

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.003

生物转盘—两级A/O—MBR工艺处理晚期垃圾渗滤液

钟文杰¹, 许刘成², 袁浩田¹, 李明刚², 张立秋¹, 储昭瑞¹, 贾宏林²,
宋运森², 李绮婷², 吴毅霖², 杨帝力², 吴宪荣³

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 深圳市钰华朗环境科技有限公司,
广东 深圳 518100; 3. 天津鲲鹏化工科技有限公司, 天津 300405)

摘 要: 针对晚期垃圾渗滤液可生化性差、碳氮比大幅度降低等问题,采用生物转盘—两级A/O—MBR工艺处理广东某填埋场晚期垃圾渗滤液,重点考察了组合工艺的处理效能。监测期间,组合工艺对COD的平均去除率为57.20%,对 NH_4^+-N 的平均去除率为98.90%,对TN的平均去除率为95.47%。高通量测序结果显示,在门水平上变形菌门(*Proteobacteria*)为最优势菌门,在活性污泥与生物转盘盘片上生物膜中的相对丰度分别为36.56%、62.50%。可利用外加碳源甲醇进行反硝化的菌属unclassified_f__*Methylophilaceae*与*Hyphomicrobium*在活性污泥与生物膜中的相对丰度分别为17.05%、23.11%与4.78%、12.22%。

关键词: 晚期垃圾渗滤液; 生物转盘; 两级A/O; MBR; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0019-07

Rotating Biological Contactor—Two-stage A/O—MBR Process for Treatment of Mature Landfill Leachate: Efficiency and Microbial Community Structure

ZHONG Wen-jie¹, XU Liu-cheng², YUAN Hao-tian¹, LI Ming-gang²,
ZHANG Li-qiu¹, CHU Zhao-rui¹, JIA Hong-lin², SONG Yun-sen², LI Qi-ting²,
WU Yi-lin², YANG Di-li², WU Xian-rong³

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Shenzhen Yuhualang Environmental Technology Co. Ltd., Shenzhen 518100, China; 3. Tianjin Rochemy Co. Ltd., Tianjin 300405, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor biodegradability and significant reduction of carbon nitrogen ratio of mature landfill leachate, rotating biological contactor—two-stage A/O—MBR was used to treat the mature landfill leachate of a landfill in Guangdong Province. The experiment focused on the treatment efficiency of the combined process for mature landfill leachate. During the operation period of the combined process, the average removal rates of COD, NH_4^+-N and TN were 57.20%, 98.90% and 95.47%, respectively. High-throughput sequencing results showed that *Proteobacteria* was the most dominant bacteria at the phylum level, and the relative abundances in activated sludge and biofilm attached on rotating biological contactor were 36.56% and 62.50% respectively. The relative abundances of unclassified_f__*Methylophilaceae* and *Hyphomicrobium* in activated sludge and biofilm, which could

基金项目: 广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX096); 广州市科技计划项目(202102010396)

通信作者: 张立秋 E-mail: zllqiu@gzhu.edu.cn

use external carbon source for denitrification, were 17.05%, 23.11% and 4.78%, 12.22%, respectively.

Key words: mature landfill leachate; rotating biological contactor; two-stage A/O; MBR; microbial community structure

垃圾渗滤液具有污染物浓度高、成分复杂、水质不稳定等特点,属于难处理的高浓度废水。垃圾渗滤液中含有大量的难降解有机物、氨氮、盐及重金属离子等,使其处理难度远高于市政污水。早期渗滤液有机物含量高,可生化性好,但随着填埋时间的推移,晚期渗滤液 NH_4^+-N 浓度上升、COD 及 BOD 降低、C/N 失衡,可生化性随之降低。此外,早期的垃圾填埋场采用的膜分离设备产生的浓缩液采用回灌的处理方法^[1],使得总氮及盐分累积,影响生化处理效果。

