.38%)。此外, BAF 运行后期新增螺旋体门、酸杆菌门、疣微菌门、广古菌门、装甲菌门、绿菌门等, 微生物群落在门水平上的组成分布与前人研究报道的结果一致<sup>[28-29]</sup>。

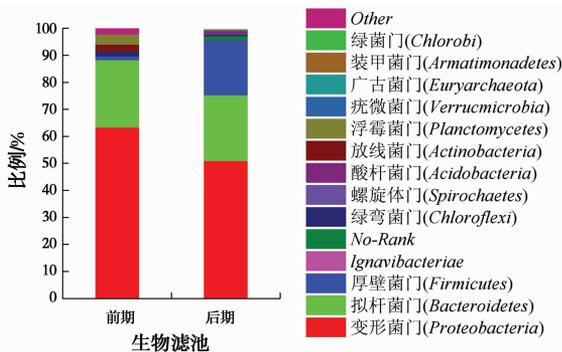


图 10 微生物群落结构组成分布(门水平)

Fig. 10 Bacterial community composition at phylum level

BAF 反应器运行初期(前 2 周)与后期(3~4 周后)微生物群落在属分类水平上的分布如图 11 所示。其中, 二者微生物群落中共有的优势菌属分别为 *Sphaerotilus* (球衣菌属, 2.41%~24.58%)、*Aeromonas* (气单胞属, 4.16%~12.59%)、*Cloacibacterium* (黄杆菌属, 1.85%~12.39%)、*Aquabacterium* (水杆菌属, 1.53%~6.76%)、*Hydrogenophaga* (噬氢菌属, 1.12%~5.9%)、*Methyloversatilis* (0.53%~1.52%)、*Rhodobacter* (红杆菌属, 0.09%~1.39%) 等。此外, BAF 运行后期出现了芽孢杆菌属、产黄菌属、不动细菌属、嗜酸菌属、丛毛单胞菌属、*Macellibacteroides*、假单胞菌属、密螺旋体属、玫瑰单胞菌属、假单胞菌属等优势菌属, 微生物多样性较初期更高<sup>[30]</sup>。

*Cloacibacterium* (黄杆菌) 属于拟杆菌门, 多为兼性厌氧细菌, 可以利用硝酸盐作为电子受体进行无氧呼吸, 即异化性硝酸盐还原作用, 说明滤池中存在着反硝化过程。假单胞菌属于  $\gamma$ -变形菌纲的假单胞菌科, 芽孢杆菌属于厚壁菌门的芽孢杆菌科, 二者均具有较强的好氧反硝化能力。*Rhodobacter* 属于  $\alpha$ -变形亚门的红杆菌科, 能以养殖水体中的多种有机物为碳源进行异养代谢反应, 从而起到降低水体生化耗氧量的作用<sup>[31]</sup>。*Methyloversatilis* 属于  $\beta$ -变形菌纲的嗜甲基菌属科, 为呼吸代谢好氧细菌, 利用铵

盐和硝酸盐作为生长氮源, 可以有效去除水体中的氨氮、总氮。

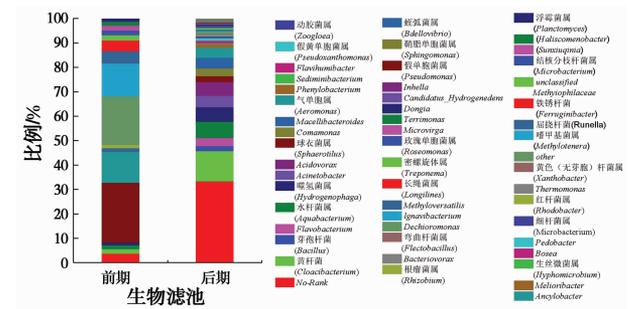


图 11 微生物群落结构组成分布(属水平)

Fig. 11 Bacterial community composition at genus level

### 4 结论

1) 以改性沸石为填料的上向流曝气生物滤池 (BAF) 处理微污染源水的最佳水力负荷为 0.07 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) 左右, 在此条件下, 氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>)、UV<sub>254</sub>、叶绿素 a、MC-LR 平均去除率分别为 74.71%、46.55%、81.8%、67.99%、52.16%、79.2%, 出水浓度分别为 1.3、4.85、0.12、5.18、0.035、18.82、0.8 mg/L, 氨氮、总磷、COD<sub>Mn</sub> 最低出水浓度均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质要求。

