

# 铁碳微电解/BAF 预处理农村微污染原水

颜 勇<sup>1</sup>, 张佳男<sup>2</sup>, 林 涛<sup>2</sup>, 陶 辉<sup>2</sup>

(1. 江苏长江水务股份有限公司, 江苏 扬州 225000; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 研究了曝气生物滤池(BAF)单独运行以及铁碳微电解/BAF 组合工艺对微污染原水的预处理效果,并探讨了污染物去除机理。结果表明,与单独 BAF 工艺相比,组合工艺强化了对污染物的去除效果,尤其强化了对 COD<sub>Mn</sub> 的去除(去除率由 21.41% 提升至 42.29%)。有机物分级分析表明,铁碳微电解对微污染原水中的各组分有机物均有一定的去除效果,并且提高了可生化性,有利于后续 BAF 对有机物的进一步去除;高通量测序结果表明,与单独 BAF 工艺相比,组合工艺中的异养菌与硝化菌丰度均有所提升,从而提高了对有机物和氨氮的去除效果。

**关键词:** 农村微污染原水; 铁碳微电解; 曝气生物滤池

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0050-04

## Pretreatment of Micro-polluted Source Water in Rural Area by Combined Process of Iron – Carbon Micro-electrolysis and Biological Aerated Filter

YAN Yong<sup>1</sup>, ZHANG Jia-nan<sup>2</sup>, LIN Tao<sup>2</sup>, TAO Hui<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Changjiang Water Affairs Co. Ltd., Yangzhou 225000, China; 2. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The pretreatment effect of biological aerated filter (BAF) and a combined process of iron – carbon micro-electrolysis/BAF on micro-polluted source water was studied, and the mechanism of pollutant removal was discussed. The results showed that the combined process enhanced the removal effect of pollutants compared with the single BAF process, especially the removal of COD<sub>Mn</sub>, which increased from 21.41% to 42.29%. The classification analysis of organics showed that iron – carbon micro-electrolysis had a certain removal effect on all organic components, and improved the biodegradability of the source water, which was conducive to further removal of organics by subsequent BAF. The results of high-throughput sequencing indicated that the abundance of heterotrophic bacteria and nitrifying bacteria in the combined process was improved compared with the single BAF process, and thus the removal efficiency of organics and ammonia nitrogen was increased.

**Key words:** micro-polluted source water in rural area; iron – carbon micro-electrolysis; biological aerated filter

我国农村水源水受污染现象普遍,水体因受到农药化肥、腐殖质等污染,导致水中有机物与氨氮超标严重。近年来,曝气生物滤池(BAF)工艺被广泛

用于微污染水源水的预处理。清华大学王占生团队研究了 BAF 对不同农村地区微污染原水的预处理效果,发现 BAF 对氨氮的去除效率较高,并将 BAF

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51438006)

在农村给水厂进行了推广应用。然而,BAF 对有机物的去除效能有限,特别是对微污染原水中可生化性较差的有机物去除率较低。铁碳微电解法是利用 Fe/C 原电池反应原理进行水处理的工艺,具有高效的有机物去除效果、低廉的价格、使用寿命长、维护方便等优点,已被广泛应用于印染、炼油、制药等工业废水以及垃圾渗滤液的处理中。基于此,笔者依托重庆市某农村给水厂,针对有机物与氨氮超标的微污染原水,采用铁碳微电解 + BAF 组合工艺对其进行预处理,考察了组合工艺对污染物的去除效果,并探讨了去除机理,旨在为农村微污染原水的处理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

试验装置见图 1。铁碳微电解装置直径为 0.15 m、填料有效高度为 1 m;BAF 装置直径为 0.12 m,滤料有效高度为 1 m,上、中、下三层取样口距离滤料顶部的距离分别为 0.1、0.5、0.9 m。试验首先对两组 BAF 在相同条件下进行挂膜,挂膜成功后,其中一组在 BAF 前添加铁碳微电解工艺,并调节进水 pH 值至 3~4,另一组仍为 BAF 单独运行。