目前,垃圾渗滤液的处理方法主要包括物化法、生物法。物化法的主要优点是处理效果稳定,出水水质有保证,但处理费用较高,且存在二次污染的问题。此外,绝大多数物化方法只能针对渗滤液中的特定污染物,如吹脱只能去除渗滤液中的氨氮,对有机物几乎没有去除效果^[2]。生物法是处理垃圾渗滤液最常见的一种方法,它具有操作简单、可靠性强、处理成本低和二次污染小等优点^[2]。我国处理垃圾渗滤液采用的生物法多为活性污泥法,如 UASB+两级 A/O 工艺,较少采用生物膜法。生物转盘—两级 A/O—MBR 组合工艺作为泥膜混合处理系统,可借助生物转盘较大的比表面积实现菌种的固定,通过优化运行条件实现系统内功能菌的富集和优势化构建,从而强化对氨氮和有机物的去除效果^[3]。笔者基于广东省某垃圾填埋场渗滤液处理站的生化组合处理工艺,详细分析了生物转盘—两级 A/O—MBR 组合工艺对晚期垃圾渗滤液的处理效能,探讨了系统氮平衡及微生物群落分布。

1 材料与方法

1.1 构筑物与运行

广东某垃圾渗滤液处理站设计处理规模为 600 m^3/d ,采用的工艺流程见图 1。构筑物主要包括混合池、生物转盘(RBC)、两级 A/O、MBR,尺寸($L \times W \times H$)分别为 4.2 m \times 2.5 m \times 3.5 m、4.20 m \times 2.54 m \times 2.55 m、10 m \times 8 m \times 5.5 m、6.3 m \times 4.5 m \times 4 m。混合池、生物转盘为碳钢材质,两级 A/O 与 MBR 池为半地下钢筋混凝土结构,其中生物转盘盘片采用聚乙烯基树

脂 PVDC 制成,MBR 采用 PTFE 中空纤维膜组件,膜面积为 18.5 $\text{m}^2/\text{帘}$ 。

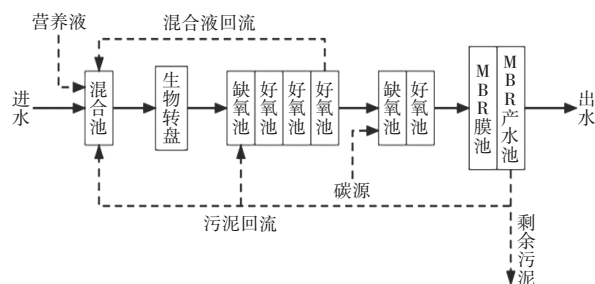


图1 广东某垃圾渗滤液处理站流程

Fig.1 Flow chart of landfill leachate treatment station in Guangdong

脂经图 1 工艺及后续深度处理后,出水水质达到了《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)中的表 2 标准,经市政污水管道排入城市污水处理厂做进一步处理。设计进出水水质见表 1。

表1 设计进出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH_4^+-N	TN	TP
进水	15 000	6 000	3 500	3 800	50
出水	≤ 100	≤ 30	≤ 25	≤ 40	≤ 3

对 2020 年 11 月—2021 年 12 月共 406 d 的监测数据进行统计,以分析组合工艺的处理效果。监测期间,组合工艺总水力停留时间为 15 d。一级好氧池硝化液回流至混合池,回流比为 400%~600%;MBR 部分污泥回流至一级缺氧池与混合池,回流比为 200%~400%。向二级缺氧池中投加甲醇以满足反硝化需求。

1.2 分析项目与方法

COD:酸性重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:紫外分光光度法;TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法。

微生物群落分析样品分别取自混合液中活性污泥与生物转盘盘片附着的生物膜。利用Illumina MiSeq PE300测序平台对样品的16S rRNA局部区域进行高通量扩增子测序,获得微生物群落结构及多样性,包括DNA提取、PCR扩展、MiSeq文库构建和MiSeq测序。

2 结果与讨论

2.1 对COD的去除效果

由于是填埋场晚期垃圾渗滤液,进水COD浓度波动大,主要集中在2 000~6 000 mg/L(见图2)。而MBR膜池出水COD浓度较稳定,为1 000~2 000 mg/L。进水COD浓度受夏季降雨影响明显,6月—9月进水COD主要集中在2 000~4 000 mg/L,其余月份主要集中在4 000~6 000 mg/L,而各月份MBR膜池出水COD浓度相差较小,表明该组合工艺对COD具有较稳定的去除效果,抗冲击负荷能力强。

