葛俊, 徐连军, 陆斌, 等. 两种生物膜法处理低污染初期雨水的中试对比[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 97-103.
Ge J, Xu L J, Lu B, et al. Comparison of pilot-scale test between two biofilm processes of initial rainwater with low concentrations pollutants[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 97-103.

两种生物膜法处理低污染初期雨水的中试对比

葛　俊[1],徐连军[1],陆　斌[2,*],金泰峰[3]
(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司,上海　200120;2. 同济大学环境科学与工程学院,上海　200092;3. 上海尼普敦环境科技有限公司,上海　200092)

摘　要　**【目的】** 随着城镇化水平不断提高,初期雨水成为城市地表水体污染的潜在原因。降雨量较大,降雨频率较高的地区初期雨水污染物的含量较低,导致传统污水处理方法难以适用于低污染初期雨水的处理。为此,本文通过中试试验验证了生物膜处理技术处理低污染初期雨水的有效性。**【方法】** 采用生物帘固定床生物膜反应器(FBBR)和悬浮填料移动床生物膜反应器(MBBR),在水力停留时间为 3.25 h 的单个反应单元的中试规模条件下,利用反应器为填料表面附着的微生物群落代谢作用,通过有机物好氧氧化分解和氨氮硝化过程等,净化处理低污染初期雨水:化学需氧量(COD)<100 mg/L,氨氮<15 mg/L。**【结果】** 连续 3 个月以上的运行结果表明,在低污染初期雨水进水污染物质量浓度满足设计进水水质(COD<100 mg/L,氨氮<15 mg/L)时,2 种生物膜反应器出水 COD 和氨氮的质量浓度均能稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类水水质(COD≤40 mg/L,氨氮≤2.0 mg/L)。**【结论】** 2 种生物膜反应器均能有效处理低污染初期雨水的 COD 和氨氮。其中生物帘 FBBR 具有较厚的生物膜和更优的微生物群落结构,表现出更好的氨氮处理效果和抗氨氮冲击能力。

关键词　初期雨水; 低污染; 生物膜法; 固定床; 移动床
中图分类号: TU992　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1009-0177(2026)10-0097-07
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.011

Comparison of Pilot-Scale Test between Two Biofilm Processes of Initial Rainwater with Low Concentrations Pollutants

Ge Jun[1], Xu Lianjun[1], Lu Bin[2,*], Jin Taifeng[3]
(1. *CCCC Shanghai Waterway Survey and Design Institute Co., Ltd., Shanghai* 200120, *China*;
2. *College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*;
3. *Shanghai Nipudun Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai* 200092, *China*)

Abstract　[**Objective**] With rapid urbanization in China, first flush rainwater has become an underlying cause of urban surface water pollution. Initial rainwater in areas of frequent and heavy rainfall shows low pollutant concentrations, which renders conventional wastewater treatment methods difficult to apply to the treatment of low-pollution initial rainwater. Therefore, a pilot-scale test using biofilm treatment of initial rainwater with low pollutant concentrations was conducted to verify its effectiveness. [**Methods**] A pilot-scale test of 2 reactors with a single treatment unit whose hydraulic retention time was 3.25 h, which employed a biological curtain fixed-bed biofilm reactor(FBBR) and moving-bed biofilm reactor (MBBR), respectively, was conducted on first flush rainwater with low pollutant concentrations: chemical oxygen demand (COD) < 100 mg/L, ammonia nitrogen < 15 mg/L. The pollutants were eliminated through aerobic oxidative decomposition of organic matter and nitrification of ammonia by microbes attached to carriers in the reactors. [**Results**] During more than 3 months of reactor operation, when the pollutant concentrations of the influent were in accord

[收稿日期]　2025-07-04
[基金项目]　安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2023-YF116)
[作者简介]　葛俊(1989—　),男,高级工程师,主要从事水污染防治技术研究,E-mail:gejun3011@qq.com。
[通信作者]　陆斌(1968—　),男,博士研究生,研究方向为各类工业废水、畜禽污水、餐饮废水、垃圾渗滤液和城市污水厂等水处理技术研究和应用,E-mail:tjlb@tongji.edu.cn。

with the design values (COD < 100 mg/L, ammonia nitrogen < 15 mg/L), the COD and ammonia nitrogen concentrations of both effluents met the V class of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002) (COD ≤ 40 mg/L, ammonia nitrogen ≤ 2.0 mg/L). [**Conclusion**] 2 biofilm reactors both showed good performance in treating COD and ammonia nitrogen of initial rainwater with low pollutant concentrations. The reactor of fixed-film process with curtain carrier had a better removal efficiency of ammonia nitrogen and a better ammonia nitrogen impact resistance with thicker biofilm and a more favorable microbial community structure compared to the moving-bed biofilm reactor process.