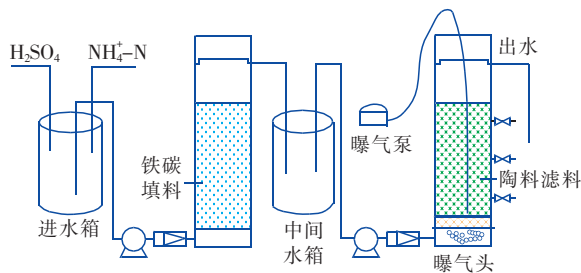


图 1 铁碳微电解/BAF 组合工艺流程

Fig. 1 Flow chart of combined process of iron-carbon micro-electrolysis and BAF

铁碳微电解装置的进水 pH 值为 3~4,进水流量为  $0.0277 \text{ m}^3/\text{h}$ ,进水负荷为  $2000 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,上升滤速为  $2 \text{ m}/\text{h}$ ,水力停留时间(HRT)为 30 min;反冲洗周期为 7 d,水冲洗强度为  $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、时间为 10 min。BAF 装置的进水 pH 值为 7~8,进水流量为  $0.0249 \text{ m}^3/\text{h}$ ,进水负荷为  $2211 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,上升滤速为  $2.2 \text{ m}/\text{h}$ ,HRT 为 27 min,气水比为 1:1;反冲洗周期为 7 d,先气冲洗 3 min、强度为  $12 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,再气水混合冲洗 4 min、气洗和水洗强度分别为 12 和  $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,最后水冲洗 8 min、强

度为  $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 1.2 试验用水水质与检测方法

试验用水为有机物与氨氮超标的微污染原水,试验期间水温为  $23.5^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.99、DO 浓度为  $7.3 \text{ mg}/\text{L}$ 、氨氮为  $1.62 \text{ mg}/\text{L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为  $8.2 \text{ mg}/\text{L}$ 、B/C 值为 0.11。

水温、pH 值、DO、浊度、氨氮、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  等常规指标均采用国家标准方法测定,有机物分子质量分布采用超滤膜法测定,有机物亲疏水性采用树脂吸附固相萃取方法测定,三维荧光光谱分析参照文献[1]进行,高通量测序参照文献[2]进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 曝气生物滤池的启动

试验采用自然挂膜方式启动曝气生物滤池。2017 年 3 月 19 日—4 月 4 日挂膜期间,进水温度为  $19.2 \sim 22.5^\circ\text{C}$ 、pH 值为  $7.98 \sim 9.12$ 、DO 浓度为  $5.8 \sim 11.9 \text{ mg}/\text{L}$ 。挂膜成功后,曝气生物滤池对氨氮和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率分别为 90%、20%。

### 2.2 对污染物的去除效果

试验装置稳定运行期间,单独 BAF 工艺对浊度的平均去除率为 71.51%,浊度的去除主要依靠陶粒滤料以及生物膜的截留作用。在铁碳微电解/BAF 组合工艺中,铁碳微电解装置的出水浊度高于进水,这是因为运行过程中有铁屑以及颗粒炭等杂质溶出而随水流出铁碳微电解装置;BAF 对浊度的平均去除率为 80.30%,高于单独 BAF 工艺对浊度的去除率。这是因为铁碳填料会溶出  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ ,这些离子经过一系列的化学反应生成胶体,强化了混凝作用,有助于浊度的去除<sup>[3]</sup>。组合工艺对浊度的平均去除率为 76.23%,高于单独 BAF 工艺对浊度的去除率,说明组合工艺强化了对浊度的去除。

单独 BAF 工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率为 90.95%,出水氨氮浓度在  $0.2 \text{ mg}/\text{L}$  以下,说明 BAF 对氨氮的去除效果较好。铁碳微电解/BAF 组合工艺对氨氮的去除效果见图 2。铁碳微电解进、出水氨氮浓度相当,且出水浓度略高于进水,这是因为铁碳滤料有部分含氮杂质溶出;BAF 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率为 93.31%,略高于单独 BAF 工艺,这是因为铁碳微电解增强了絮凝作用,这使得生物膜的截留能力有所提升,故 BAF 能够更多地吸附降解  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。组合工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率为 93.19%,略高于单独 BAF 工艺,说明组合工艺增强