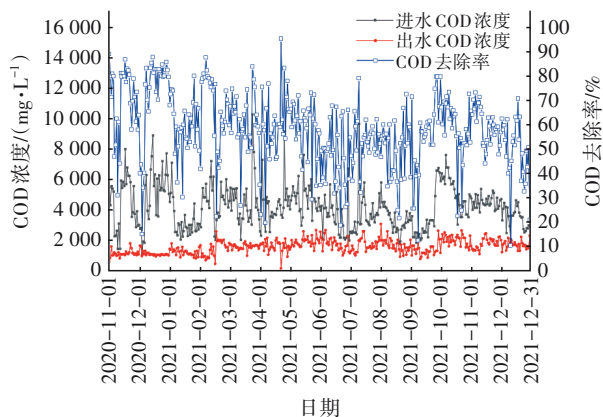


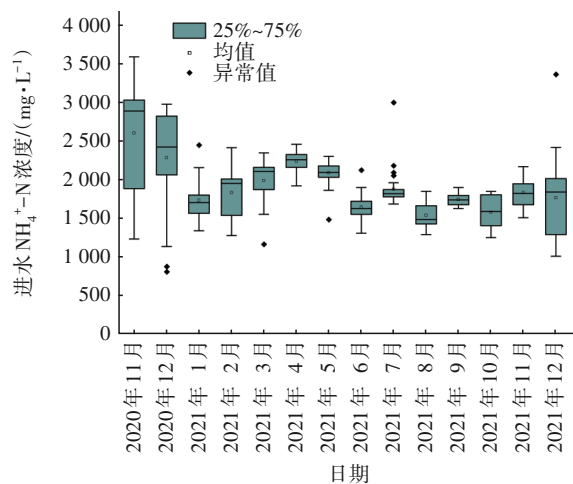
图2 进出水COD浓度及其去除率

Fig.2 COD concentration of influent and effluent and its removal rate

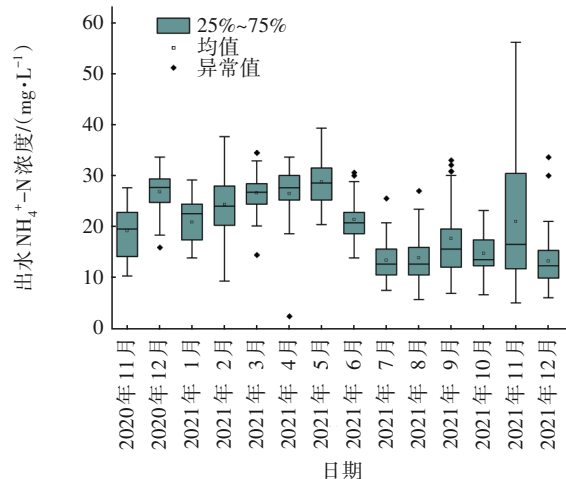
随着填埋时间的增加,渗滤液COD中腐殖质,特别是腐殖酸的比例将大幅上升^[6]。该垃圾渗滤液的可生化性差,组合工艺对COD的平均去除率为57.20%,COD中可生物降解部分基本被去除。通过组合工艺的处理,MBR膜池平均出水COD为1 595 mg/L,可有效缓解后续深度处理膜污染的发生^[7]。再经后续深度处理后,出水COD浓度可达到设计出水水质要求。

2.2 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

生物脱氮过程主要通过硝化和反硝化作用实现,单一厌氧条件下难以完成反硝化脱氮过程^[8]。组合工艺通过两级A/O辅以回流比为400%~600%的混合液回流,可以实现高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度波动较大(见图3),为1 000~3 500 mg/L,但MBR出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均低于60 mg/L,整体去除率为98.90%。



a. 进水氨氮浓度



b. 出水氨氮浓度

图3 进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

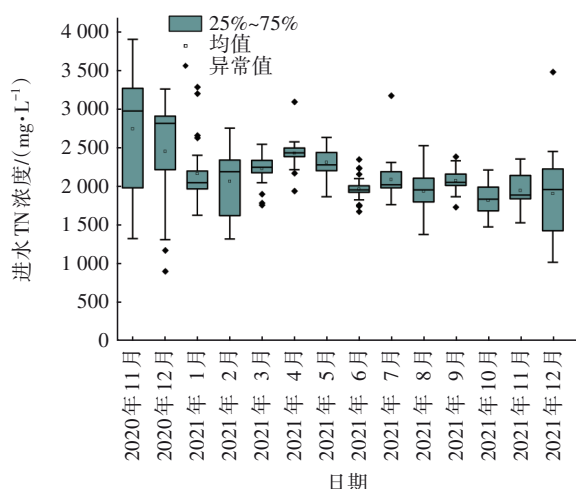
Fig.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of influent and effluent