Keywords initial rainwater; low pollution concentration; biofilm process; fixed-bed; moving-bed

随着中国经济的快速发展,我国的城镇化水平不断提高,2023 年城镇化率达到了 66.16%[1],但城镇化导致大量的污染物随雨水径流冲入排水系统,再直接排放或溢流到地表受纳水体,成为城市水环境恶化的主要原因[2],也是城市地表水体富营养化和生态退化的潜在原因[3]。其中初期雨水包含降雨周期中大部分的污染物,其污染物质量浓度显著高于中后期雨水[4],是降雨径流污染的主要污染源。

国内目前治理初期雨水的主要方式为截流初期雨水,收集调蓄后,输送至污水处理厂处理后排放或就地简单处理后直接排放。其中,就地处理的主要方式为人工湿地植物处理、混凝沉淀等[5]。但人工湿地植物处理方式占地面积大[水力负荷一般为 0.1~0.8 $m^3/(m^2 \cdot d)$],混凝沉淀法仅能去除悬浮颗粒物、可形成沉淀的污染物及被吸附的污染物,除磷效果较好,但对溶解性污染物,如氨氮等去除效果有限。而收集调蓄后输送至污水处理厂进行处理的初期雨水,其排放标准执行污水处理厂排放标准,其污染物质量浓度显著高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V 类水标准。对于降雨量较大、降雨频率较高的地区,由于其初期雨水的污染物质量浓度相对较低[6-7],上述处理方式是否适用值得探讨。

生物膜法处理技术是通过分层的微环境(好氧-缺氧-厌氧)和功能微生物的协同作用,实现有机污染物的好氧氧化分解和氮素的"氨化-硝化-反硝化脱氮"转化,最终将污染物转化为无害的 CO_2 和 N_2,且生物膜处理技术对污染物具有高效深度去除能力,可将其质量浓度降至极低水平,且产泥量极少。因此,非常适合应用于需要达到地表水水质标准的低污染初期雨水的处理过程,在有效处理初期雨水的同时,无须设置污泥收集、处理及处置装置,少量剩余污泥随出水排入地表水。因此,本文在中试规模下分别采用生物帘固定床生物膜反应器(FBBR)和悬浮填料移动床生物膜反应器(MBBR)处理低污染初期雨水,验证生物膜处理技术对化学需氧量(COD)和氨氮的去除效果,并探究了 2 种填料生物膜反应器处理初期雨水的效能差异。

1　材料与方法

1.1　初期雨水水质

试验时间为 9 月份至次年 1 月份,地点在安徽省合肥市蜀山区。本文中处理的初期雨水的汇水区域为类扇形的 89 ha 工业区,该区域主要由产业园和科技园等多层建筑和厂房组成。此区域的雨水通过雨水管网汇集于 2 个专门设置的初期雨水截流井,截留的初期雨水通过管道输送至 1 个调蓄塘,而后由水泵提升到中试装置进行处理后排放至地表水体。调蓄塘为自然水塘,水域面积超过 10 000 m^2,因此,其水质与季节及初期雨水污染程度相关,在低温且降雨量较小时,水塘内的污染物质量浓度较低。

试验期间的低污染初期雨水水质如表 1 所示。其中初期雨水的 COD 质量浓度为 25.0~115.0 mg/L,≥60.0 mg/L 的天数占 5%,40.0~60.0 mg/L 的天数占 34%,≤40.0 mg/L 的天数占 61%;初期雨水的氨氮质量浓度为 2.5~29.3 mg/L,≥10.0 mg/L 的天数占 41%,5.0~10.0 mg/L 的天数占 27%,≤5 mg/L 的天数占 32%。

表 1　低污染初期雨水水质

Tab. 1　Water Quality of Initial Rainwater with Low Pollutants Concentrations

指标	浓度范围		出现频率
COD/(mg·L^{-1})	25.0~115.0	≥60.0	5%
		40.0~60.0	34%
		≤40.0	61%
氨氮/(mg·L^{-1})	2.5~29.3	≥10.0	41%
		5.0~10.0	27%
		≤5.0	32%

