

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.010

两级A/O生物滤池与微絮凝过滤组合处理二级出水

王宏伟^{1,2}, 张国珍^{1,2}, 武福平^{1,2}, 马宏琛³, 闵芮^{1,2}, 严婉钰^{1,2}

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 南京地铁集团有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 针对西北地区低C/N值城镇污水处理厂二级出水,采用两级A/O生物滤池与微絮凝过滤组合工艺强化脱氮除磷效果。结果表明,生物膜形成后,在溶解氧、水力负荷、流量分配比分别为4 mg/L、1.2 m³/(m²·h)、70%:30%的条件下,该工艺对COD、NH₄⁺-N的平均去除率分别为85%、94%,出水平均浓度分别为19.86、0.48 mg/L,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准;对TP的去除率为75%,平均出水TP浓度为0.22 mg/L,达到Ⅳ类水标准;对TN的去除率为72%,平均出水TN浓度为6.77 mg/L,远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。组合工艺在保证COD去除效果的基础上实现了脱氮除磷。

关键词: 两级A/O生物滤池; 微絮凝; 二级出水; 低C/N值; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0065-05

Two-stage A/O Biofilter Combined with Micro-flocculation Filtration for Secondary Effluent Treatment

WANG Hong-wei^{1,2}, ZHANG Guo-zhen^{1,2}, WU Fu-ping^{1,2}, MA Hong-chen³,
MIN Rui^{1,2}, YAN Wan-er^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Nanjing Metro Group Co. Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: A combined process of two-stage A/O biofilter and micro-flocculation filtration was applied to treat the secondary effluent with low C/N ratio from a municipal wastewater treatment plant in Northwest China, and the enhanced performance of nitrogen and phosphorus removal was investigated. After biofilm formation, when dissolved oxygen, hydraulic load and flow distribution ratio were 4 mg/L, 1.2 m³/(m²·h) and 70%:30%, the average removal efficiencies of COD and NH₄⁺-N were 85% and 94%, respectively, and their average concentrations in the effluent were 19.86 mg/L and 0.48 mg/L, respectively, which met the class Ⅲ criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The removal efficiency of TP was 75%, and its average concentration in the effluent was 0.22 mg/L, which met the class Ⅳ criteria specified in GB 3838-2002. The removal efficiency of TN was 72%, and its average concentration in the effluent was 6.77 mg/L, which was much lower than the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal*

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768031); 甘肃省重点研发计划项目(17YF1NA056)

通信作者: 张国珍 E-mail: guozhenzhang126@126.com.

Wastewater Treatment Plant (GB 18918—2002). The combined process not only achieved a good COD removal performance but also realized nitrogen and phosphorus removal.

Key words: two-stage A/O biofilter; micro-flocculation; secondary effluent; low carbon-nitrogen ratio; nitrogen and phosphorus removal

市政污水处理厂出水氮、磷浓度高是造成水体富营养化的主要原因,其出水水质虽然达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准,但远高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类水标准限值^[1]。因此,开展污水处理厂二级出水的深度处理尤为重要。由于曝气生物滤池(BAF)工艺具有占地面积小、容积负荷高、出水水质好等特点,近年来被城市污水厂广泛采用,尤其是对再生水的处理。多级A/O是对传统A/O工艺的进一步改进,在一系列缺氧段和好氧段交替串联下利用微生物的生命活动达到去除污染物的目的^[2]。该工艺具有碳源利用率高、无硝化液内回流、抗冲击负荷能力强等优点,然而我国大部分城镇生活污水的C/N值较低,需要投加碳源以满足反硝化脱氮的要求。微絮凝过滤是将絮凝剂投加在滤池前端,经快速搅拌形成微絮体后直接进入滤池,同步完成混凝反应与过滤截留,处理流程简单,由于不设沉淀池,占地面积大大减小。

利用多级A/O工艺强化脱氮除磷已成为当前水处理领域重点研究的课题,但对如何提升西北地区低C/N值二级生化出水脱氮除磷效果的研究甚少。为同步提高西北地区低C/N值二级出水的脱氮除磷效果,笔者通过串联两级A/O生物滤池与微絮凝过滤,对两级A/O滤池反硝化阶段投加碳源(葡萄糖)补充基质,以提高去除总氮的效果,后续微絮凝滤池主要对二级出水中的磷予以去除,并综合分析系统处理二级生化出水的脱氮除磷机理。