进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在冬季变化幅度较大,而MBR膜池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度维持在一个较稳定的水平,2020年12月、2021年1月与2月MBR膜池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度均在20~30 mg/L,表明该组合工艺在冬季进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度不稳定的情况下也能取得较好的去除效果,抗冲击负荷能力强。此外,

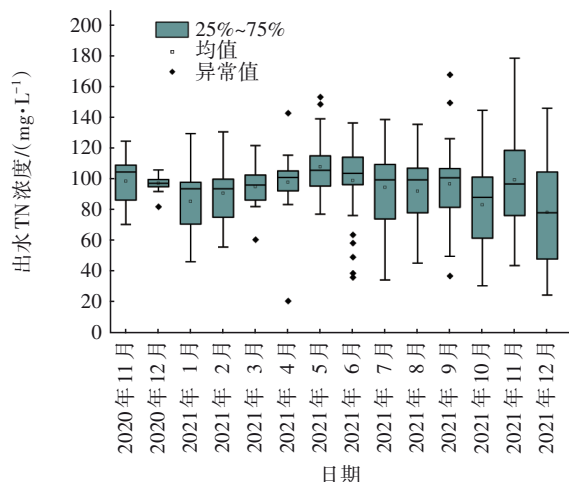
MBR膜池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化趋势接近,组合工艺的处理效果一定程度上受进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响,但整体上MBR膜池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在40 mg/L以下,通过后续深度处理可保证出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度稳定达到设计出水水质要求。

2.3 对TN的去除效果

组合工艺通过生物转盘和两级A/O进行硝化、反硝化,将渗滤液中的氮素转化为氮气从而实现氮的去除。监测期间,进水TN平均浓度为2 152 mg/L,MBR膜池出水TN平均浓度为94 mg/L,整个生物系统对TN的平均去除率为95.47%。再经后续深度处理,可使出水TN浓度稳定达到设计出水水质要求。在进水TN波动较大的情况下,各月份出水TN平均浓度基本在80~100 mg/L范围内且变化幅度小(见图4),并未受到水质冲击的影响。



a. 进水TN浓度



b. 出水TN浓度

图4 进出水TN浓度

Fig.4 TN concentration of influent and effluent

晚期垃圾渗滤液碳氮比大幅度降低,一般小于3^[2]。该处理站进水COD/TN主要集中在1~3,且部分有机物为惰性有机物,只能满足部分碳源需求;因此通过在A2池(二级A/O缺氧池)补充投加碳源以满足反硝化需求。

2.4 系统氮平衡分析

在该组合工艺中,混合池主要起均化水质、水量的作用,生物转盘起硝化与反硝化作用,两级A/O中缺氧池A1、A2主要起反硝化作用,好氧池O1、O2、O3、O4主要起硝化作用。为了更好地判断组合工艺中各单元对脱氮发挥的作用,对氮素浓度进行平衡分析。监测过程中各单元中均未检出 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,系统主要依靠全程硝化反硝化脱氮,监测结果见图5。

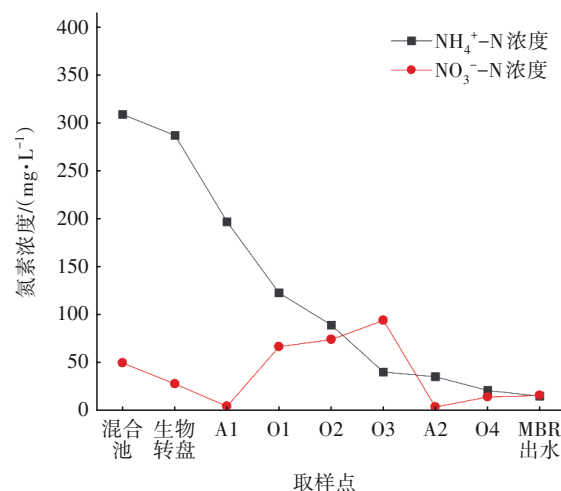


图5 氮浓度沿程变化

Fig.5 Variation of nitrogen concentration along the flow

系统进水TN浓度为2 366.75 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为2 082.00 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为11.57 mg/L,由于硝化液回流与污泥回流的稀释作用,混合池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低至309 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度升高至50.21 mg/L。