1.2 中试装置

中试装置的处理规模为 1 m^3/h,即 24 m^3/d,设计容积负荷分别 0.44 kg COD/(m^3·d)、0.096 kg 氨氮/(m^3·d)。

(1)装置工艺流程及中试装置设备参数

中试装置的工艺流程如图 1 所示,2 个中试装置的反应器结构与尺寸相同,主要区别为反应器内放置的生物填料,分别为生物帘固定填料和悬浮填料。放置生物帘填料的中试装置称为生物帘 FBBR,放置悬浮填料的中试装置称为悬浮填料 MBBR。

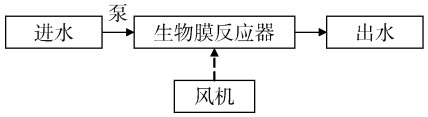


图 1 中试装置工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Pilot-Scale Test

生物帘 FBBR 和悬浮填料 MBBR 两组中试装置为合建,其初期雨水处理单元均为同规格的单格长方体生物膜反应器,尺寸为 2 100 mm(长)×1 000 mm(宽)×1 800 mm(高),有效水深为 1 550 mm,辅以共用的风机和控制箱等设备及其设备间,装置总尺寸为 3 100 mm(长)×2 000 mm(宽)×1800 mm(高),俯视结构如图 2 所示,设计水力停留时间为 3.25 h,并配置有风机。悬浮填料 MBBR 内,在长度方向每 1 050 mm 设置了 1 台搅拌器以保证悬浮填料在反应池内的均匀性,在长度方向末端设置了出水堰。中试装置设计进出水水质如表 2 所示,其进水水质是根据中试试验地点前 1 年(12 个月)初期雨水水质数据确定,设计进水水质符合大部分时期的水质。

表 2 中试装置设计进出水水质(单位:mg/L)

Tab. 2 Designed Influent and Effluent Water Quality for Pilot-Scale Reactors(Unit:mg/L)

项目	COD	氨氮	备注
进水设计质量浓度	≤100	≤15	—
出水设计质量浓度	≤40	≤2	地表 V 类水标准*

注:"*"表示《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V 类水标准限值。

(2)填料

生物帘 FBBR 内放置生物帘填料(图 3),其材质为特殊纤维,总面积为 47.5 m^2。其中生物帘单帘尺寸为 2 000 mm(长)×1 250 mm(高),以架子形式放置在反应器内底部曝气器上部。在反应器内总共放置 19 帘,其长度方向与反应器长度方向一致,在反应器宽度 1 000 mm 内均匀布置 19 条生物帘(图 2)。

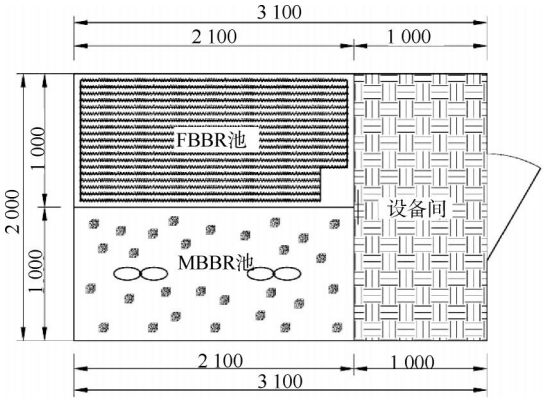
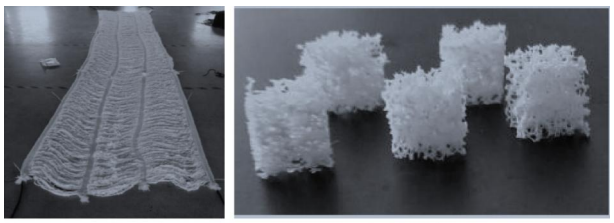


图 2 中试装置俯视图

Fig. 2 Top View of Pilot-Scale Test Plant



(a)生物帘填料 (b)悬浮填料

图 3 2 种填料外观

Fig. 3 Appearance of Two Packings

MBBR 内放置悬浮填料(图 3),其材质为聚氨酯多孔载体,单个载体尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,容积填充率为 30%左右。悬浮填料通过直接倒入的方式放进反应器内。