1 材料与方法

1.1 试验装置

两级A/O生物滤池与微絮凝滤池的主体材料均为有机玻璃,试验流程如图1所示。前者内径和配水区高度分别为70 mm、150 mm。配水区上方选用粒径为3~5 mm的陶粒作为滤料。1#和3#缺氧柱高1 400 mm,滤料层高度为700 mm;2#和4#好氧柱高1 800 mm,滤料层高度为1 100 mm。微絮凝滤柱内径为70 mm,总高为900 mm,填料层高700 mm。滤

柱最下层设置高50 mm、粒径为4~8 mm的鹅卵石作为承托层,并放置0.5~1 mm的石英砂滤料。混凝剂为聚合氯化铝(PAC),投加量为6 mg/L。反冲洗水均采用滤池出水,冲洗强度为18 L/(m²·s),持续冲洗10 min。为提高无回流条件下的脱氮效果,向缺氧柱投加葡萄糖作为反硝化所需的碳源,原水依次经过两级A/O滤柱、微絮凝滤柱,滤池前端设置PAC投加点,通过搅拌使其均匀进入微絮凝滤柱中,每个滤柱均设置取样口以检测出水水质。

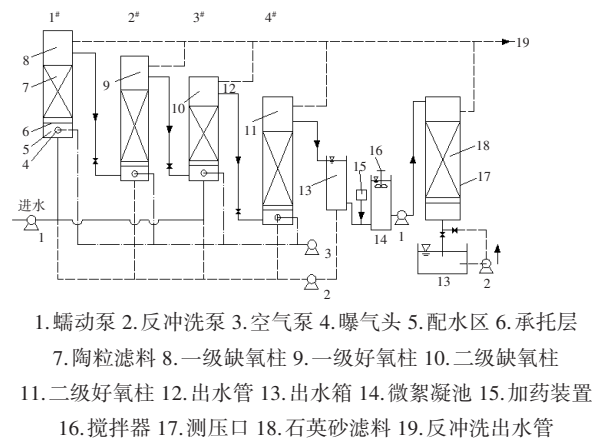


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

1.2 试验材料及方法

试验以校园内某生活污水处理装置的二级出水作为系统进水,具体水质:COD为42.86~76.22 mg/L,平均值为59.54 mg/L;NH₄⁺-N为4.52~11.34 mg/L,平均值为7.48 mg/L;TN为17.25~30.35 mg/L,平均值为23.23 mg/L;TP为0.47~1.52 mg/L,平均值为0.87 mg/L;pH值为6.85~7.70,平均值为7.28。前期分别考察了DO为4 mg/L[水力负荷为0.7 m³/(m²·h)、流量分配比为50%:50%]、水力负荷为1.2 m³/(m²·h)[流量分配比为50%:50%、DO为4 mg/L]、流量分配比为70%:30%[水力负荷为0.7 m³/(m²·h)、DO为4 mg/L]3种工况下两级A/O生物滤池对TN的去除率。结果表明,3种工况下对TN的去除率分别为25.4%、33.4%、26.7%,平均出水

TN 分别为 15.70、17.41、19.89 mg/L,均达不到 GB 18918—2002 一级 A 排放标准。因此,需在进水端投加碳源以提高 COD 浓度,且选用葡萄糖作为碳源。

试验中 COD 采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定, TN 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定, DO 采用溶解氧仪测定, pH 值采用 pH 计测定。

2 结果与分析

2.1 对 COD 的去除效果

图 2 为组合工艺对 COD 的去除效果。可以看出,当进水 COD 浓度为 105.5~127.16 mg/L 时,出水 COD 浓度为 13.7~28 mg/L,均低于 30 mg/L,系统对 COD 的平均去除率在 80% 以上,说明组合工艺对 COD 具有良好的去除效果,且出水浓度达到了 GB 3838—2002 的Ⅲ类水标准。