生物转盘盘片部分浸没于混合液中,通过转轴转动交替地与混合液和空气接触,故生物转盘内存在硝化与反硝化反应,在降低后续单元氨氮负荷的同时充分利用了原水中的有机物进行反硝化。生物转盘中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为287.08 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为28.28 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率分别为7.09%、43.68%。

由于污泥回流及反硝化作用,缺氧池A1中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为197.10 mg/L与5.04

mg/L。由于未向缺氧池A1投加碳源,故A1充分利用了原水中的有机物进行反硝化脱氮。混合液经过好氧池O1、O2、O3处理后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐步降低至40.8 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度逐步升高至94.33 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为79.30%,硝化作用明显。运行中在缺氧池A2投加碳源, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降低至3.99 mg/L,去除率为95.77%。相比缺氧池A1,缺氧池A2在高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 负荷的情况下, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率也相对较高,说明投加的碳源被有效利用。混合液经过好氧池O4处理后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由35.70 mg/L降低至21.30 mg/L,相对应 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度由3.99 mg/L升高至14.50 mg/L,在降解 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的同时,产生的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 可随污泥回流至缺氧池A1进行降解。由于MBR膜池通过曝气防止膜组件堵塞,故MBR膜池存在硝化反应,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为15.60、18.25 mg/L,TN浓度为77 mg/L。

2.5 微生物群落分析

混合液中的活性污泥与附着于生物转盘上的生物膜在门水平上的微生物群落相对丰度分布见图6,主要有变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、酸杆菌门(*Patescibacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)。

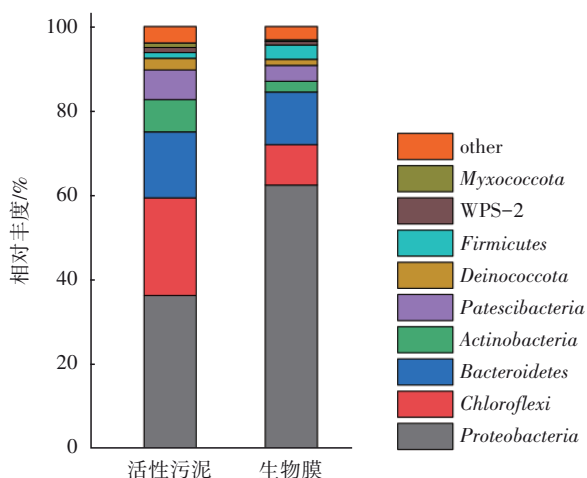


图6 活性污泥与生物膜在门水平上的微生物群落分布 (第172天)

Fig.6 Microbial community of activated sludge and biofilm at phylum level on day 172

最优势菌门*Proteobacteria*在污水处理过程中对有机物降解和脱氮起重要作用^[9],并可减轻污染物引起的生物毒性^[10],其中大部分属于腐生异养型细菌,此外还包括很多氨氧化细菌、亚硝酸盐氧化细菌

和反硝化细菌^[11]。*Proteobacteria*在活性污泥和生物膜中的相对丰度分别为36.56%、62.5%,表明其在该组合工艺脱氮过程中发挥着重要作用。生物膜中*Proteobacteria*的相对丰度远高于活性污泥,表明生物转盘对有机物及氮素的稳定去除发挥了重要作用。*Chloroflexi*和*Bacteroidetes*普遍存在于污水处理厂生物池并参与有机物降解^[12],*Patescibacteria*为难降解有机废水处理工艺中很常见的优势菌^[13],*Actinobacteria*在营养物去除过程中起着重要作用,是废水处理系统中广泛存在的门。

混合液中的活性污泥与附着于生物转盘上的生物膜在属水平上的微生物群落分布见图7,最优势菌属为unclassified_f__*Methylophilaceae*,它属于变形菌门甲基球菌科,在活性污泥与生物膜中的相对丰度分别为17.05%和23.11%。*Methylophilaceae*能够吸收同化单碳有机物^[14],Kalyuzhnaya等^[15]使用同位素探针技术研究发现利用甲醇进行反硝化的菌属也主要属于*Methylophilaceae*。组合工艺在A2池投加甲醇以满足反硝化碳源需求,*Methylophilaceae*的大量富集说明在脱氮过程中甲醇被有效利用。