1.3 试验仪器

0~50 ℃玻璃液体温度计,101-OB 型烘箱,FA114A 型分析天平,哈希 DR1900 型分光光度计和 DRB200 消解仪(检测 COD 用),游标卡尺。

1.4 检测方法

每天对 2 种生物膜反应器进出水 COD、氨氮和出水悬浮物的质量浓度检测 1 次,同时检测 1 次水温。在 12 月中旬(运行稳定时期)从 2 种生物膜反应器取污泥样品进行了微生物高通量测序。

温度采用温度计进行检测;COD 质量浓度和氨氮质量浓度采用哈希设备检测方法进行检测,检测前以标样进行校准。微生物的高通量测序方法参考 Saunders 等[9]所述的方法进行,共 6 个步骤:(1)首

先从中试装置中取污泥样品,使用 DNA 提取试剂盒进行 DNA 提取;(2)使用特定引物对 16S rRNA 基因的特定区域(V3~V4 区域)进行 PCR 扩增,进行 30~35 个循环。每个循环包括变性(如 95 ℃,30 s)、退火(如 55 ℃,30 s)和延伸(如 72 ℃,30 s),然后是最终延伸(如 72 ℃,5 min);(3)采用 2%的琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物,并用 DNA 胶回收试剂盒回收 PCR 产物并进行定量检测;(4)在上海美吉生物医药科技有限公司云平台上使用 Illumina NovaSeq (lllumina Inc. ,San Diego,CA,USA)进行高通量测序;(5)测序数据首先在 97%的相似度水平下进行质量控制,获取全部序列,然后使用 QIIME 等软件进行 OTU 聚类和物种注释;(6)最后进行微生物群落多样性分析。

2　结果与讨论

2.1　2 种生物膜反应器的处理效果

2 种生物膜反应器处理低污染初期雨水的效果如图 4~图 7 所示,进出水水质为 2023 年 9 月底至 2024 年 1 月初的数据,其间的水温为 4~20 ℃(11 月中旬开始水温低于 15 ℃,12 月中旬开始水温低于 10 ℃)。在设计进水水质下,2 种生物膜反应器均可以有效处理低污染初期雨水中的 COD 和氨氮,出水能达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类水标准。并且近 3 个月的稳定运行过程中只产生很少量脱落的生物膜,以出水 SS 的形式排出。生物帘 FBBR 的出水 COD 质量浓度为 1.0~40.0 mg/L,氨氮质量浓度为 0.1~1.7 mg/L,对应的 COD 的去除率为 35%~85%,氨氮的去除率为 95%~99%;悬浮填料 MBBR 的出水 COD 质量浓度为 8.0~40.0 mg/L,氨氮质量浓度为 0.1~2.0 mg/L,对应 COD 的去除率为 21%~82%,氨氮的去除率为 84%~99%。在进水氨氮质量浓度超过设计质量浓度 15.0 mg/L 至 20.0 mg/L 时,2 种反应器也能有效地去除初期雨水中的氨氮至Ⅴ类水标准。

2 种生物膜反应器虽然能有效处理低污染初期雨水,但在初期雨水污染物质量浓度瞬时超过设计质量浓度时呈现出不同的抗冲击负荷能力,特别是对氨氮的抗冲击负荷能力。

9 月 23 日—10 月 24 日的近 1 个月的时段,进水氨氮质量浓度为 17.5 mg/L 左右,其进水氨氮质量浓度多次超过设计进水水质,原因可能是暴雨初期雨水汇水区域和雨水管网中的不易冲刷的污染物