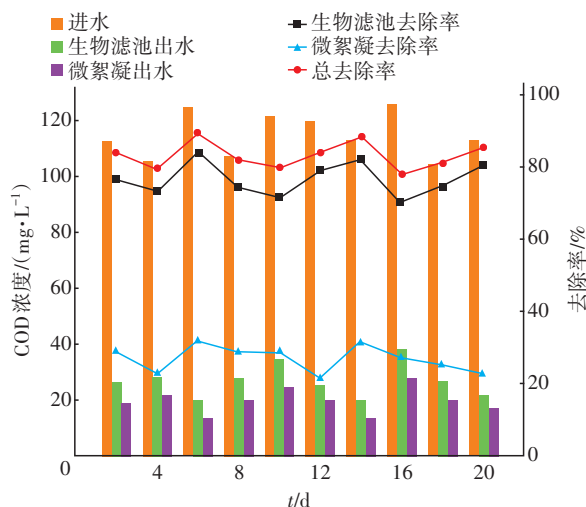


图2 组合工艺对COD的去除效果

Fig.2 Removal effect of combined process on COD

两级 A/O 生物滤池主要通过各级好氧柱中异养菌的氧化分解和缺氧柱微生物的同化、反硝化作用去除污水中的有机物。从图 2 可以看出, A/O 生物滤池对 COD 的去除率基本维持在 70%~85% 之间, 平均出水 COD 浓度为 27.10 mg/L, 说明系统对有机物具有较好的去除效果。两级 A/O 反应器通过分段进水至各级缺氧区使各级负荷相对均衡, 抗冲击负荷能力提高, 投加的碳源使 COD 浓度升高, 促进了缺氧柱的反硝化过程, 各级好氧柱中产生的硝酸盐氮为进行反硝化提供了基质, 同时将难降解的大分子有机物分解为小分子易降解物质, 使出水 COD 浓

度降低, 去除率提高。

微絮凝过滤在前段工艺的基础上对 COD 的平均去除率从 75% 提高到 85%, 出水 COD 平均浓度为 19.86 mg/L。然而单一微絮凝过滤对 COD 的去除率仅有 20%~30%, 推测滤速可能是影响 COD 去除效果的主要因素。滤速过大使混合液在滤料中发生絮凝反应的时间变短, 相互作用不充分, 同时较强的冲刷作用将滤料表面老化的生物膜和吸附的杂质冲刷到了水中, 出水 COD 浓度升高; 滤速过小使运行周期延长, 产水量降低, 运行成本相对增加, 生产效率反而下降。

2.2 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

图 3 为组合工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果。可以看出, 当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 4.52~11.34 mg/L 时, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 0.17~0.77 mg/L, 均低于 1.0 mg/L, 系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为 91.1%~96.0%, 说明组合工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有很好的去除效果, 出水浓度达到 GB 3838—2002 的Ⅲ类水标准。

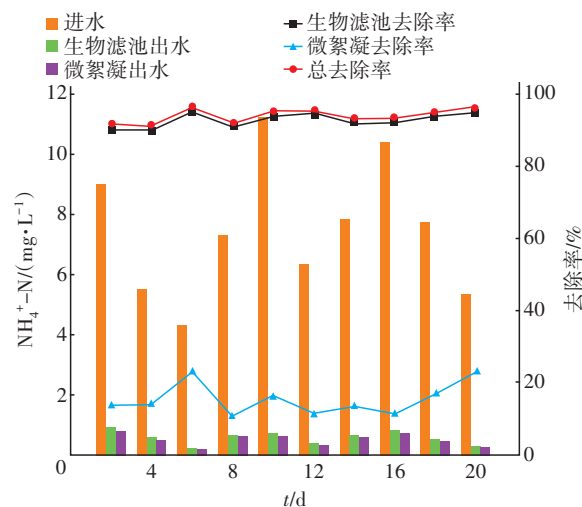


图3 组合工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Fig.3 Removal effect of combined process on $\text{NH}_4^+\text{-N}$

运行期间, A/O 工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率较高, 且比较稳定, 去除率能够达到 90% 以上, 平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度仅为 0.56 mg/L。这表明两级 A/O 生物滤池的抗冲击负荷能力强, 通过两级缺氧/好氧区进入的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被全部转移至好氧池进行硝化反应, 这为反硝化提供了充足的电子受体。在充分曝气的好氧条件下, 世代周期长且生长缓慢的自养硝化菌得以大量繁殖, 确保了硝化反应充分进行。也有研究指出^[3], 可能是较长的水力停留时间使有机物在

缺氧柱中被充分降解,好氧柱中有机物浓度随之降低,减轻了对硝化菌的竞争作用。

从图3还可知,在两级A/O滤池出水的基础上,微絮凝过滤工艺使平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降至0.45 mg/L,终端出水水质较好,主要是前者对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率较高,保证了终端出水浓度较低,但单一微絮凝对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率仅为15%左右。由于微絮凝过滤主要去除的是悬浮态的有机氮,而生物滤池出水中有机氮很少(10%),有机氮通过厌氧反应转换成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,但系统去除溶解性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较困难。此外PAC对亚硝化菌活性的抑制作用较强,系统内含氮有机物的亚硝化和硝化过程受到影响,反硝化效率降低,表现为反冲洗频率上升、 N_2 生成量减少^[4]。