了对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率。

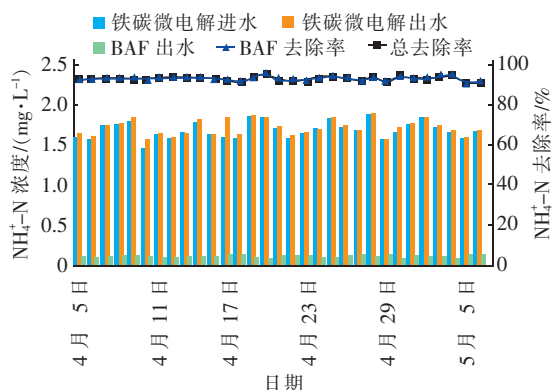


图2 铁碳微电解/BAF 组合工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

Fig. 2 Removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by combined process of iron-carbon micro-electrolysis and BAF

单独 BAF 对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 21.41%，这是陶粒滤料对颗粒物的截留以及生物膜降解共同作用的结果。组合工艺对有机物的去除效果如图 3 所示。

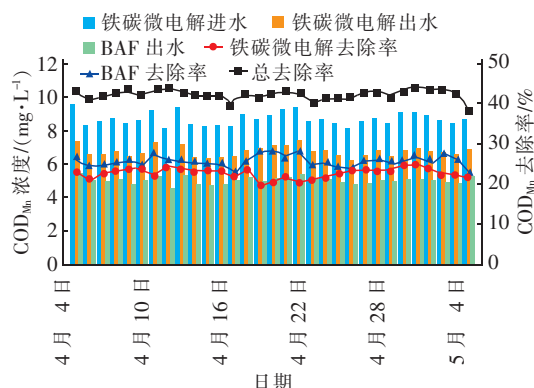


图3 铁碳微电解/BAF 组合工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果

Fig. 3 Removal of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  by combined process of iron-carbon micro-electrolysis and BAF

由图 3 可知,铁碳微电解对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 22.63%,这大大降低了后续处理单元的负荷。铁碳微电解主要依靠内电解产生的新生态  $\text{Fe}^{2+}$  和  $[\text{H}]$  对有机物进行降解去除<sup>[4]</sup>。值得注意的是,在组合工艺中 BAF 对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 25.40%,这高于单独 BAF 工艺,分析原因为,一方面,组合工艺中 BAF 对颗粒物的去除效果高于单独 BAF 工艺,故 BAF 对颗粒态有机物的去除效果得到提高;另一方面,铁碳微电解不仅自身对有机物的降解效果较好,其还可促进后续 BAF 对有机物的降解,铁

碳微电解出水含有的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  可以形成新生态  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,其吸附能力很强,在 BAF 中可以吸附去除水中悬浮物和部分不溶物,降低有机物溶度,且新生态  $\text{Fe}^{2+}$  以及  $[\text{H}]$  可以破坏大分子有机物基团,生成更易被生物降解的小分子有机物,可促进 BAF 中异养菌的生长,进而提高了  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率。总体来看,组合工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 42.29%,明显高于单独 BAF 工艺,说明组合工艺对去除  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  具有显著的提升效果。