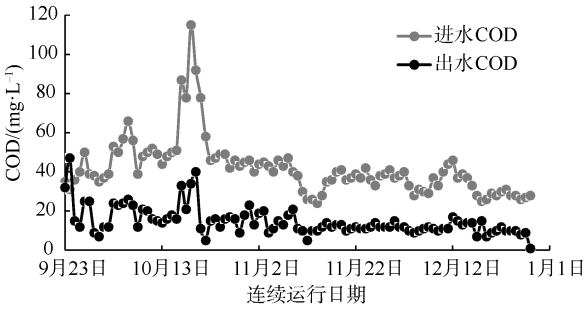


图 4　生物帘 FBBR 的 COD 处理效果

Fig. 4　Treatment Effect of COD by FBBR with Biological Curtain

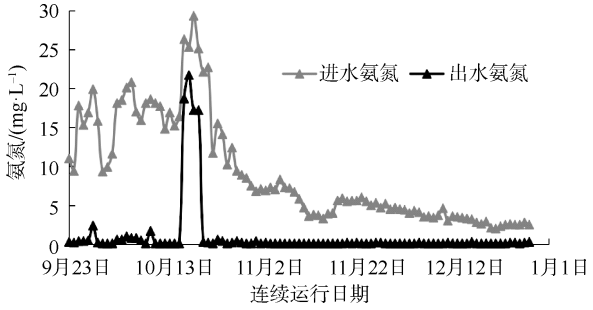
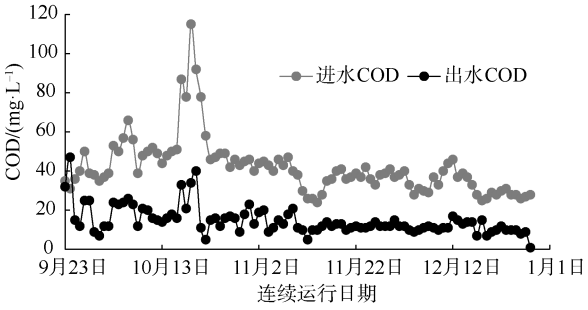


图 5　生物帘 FBBR 的氨氮处理效果

Fig. 5　Treatment Effect of Ammonia Nitrogen by FBBR with Biological Curtain



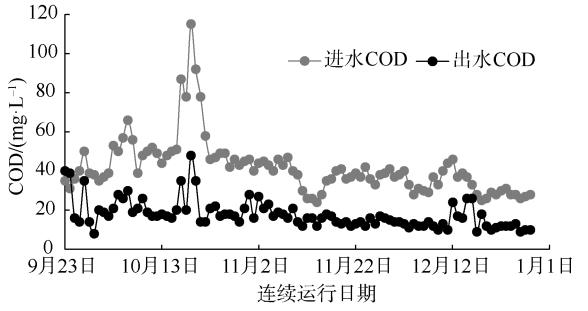


图 6　悬浮填料 MBBR 的 COD 处理效果

Fig. 6　Treatment Effect of COD by MBBR with Suspended Packings

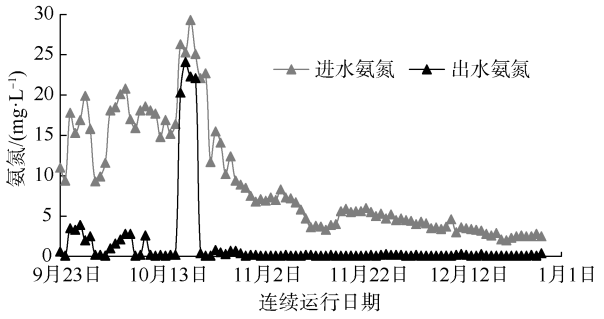


图 7 悬浮填料 MBBR 的氨氮处理效果

Fig. 7 Treatment Effect of Ammonia Nitrogen by MBBR with Suspended Packings

随雨水一起排至调蓄塘,导致调蓄塘内的污染物质量浓度升高。在该时段,生物帘 FBBR 出水氨氮质量浓度超标的次数仅为 5 次,其中 4 次的进水氨氮质量浓度超过了 20 mg/L;而悬浮填料 MBBR 出水氨氮质量浓度超标的次数高达 12 次。在进水质量浓度超出设计进水水质的情况下,超标次数差异说明生物帘 FBBR 较悬浮填料 MBBR 具有更高效的除氨氮能力。此阶段 2 个反应器出水 COD 质量浓度水平基本相当,但是悬浮填料 MBBR 在进水 COD 质量浓度最高的当天出水超标,而同一天生物帘 FBBR 出水 COD 质量浓度达标。在 COD 去除效率方面 2 种反应器水平相当,生物帘 FBBR 表现略优。

在 2023 年 11 月 14 日之后,水温开始低于 15 ℃。然而,2 种生物膜法在低温条件下均展现出了良好的氨氮去除性能。特别是在 11 月 14 日—12 月 16 日期间,当水温在 10~15 ℃(平均水温为 13.6 ℃)时,装置进水氨氮质量浓度为 3.0~5.0 mg/L,而出水氨氮质量浓度则降低至 0.1~0.2 mg/L,平均氨氮去除率高达 95%。即便在 12 月 17 日—12 月 29 日水温进一步降至 4~10 ℃(平均水温为 6.7 ℃)的情况下,装置进水氨氮质量浓度为 2~3 mg/L 时,出水氨氮质量浓度依然能够保持在 0.1~0.2 mg/L 之间,平均氨氮去除率维持在 96% 左右。