2.3 组合工艺对TP的去除效果

图4为组合工艺对TP的去除效果。可知,当平均进水TP浓度为0.87 mg/L时,出水TP平均浓度为0.22 mg/L,系统对TP的平均去除率为75%。可见,组合工艺对TP的去除效果较好,且平均出水TP浓度达到了GB 3838—2002的Ⅳ类水标准。

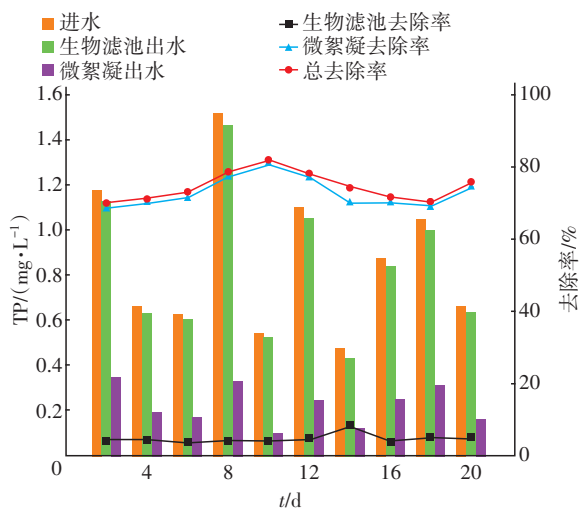


图4 组合工艺对TP的去除效果

Fig.4 Removal effect of combined process on TP

从图4还可以看出,进水TP波动较大,两级A/O生物滤池的出水TP浓度为0.43~1.46 mg/L,对总磷的去除率在10%以下,除磷效果不理想。这是因为进水TP浓度较低时,缺氧区容积较大,使得缺氧区后段没有足够的电子受体,转变为厌氧状态而发生释磷,使缺氧区出水磷浓度升高。系统在厌氧过程中 NO_3^- 的存在不利于磷的去除,由于反硝化菌会与聚磷菌(PAO)竞争碳源,而PAO在竞争中处于弱

势,即便存在少量碳源也会被反硝化反应优先利用,系统的好氧聚磷能力受到影响,出水TP浓度偏高。

微絮凝过滤段对TP的去除率达到了73%,尽管进水浓度较低,但该段仍具有较好的除磷能力,而A/O滤池对TP的平均去除率仅为6%左右,说明TP的去除主要通过微絮凝过滤完成。化学沉淀除磷的基本原理是通过投加化学药剂,使污水中的磷转变为不溶性的磷酸盐沉淀,然后通过固液分离转移到污泥中。在系统连续运行的情况下,沉淀物逐渐增多,充分实现了铝离子与磷酸根离子的结合。另外有报道^[5],pH值处于5.0~8.0之间时,pH值的变化很大程度上影响化学除磷过程中吸附和再沉淀反应的发生,且在此pH值范围内化学除磷的效率最为显著。本试验pH值处于7.3左右,磷主要以 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 两种形态存在,较易与带正电荷的絮凝剂结合成絮体(络合物),进而通过滤料截留方式得以去除。

2.4 组合工艺对TN的去除效果

图5为组合工艺对TN的去除效果。可知,系统对TN的平均去除率为72%,出水TN浓度为4.79~8.52 mg/L,远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。

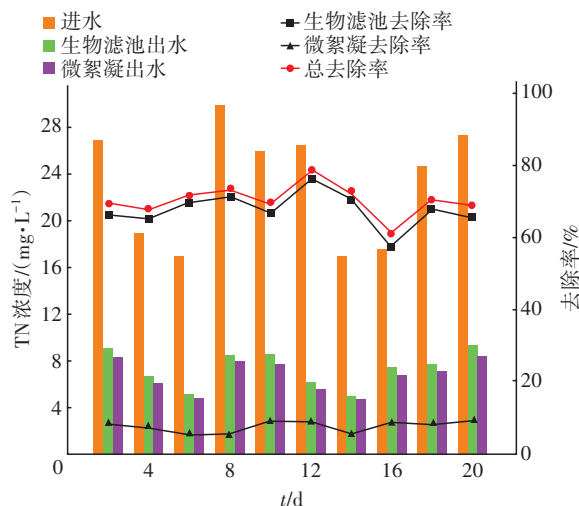


图5 组合工艺对TN的去除效果

Fig.5 Removal effect of combined process on TN

投加碳源后,A/O滤池进水碳氮比升高,出水TN的最低浓度从15.70 mg/L降至5.12 mg/L,去除率从33.1%升至68.2%,脱氮效果明显提高,但这与Choo等^[6]的研究结果相悖,主要因为首端污泥浓