## 2.3 对污染物的去除机理

### 2.3.1 有机物分级分析

为了揭示组合工艺对有机物的去除机理,对进出水有机物进行了亲疏水性和三维荧光分析。结果表明,单独 BAF 工艺对强疏水性、弱疏水性、亲水性有机物的去除率分别为 41.7%、31.6%、5.9%,可知 BAF 对疏水性有机物的去除效果较好,对亲水性有机物的去除效果较差。组合工艺中铁碳微电解对强疏水性、弱疏水性、亲水性有机物的去除率分别为 45.7%、53.0%、2.7%,表明铁碳微电解同样对疏水性有机物有较好的去除效果,对亲水性有机物的去除有限,这可能是因为在铁碳微电解反应过程中更容易打破疏水性有机物的官能团;BAF 对强疏水性、弱疏水性、亲水性有机物的去除率分别为 31.7%、62.2%、31.9%,可见 BAF 在进水疏水性有机物浓度大幅降低的情况下,对疏水性有机物依然维持较高的去除率,另外,BAF 对亲水性有机物的去除率高达 31.9%,这一方面是因为铁碳微电解提高了原水的可生化性,另一方面可能是因为 BAF 生物膜中异养菌群的数量与种类增多,提高了对有机物的去除效能;组合工艺对强疏水性、弱疏水性、亲水性有机物的去除率分别为 62.9%、82.3%、33.8%,均高于单独 BAF 工艺,尤其是针对 BAF 难以去除的亲水性有机物,在组合工艺中其去除率得到了大幅度提升,表明组合工艺对有机物去除效果改善明显。

### 2.3.2 微生物种群结构

为了比较两组工艺中 BAF 生物膜上的微生物结构差异,属水平下的样本群落结构分析见图 4 (TS、TZ、TX、S、Z、X 分别代表组合工艺上层、中层、下层和单独 BAF 工艺上层、中层、下层的样品)。由图 4(a)可知,整体而言组合工艺中的菌种多样性较高、微生物种群丰富。黄海鞘氨醇杆菌属 (*Sphingorhabdus*) 是一种可以降解多环芳香有机物的好氧

菌<sup>[5]</sup>,相比单独 BAF 工艺,组合工艺中该菌的丰度更大,这也证明了组合工艺对有机物的去除效能更好;同样地,泡囊短波单胞菌属(*Brevundimonas*)和鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)等异养菌也在组合工艺中的丰度更大,鞘氨醇单胞菌属能够在低基质条件下利用多种有机物进行代谢,这再次证明了组合工艺可强化去除有机物。由图 4(b)可知,两组工艺在属水平下的物种丰度热图存在明显差异,组合工艺中数值较高的菌种占比更多,说明其物种丰度更大,这与组合工艺对氨氮与有机物的去除效果更好相一致。



图 4 属水平下的微生物群落结构

Fig. 4 Microbial community structure at level of genus

### 3 结论

与单独 BAF 工艺相比,铁碳微电解/BAF 组合工艺强化了对浊度、氨氮、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除,尤其强化

了对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除,大大提高了可生化性低的微污染原水中有有机物的去除效能。微生物群落结构分析发现,组合工艺中 BAF 的生物膜具有更加丰富的微生物种群,异养菌、硝化菌的丰度均高于单独 BAF 工艺。

### 参考文献:

- [1] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environ Sci Technol, 2015, 37(24): 5701–5710.
- [2] Hua G, Cheng Y, Kong J, et al. High-throughput sequencing analysis of bacterial community spatiotemporal distribution in response to clogging in vertical flow constructed wetlands [J]. Bioresour Technol, 2018, 248: 104–112.
- [3] Ma Z, Yang Y, Jiang Y, et al. Enhanced degradation of 2,4-dinitrotoluene in groundwater by persulfate activated using iron-carbon micro-electrolysis [J]. Chem Eng J, 2017, 311: 183–190.
- [4] Choe S, Chang Y Y, Hwang K Y, et al. Kinetics of reductive denitrification by nanoscale zero-valent iron [J]. Chemosphere, 2000, 41(8): 1307–1311.
- [5] Basta T, Buerger S, Stolz A. Structural and replicative diversity of large plasmids from sphingomonads that degrade polycyclic aromatic compounds and xenobiotics [J]. Microbiology, 2005, 151(Pt 6): 2025–2037.



作者简介:颜勇(1970—),男,江苏扬州人,大学本科,工程师,主要从事水处理技术研究工作。

E-mail: 18952758222@163.com

收稿日期:2018-06-29