2.2 两种生物膜反应器内的生物膜特性

(1)生物膜厚度

2 种生物膜反应器均采用生物膜工艺,因此,采用不同填料生成的生物膜厚度可以间接反映 2 种反应器内微生物降解污染物的模式和微生物更新模式。

生物膜是由无机物(如水、无机盐)和有机物(如微生物、胞外聚合物)组成的。对于生物膜处理技术,生物膜厚度在 1.0~3.0 mm 被认为是较为理想的。这一厚度范围能够确保生物膜具有足够的表面积来吸附和转化污水中的污染物,同时避免因生物膜过厚而导致的堵塞问题。生物膜的更新周期相对固定,老化脱落而后由新生物膜取代,其厚度受到多种因素的影响,包括水流条件、营养物质供应等。

稳定运行期间检测的生物帘生物膜厚度为 1.0~2.0 mm,而悬浮填料生物膜厚度为 0.5~1.0 mm。悬浮填料生物膜较薄,可能是曝气引起的悬浮填料间碰撞摩擦和搅拌机扰动造成的水力剪切作用,导致悬浮填料表面较难形成较厚的生物膜。因此,悬浮填料生物膜的更新周期较短、污泥龄较短,相较之下,生物帘生物膜污泥龄较长。

(2)生物膜流失量(出水悬浮物质量浓度)

2 个生物膜反应器均只设置了 1 个曝气反应器,因此,其出水悬浮物主要由 2 个反应器的脱落生物膜组成。稳定运行期间检测的生物帘 FBBR 出水悬浮物质量浓度稳定在 10 mg/L 以下,而悬浮填料 MBBR 出水悬浮物质量浓度在 10~25 mg/L。出水悬浮物质量浓度的数据结果与生物膜厚度相对应,由于悬浮填料更新周期短,大量脱落的生物膜随出水流出反应池。

(3)生物膜微生物群落结构

2 个生物膜反应器内生物膜微生物群落结构可以反映各自的污染物去除特性,因此,在稳定运行期间的同一天分别取样 2 种生物膜进行了微生物群落结构分析。

微生物测序结果见图 8,检测出的优势菌种有 *Acinetobacter*,*Pseudomonas*,*Exiguobacterium*,*Nitrospira*,*Mycobacterium*,unclassified_f__Comamonadaceae 等。其中,*Acinetobacter* 具有较强的黏附性能,具有异养硝化和反硝化脱氮作用及聚磷作用[9],*Pseudomonas* 是反硝化聚磷菌,参与污染物的脱氮过程[10],*Nitrospira* 主要起硝化作用,能将亚硝酸盐转化为硝酸盐[11],以上三种均为有利于去除氨氮的优势菌种,其相对丰度均是生物帘生物膜高于悬浮填料生物膜。生物帘生物膜 *Acinetobacter* 的相对丰度为 11.2%,显著高于悬浮填料生物膜的 2.6%;生物帘生物膜 *Pseudomonas* 的相对丰度为 10.2%,显著高于悬浮填料生物膜的 2.3%;生物帘生物膜 *Nitrospira* 的相对丰度为 5.5%,显著高于悬浮填料