度较高引起细胞同化作用或同步硝化反硝化。本试验中,加入葡萄糖后能充分补充反硝化所需要的碳源,各种基质相对充足,反硝化速率提高。由此可见,碳源是限制两级A/O生物滤池脱氮的主要因素。碳源为反硝化菌提供能量来源,投加量及吸收量很大程度上影响反硝化进程。Xia等^[7]研究了碳氮比为3:1、5:1、10:1时的反硝化效率,结果表明当进水碳氮比为10:1时反硝化效率最大。本试验的结果表明,当碳氮比从8:1提高到15:1时,TN去除率增大,对碳源的利用效率高,说明合适的碳氮比有利于A/O生物滤池的反硝化脱氮过程。

单一微絮凝过滤对TN的去除率仅为8.3%,但平均出水TN浓度为6.77 mg/L。因为A/O生物滤池出水中呈悬浮态的有机氮较少,且该氮素很难通过微絮凝过滤去除。另外,好氧柱中经硝化菌作用减少的氨氮转变为硝酸盐氮,在微絮凝滤池中产生的硝酸盐氮不足,很难使反硝化细菌生长,因此氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮大量共存于系统中,进而导致总氮去除率较低。

3 结论

① 组合工艺对二级生化尾水中的有机物及氮磷具有良好的去除效果,出水水质得到极大改善,其中两级A/O生物滤池主要去除二级出水中的有机物和氮,微絮凝过滤则对部分COD和磷具有较好的去除效果。

② 当进水COD、 NH_4^+-N 平均浓度为115.20、7.48 mg/L时,平均出水浓度分别为19.86、0.48 mg/L,均达到地表水Ⅲ类水标准;当进水TP平均浓度为0.87 mg/L时,平均出水TP浓度为0.22 mg/L,达到地表水Ⅳ类水标准。

③ 不同工况下,两级A/O生物滤池对TN的最佳去除率为33.4%,投加碳源(葡萄糖)后反硝化效率明显提高,去除率可达79.2%。可见,碳源是两级A/O生物滤池脱氮的主要限制因素。最终出水TN浓度为4.79~8.52 mg/L,远优于一级A排放标准。

参考文献:

- [1] 祝志超, 缪恒锋, 崔健, 等. 组合人工湿地系统对污水处理厂二级出水的深度处理效果[J]. 环境科学研

究, 2018, 31(12): 2028-2036.

ZHU Zhichao, MIAO Hengfeng, CUI Jian, *et al.* Advanced treatment performance of combined constructed wetland system on secondary effluent from wastewater treatment plant [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(12): 2028-2036 (in Chinese).

- [2] 陈强, 王伟, 彭永臻. 连续流分段进水工艺的研究进展与展望[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 20-25.
CHEN Qiang, WANG Wei, PENG Yongzhen. Research progress and prospect of continuous step feed process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 20-25 (in Chinese).
- [3] CHAI H X, XIANG Y, CHEN R, *et al.* Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: treatment performance and nitrogen removal pathway [J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 51-58.
- [4] 刘超. 化学除磷对城镇污水厂活性污泥系统的影响[J]. 中国给水排水, 2015, 31(22): 116-118.
LIU Chao. Effect of chemical phosphorus removal on activated sludge system in municipal sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(22): 116-118 (in Chinese).
- [5] SZABO A, TAKACS I, MURTHY S, *et al.* Significance of design and operational variables in chemical phosphorus removal [J]. Water Environment Research, 2008, 80(5): 407-416.
- [6] CHOO K H, STENSEL H D. Sequencing batch membrane reactor treatment: nitrogen removal and membrane fouling evaluation [J]. Water Environment Research, 2000, 72(6): 1389-1406.
- [7] XIA S Q, LI J Y, WANG R C. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor [J]. Ecological Engineering, 2008, 32(3): 256-262.

作者简介:王宏伟(1994-),男,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:whw11081ju@163.com

收稿日期:2019-10-01

修回日期:2019-11-06

(编辑:任莹莹)