2) 微生物镜检和高通量测序表明, BAF 生物膜上微生物含量丰富, 有原生物(线虫、草履虫、水蚤)和藻类(团藻)等, 运行前 2 周生物膜上微生物涉及 6 大门类 17 大种属, 后期(3~4 周后)增加到 14 大门类 43 大种属, 其中变形菌门、拟杆菌门、放线菌门等占主要优势, *Cloacibacterium* (黄杆菌科)、*Rhodobacter* (红杆菌科)、*Methyloversatilis* (嗜甲基菌属)、芽孢杆菌和假单胞菌等在微污染源水净化中起主要作用。BAF 对微污染源水的去除以微生物降解为主, 兼有沸石滤料的过滤、物理吸附和离子交换作用, 表现出对氮、磷、藻类(叶绿素 a) 等污染物较高的同步去除率。

### 参考文献:

[1] RANDELOVIC A, ZHANG K F, JACIMOVIC N, et al. Stormwater biofilter treatment model (MPiRe) for selected micro-pollutants [J]. Water Research, 2016, 89(1): 180-191.

[2] 扈庆. 饮用水预处理技术探讨[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(12): 75-76.

HU Q. Discuss drinking water pretreatment techniques [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(12): 75-76. (in Chinese)

- [3] DA SILVA L F, BARBOSA A D, DE PAULA H M, et al. Treatment of paint manufacturing wastewater by coagulation/electrochemical methods: Proposals for disposal and/or reuse of treated water [J]. *Water Research*, 2016, 101(15): 467-475.
- [4] 田琳. 强化混凝—超滤工艺在微污染水源水处理中的应用研究[D]. 济南: 济南大学, 2014: 1-68.  
TIAN L. The application research of micro-polluted source water with enhanced coagulation-ultrafiltration technology [D]. Jinan: University of Jinan, 2014: 1-68. (in Chinese)
- [5] 邓小聪. 吸附作为预处理法去除微污染水源中镉的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013: 1-62.  
DENG X C. Removal of cadmium from micro-polluted source water by pretreatment of adsorption [D]. Changsha: Hunan University, 2013: 1-62. (in Chinese)
- [6] YU W Z, CAMPOS L C, GRAHAM N. Application of pulsed UV-irradiation and pre-coagulation to control ultrafiltration membrane fouling in the treatment of micro-polluted surface water [J]. *Water Research*, 2016, 107(15): 83-92.
- [7] DERLON N, GRÜTTER A, BRANDENBERGER F, et al. The composition and compression of biofilms developed on ultrafiltration membranes determine hydraulic biofilm resistance [J]. *Water Research*, 2016, 102(1): 63-72.
- [8] WINTER J, UHL W, BÉRUB P R. Integrated oxidation membrane filtration process-NOM rejection and membrane fouling [J]. *Water Research*, 2016, 104(1): 418-424.
- [9] 刘玲. 不同预处理方式对超滤膜深度处理印染废水效能影响的研究[J]. *工业用水与废水*, 2010, 41(4): 24-26.  
LIU L. Influences of pretreatment methods on advanced treatment of printing dyeing wastewater by UF membrane [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2010, 41(4): 24-26. (in Chinese)
- [10] 罗建中, 孙国胜. 微污染水处理技术进展[J]. *过滤与分离*, 2002, 12(3): 4-6.  
LUO J Z, SUN G S. Progress of micro-polluted water treatment technology [J]. *Filtration & Separation*, 2002, 12(3): 4-6. (in Chinese)
- [11] 李小琴. 沸石曝气生物滤池预处理微污染水源的试验研究[D]. 上海: 东华大学, 2009: 1-84.  
LI X Q. The study of pretreatment of micro-polluted source water by zeolite BAF [D]. Shanghai: Donghua University, 2009: 1-84. (in Chinese)
- [12] 张滢. 曝气生物滤池处理生活污水的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2008: 1-62.  
ZHANG Y. Research on applying biological aerated filter to treatment of domestic sewage [D]. Shanghai: Tongji University, 2008: 1-62. (in Chinese)
- [13] 金凌. 曝气生物滤池特性及其处理生活污水的试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010: 1-60.  
JIN L. Research on the characteristic of biological aerated filter and domestic sewage treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010: 1-60. (in Chinese)
- [14] SILVA T F C V, FONSECA A, SARAIVA I, et al. Biodegradability enhancement of a leachate after biological aeration using a solar driven photo-Fenton reaction, and further combination with an activated sludge biological process, at pre-industrial scale [J]. *Water Research*, 2016, 102(1): 63-72.
- [15] 黄瑞敏, 王欣, 林德贤, 等. 曝气生物滤池法处理工业用微污染水源水[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(6): 63-66.  
HUANG R M, WANG X, LIN D X, et al. Biological aerated filter for industrial micro-polluted source water [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2004, 32(6): 63-66. (in Chinese)
- [16] 李兴国. 曝气生物滤池处理微污染原水的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
LI X G. Research on treatment of micro-polluted source water by biological aerated filter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军. 曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2701-2708.  
PENG X L, LIU C, CHEN L J. Study on the nitrogen removal performance and the characteristics of denitrification bacterial community structure of biological aerated filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(8): 2701-2708. (in Chinese)
- [18] 张文艺, 翟建平, 李琴, 等. 曝气生物滤池生物强化法处理重污染河水[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(11): 1857-1864.  
ZHANG W Y, ZHAI J P, LI Q, et al. Treatment of high-contamination river water using bioaugmentation biological aerated filter (BAF) [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(11): 1857-1864. (in Chinese)
- [19] 刘通, 闫刚, 姚立荣, 等. 沸石的改性及其对水源水中氨氮去除的研究[J]. *水文地质工程地质*, 2011(2): 97-101.