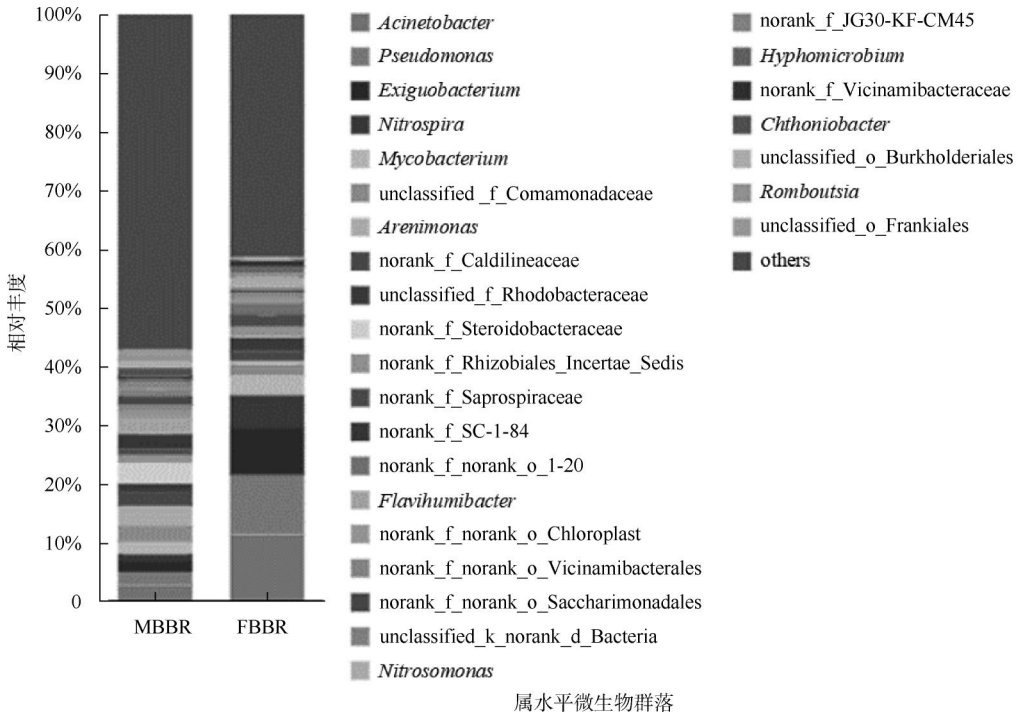


图 8　2 种反应器填料生物膜微生物群落结构

Fig. 8　Microbial Community Structure of Two Biofilms in Two Reactors

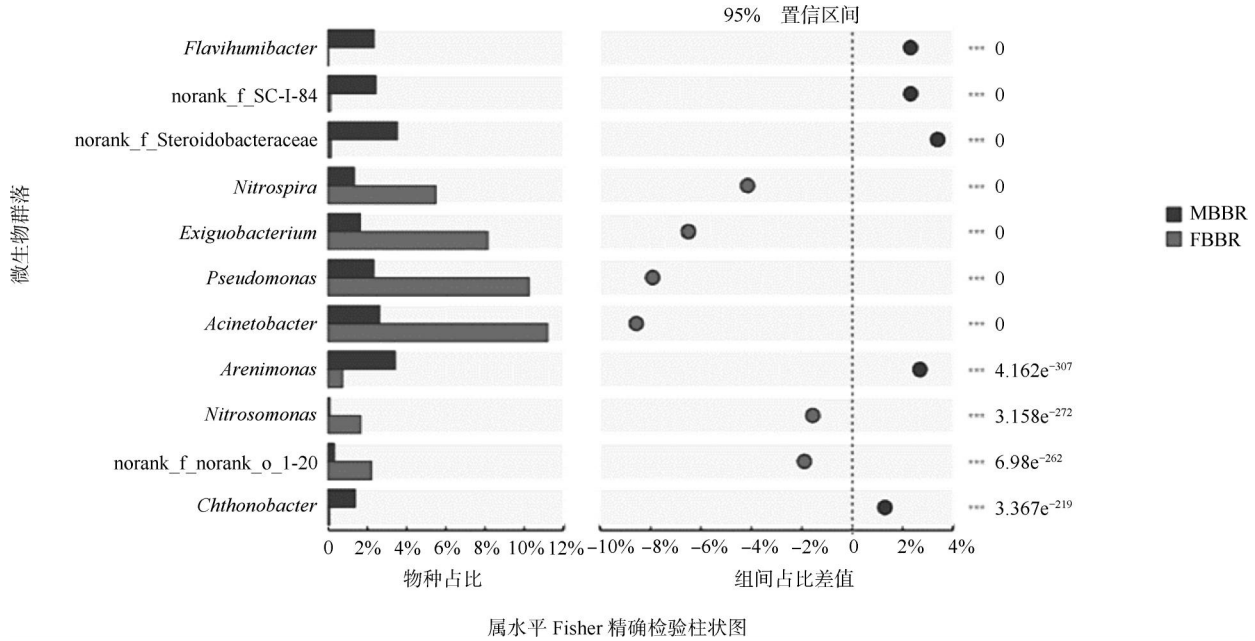


图 9　2 种反应器填料生物膜微生物群落差异分析

Fig. 9　Differential Analysis on Microbial Communities of Two Biofilms in Two Reactors