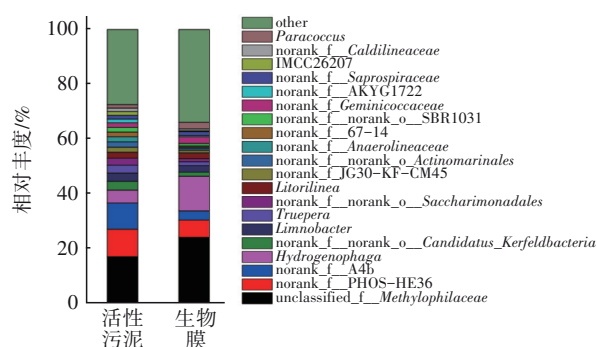


图7 活性污泥与生物膜在属水平上的微生物群落分布 (第172天)

Fig.7 Microbial community of activated sludge and biofilm at genus level on day 172

norank_f__PHOS-HE36与norank_f__A4b在活性污泥中的丰度均高于生物膜,在活性污泥与生物膜中相对丰度分别为9.98%、6.12%和9.58%、3.23%。norank_f__PHOS-HE36属于拟杆菌门PHOS-HE36科,此前在反硝化群落中有报道^[16]。norank_f__A4b属于绿弯菌门A4b科,Xiang等^[17]曾报道A4b有助于脱氮颗粒污泥骨架结构的形成。Timmermans等^[18]发现采用甲醇作为外加碳源时可使*Hyphomicrobium*得到富集,*Hyphomicrobium*是反

硝化系统中的优势微生物。*Hyphomicrobium*在生物膜中的相对丰度为12.22%,而其在活性污泥中的相对丰度仅为4.78%,这说明生物转盘可提高组合工艺对*Hyphomicrobium*菌属的富集效果。

3 结论

① 在406 d监测期间,组合工艺对晚期垃圾渗滤液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TN有良好的去除效果,且基本去除了进水COD中可生化降解部分,组合工艺对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的平均去除率分别为57.20%、98.90%、95.47%,且具有较强的抗冲击负荷能力。

② 系统中生物转盘、缺氧池A1及A2为主要反硝化脱氮单元,其中生物转盘与缺氧池A1充分利用原水中可生物降解的有机物去除回流带入的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,而缺氧池A2则利用投加的碳源去除好氧池O1、O2、O3硝化产生的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,组合工艺可充分利用进水中可生物降解有机物,从而节省了外加碳源的用量。

③ 在门水平上*Proteobacteria*为最优势菌门,在污水处理过程中对有机物降解和脱氮起重要作用。在属水平上unclassified_f__*Methylophilaceae*与*Hyphomicrobium*均可利用甲醇进行反硝化,在活性污泥与生物膜中的相对丰度分别为17.05%、23.11%与4.78%、12.22%。优势菌门与优势菌属在生物膜中的相对丰度均高于活性污泥,表明生物转盘可提高组合工艺对*Hyphomicrobium*的富集效果。

致谢:感谢深圳市钰华朗环境科技有限公司对本研究的支持,感谢许刘成在工艺分析等方面所提供的帮助,许刘成对本研究工作具有相同贡献,与钟文杰为并列第一作者。

参考文献:

- [1] 王东梅,刘丹,刘庆梅,等. 渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2822-2828.
WANG Dongmei, LIU Dan, LIU Qingmei, et al. Research on the variation regularity of effluent from the leachate reverse osmosis concentrate recirculation [J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2822-2828 (in Chinese).
- [2] 王凯,武道吉,彭永臻,等. 垃圾渗滤液处理工艺研究及应用现状浅析[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(1): 1-12.
WANG Kai, WU Daoji, PENG Yongzhen, et al. Critical review of landfill leachate treatment technologies [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(1): 1-12 (in Chinese).
- [3] 李宸,张千,刘向阳,等. HN-AD菌强化生物转盘工艺处理养牛场废水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(15): 25-30.
LI Chen, ZHANG Qian, LIU Xiangyang, et al. Treatment of cattle farm wastewater by rotating biological contactor enhanced with HN-AD bacteria [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15): 25-30 (in Chinese).
- [4] ZOUBOULIS A I, WU J, KATSOYIANNIS I A, et al. Removal of humic acids by flotation [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 231(1/3): 181-193.
- [5] 党康飞,张佳欢,代鑫,等. Fenton+BAF工艺用于生活垃圾渗滤液深度处理改造[J]. 中国给水排水, 2021, 37(24): 78-81.
DANG Kangfei, ZHANG Jiahuan, DAI Xin, et al. Application of Fenton/BAF process in reconstruction of advanced treatment of landfill leachate [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(24): 78-81 (in Chinese).
- [6] BERTHE C, REDON E, FEUILLADE G. Fractionation of the organic matter contained in leachate resulting from two modes of landfilling: an indicator of waste degradation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 262-271.
- [7] 罗敏,王占生,侯立安. 纳滤膜污染的分析与机理研究[J]. 水处理技术, 1998, 24(6): 10-15.
LUO Min, WANG Zhansheng, HOU Li'an. Analysis and mechanism study of nanofiltration membrane fouling [J]. Technology of Water Treatment, 1998, 24(6): 10-15 (in Chinese).
- [8] 常尧枫,谢嘉玮,谢军祥,等. 城镇污水处理厂提标改造技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 20-28.
CHANG Yaofeng, XIE Jiawei, XIE Junxiang, et al. Research progress on upgrading and reconstruction technology of urban sewage treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 20-28 (in Chinese).
- [9] NGUYEN H T T, LE V Q, HANSEN A A, et al. High diversity and abundance of putative polyphosphate-accumulating *Tetrasphaera*-related bacteria in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, 76(2): 256-267.

- [10] 张雪,乔雪姣,苏佳,等. 垃圾渗滤液处理厂活性污泥微生物种群结构和功能分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 927-937.
ZHANG Xue, QIAO Xuejiao, SU Jia, *et al.* Microbial structure and function of activated sludge in landfill leachate treatment plant [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57 (5): 927-937(in Chinese).
- [11] 王峰,徐灿华,刘易,等. 启动条件对活性污泥变形菌群落的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 949-953.
WANG Feng, XU Canhua, LIU Yi, *et al.* Effect of start-up conditions on *Proteobacteria* community structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 949-953(in Chinese).
- [12] 贺赞,李魁晓,王佳伟,等. 不同季节城市污水处理厂微生物群落特性[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1488-1495.
HE Yun, LI Kuixiao, WANG Jiawei, *et al.* Microbial community structure of wastewater treatment plants in different seasons [J]. Environmental Science, 2021, 42 (3): 1488-1495(in Chinese).
- [13] 宋佳宇,秦榕,杜显元,等. 点源炼油废水处理系统微生物多样性及代谢功能研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2389-2396.
SONG Jiayu, QIN Rong, DU Xianyuan, *et al.* Microbial diversity and metabolic function in point source wastewater treatment system of oil refinery [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34 (10): 2389-2396(in Chinese).
- [14] 邬甘霖,任翔宇,吴光学. 某再生水厂反硝化滤池脱氮性能与生物膜特征解析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 21-27.
WU Ganlin, REN Xiangyu, WU Guangxue. Nitrogen removal and biofilm characteristics of a post-denitrifying biofilter in a full-scale reclaimed wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (19): 21-27(in Chinese).
- [15] KALYUHNAYA M G, MARTENS-HABBENA W, WANG T. *Methylophilaceae* link methanol oxidation to denitrification in freshwater lake sediment as suggested by stable isotope probing and pure culture analysis [J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, 1 (5): 385-392.
- [16] YANG S, GUO B, SHAO Y X, *et al.* The value of floc and biofilm bacteria for anammox stability when treating ammonia-rich digester sludge thickening lagoon supernatant [J]. Chemosphere, 2019, 233: 472-481.
- [17] XIANG T, GAO D W, WANG X L. Performance and microbial community analysis of two sludge type reactors in achieving mainstream deammonification with hydrazine addition [J]. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136377.
- [18] TIMMERMAN P, HAUTE A V. Denitrification with methanol: fundamental study of the growth and denitrification capacity of *Hyphomicrobium* sp. [J]. Water Research, 1983, 17(10): 1249-1255.
- 作者简介:钟文杰(1998-),男,广东惠州人,硕士研究生,主要研究方向为污水生物处理技术。
E-mail: 1443398556@qq.com
收稿日期:2022-08-25
修回日期:2022-09-20

(编辑:李德强)

加强水土保持, 打造绿水青山