- LIU T, YAN G, YAO L R, et al. Research on zeolite modification and its removal of ammonia-nitrogen in source water [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011(2): 97-101. (in Chinese)
- [20] 蔡庆庆, 吴旭鹏, 沈红池, 等. 菌剂强化曝气生物滤池预处理微囊藻毒素试验[J]. *环境化学*, 2017, 36(9): 2015-2024.
- CAI Q Q, WU X P, SHEN H C, et al. Degradation of microcystin-LR in drinking water source with biological aerated filter enhanced by bacteria agent [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(9): 2015-2024. (in Chinese)
- [21] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 244-279.  
National Environmental Protection Agency. *Water and wastewater monitoring and analysis methods* [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 244-279. (in Chinese)
- [22] 杨林. 曝气生物滤池去除微污染水源水中典型 PPCPs 的效能与机理 [D]. 上海: 东华大学, 2010.  
YANG L. Efficiency and mechanism on removing typical PPCPS in micro-polluted source water by biological aerated filter [D]. Shanghai: Donghua University, 2010. (in Chinese)
- [23] MICHAUD L, LO GIUDICE A, TROUSSELLIER M, et al. Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 107(6): 1935-1946.
- [24] 崔燕平, 姚秉华. SMF-MBR 工艺对 UV254 表征的有机污染物处理效果研究[J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(1): 40-45.  
CUI Y P, YAO B H. A study of removal efficiency of UV254 characterized organic pollutions with SMF-MBR process [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(1): 40-45. (in Chinese)
- [25] 蒋绍阶, 刘宗源. UV254 作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. *重庆建筑大学学报*, 2002, 24(2): 61-65.  
JIANG S J, LIU Z Y. The meaning of UV254 as an organic matter monitoring parameter in water supply & wastewater treatment [J]. *Journal of Chongqing Jianshu University*, 2002, 24(2): 61-65. (in Chinese)
- [26] 罗鑫. 下向流 BAF 工艺处理藻浆压滤液试验及微生物学特性研究[D]. 江苏 常州: 常州大学, 2012.  
LUO X. BAF for algae pulp filtrate treatment and the analysis of microbial characterisitic [D]. Changzhou, Jiangsu: Changzhou University, 2012. (in Chinese)
- [27] 张文艺, 罗鑫, 韩有法, 等. 下向流曝气生物滤池工艺处理藻浆压滤液特性及微生物种属分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(5): 55-61.  
ZHANG W Y, LUO X, HAN Y F, et al. Biological aerated filter for algae pulp filtrate treatment and the analysis of microbial species [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(5): 55-61. (in Chinese)
- [28] 张文艺, 陈雪珍, 陆丽巧, 等. BAF 反应器中好氧反硝化菌的分子鉴定及分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(1): 118-123.  
ZHANG W Y, CHEN X Z, LU L Q, et al. Molecular classification, identification and phylogenetic analysis of aerobic denitrifier N1 in the BAF reactor [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(1): 118-123. (in Chinese)
- [29] MICHAUD L, LO GIUDICE A, TROUSSELLIER M, et al. Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 107(6): 1935-1946.
- [30] SCHREIER H J, MIRZOYAN N, SAITO K. Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(3): 318-325.
- [31] 黄志涛, 宋协法, 李勋, 等. 基于高通量测序的石斑鱼循环水养殖生物滤池微生物群落分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 242-246  
HUANG Z T, SONG X F, LI X, et al. Analysis of microbial diversity of submerged biofilters in recirculating aquaculture system (RAS) for grouper (*Epinehelus moara*) based on high-throughput DNA sequencing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 242-246. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)