生物膜的 1.3%(图 9)。上述结果表明生物帘 FBBR 的生物膜生长环境更适合富集去除氨氮的菌种,保证处理系统氨氮的稳定去除能力。因此,在初期雨水处理过程中呈现出更好的氨氮抗冲击能力。

硝化细菌的世代时间较长,因此,生物膜厚度更厚、生物膜更新时间较长的生物帘 FBBR 表现出了更稳定的氨氮去除能力。

3 结论

(1)单一反应单元水力停留时间仅为 3.25 h 生物帘 FBBR 和悬浮填料 MBBR 在初期雨水设计进水水质条件下,即 COD 的质量浓度小于 100 mg/L,氨氮的质量浓度小于 15 mg/L 时,均能有效处理初期雨水,其出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类水标准。生物帘 FBBR 的 COD 去除率为 35%~85%,氨氮去除率为 95%~99%;悬浮填料 MBBR 的 COD 去除率为 21%~82%,氨氮去除率为 84%~99%。因此,处理工艺简单且不产生剩余污泥的生物膜处理技术非常适合应用于低污染初期雨水的处理。

(2)生物帘 FBBR 具有较厚的生物膜、较长的污泥龄、更优的微生物群落结构,因此,生物帘 FBBR 的氨氮抗冲击能力优于悬浮填料 MBBR。

参考文献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中国国家统计局, 2023.
National Bureau of Statistics of China. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the 2023 national economic and social development [R]. Beijing: National Bureau of Statistics of China, 2023.

[2] Risch E, Gasperi J, Gromaire M C, et al. Impacts from urban water systems on receiving waters-How to account for severe wet-weather events in LCA? [J]. Water Research, 2018, 128(1): 412-423.

[3] Peter K T, Hou F, Tian Z Y, et al. More than a first flush: Urban creek storm hydrographs demonstrate broad contaminant pollutographs[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6152-6165.

[4] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996, 30(5): 1244-1252.

[5] 洪忠. 城市初期雨水收集与处理方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 41-43.
Hong Z. Study on rainwater collection and treatment scheme in early city[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(6): 41-43.

[6] 邓志光, 吴宗义, 蒋卫列. 城市初期雨水的处理技术路线初探[J]. 中国给水排水, 2009, 25(10): 11-14.
Deng Z G, Wu Z Y, Jiang W L. Preliminary study on treatment of first-flush stormwater[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(10): 11-14.

[7] 胡煜. 合肥市肥西县老城区初期雨水处理厂工艺设计方案[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 47-51.
Hu Y. Design proposal of treatment process for the initial rainwater treatment plant in old town of Feixi County of Hefei City [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(7): 47-51.

[8] Ravel J, Gajer P, Abdo Z, et al. Vaginal microbiome of reproductive-age women [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (S1): 4680-4687.

[9] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, et al. The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR (enhanced biological phosphorus removal) plants[J]. Water Science and Technology, 2003, 47(11): 37-43.

[10] Zhang Y, Qiu X Q, Luo J H, et al. A review of the phosphorus removal of polyphosphate-accumulating organisms in natural and engineered systems[J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169103. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.169103.

[11] Sliekers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Research, 2002, 36(10): 2475-2482.

(上接第 87 页)

Wang F F, Qing X X, Yu S J. Optimal allocation method for implementation of river ecological water replenishment project [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(5): 48-52, 90.

[14] 吴雪, 何佳. EFDC 模型在城市景观水体生态补水工程设计中的应用——以昆明市翠湖为例[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 73-78.
Wu X, He J. The application of EFDC model in the design of ecological water supplement project for urban landscape water-case study of the greenlake in Kunming [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(1): 73-78.

[15] 郭雪蕊. 基于水动力学的武汉市东湖水质模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
Guo X R. Water quality simulation of East Lake in Wuhan City based on hydrodynamics [D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2018.

[16] 谢彪. 浅水湖泊二维水动力与水质数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Xie B. Study and Simulation on a shallow lake based on two-dimensional hydrodynamic and water quality model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[17] 周亚奇, 冯倩, 杨晖, 等. 灰色关联分析与模糊综合评价在水质评价中的对比应用研究[J]. 南昌工程学院学报, 2024, 43(3):26-30.
Zhou Y Q, Feng Q, Yang H, et al. Comparative application of gray correlation analysis and fuzzy comprehensive evaluation in water quality assessment [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2024, 43(3): 26-30.