

# 九江中心城区初期雨水面源污染MBBR工艺运行思路及停置期影响效果研究

吕药灵

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

## 摘要

鉴于初期雨水面源污染突发性、无规律性、非连续性等特点, 常规的活性污泥处理工艺难以有效应对。结合九江市中心城区降雨特征及工程实际应用需要, 首先提出MBBR工艺在雨天满负荷旱天低负荷运行的思路。发现雨天满水量负荷 $0.44 \text{ m}^3/\text{h}$ , 旱天在低水量负荷(10%雨天满负荷)情况下已经能够正常维持微生物活性并发挥良好的有机物去除效果, 进一步提高旱天水量负荷(提升至30%、50%、70%)对 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率无明显提高。其次研究了MBBR系统在长期未降雨时, 能接受的最大停置时间。结果表明, 在原水 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别 $98.67 \text{ mg/L}$ 和 $13.01 \text{ mg/L}$ , 停置期为4 d、6 d和8 d时, 出水 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 浓度均能达到地表IV类水标准; 停置期为4 d时, 出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度可达IV类水标准, 超过4 d后, MBBR系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果大幅度降低, 出水远超IV类水标准。此运行思路和试验参数可为实际工程运维调度及相关工程方案设计提供一定参考。

## 关键词

初雨污染, MBBR工艺, 停置期

## Analysis of Operation Idea of MBBR Process on the Initial Non-Point Source Pollution of Rainwater and the Impact Effect of Stationary Phase in Jiujiang Central Urban Area

Yaoling Lv

Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co. LTD., Shanghai

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 吕药灵. 九江中心城区初期雨水面源污染 MBBR 工艺运行思路及停置期影响效果研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 447-454. DOI: 10.12677/aep.2023.132056

## Abstract

On account of the sudden, irregularity and discontinuity of the initial rainwater, the conventional activated sludge treatment process is difficult to deal with effectively. Combined with the rainfall characteristics of central urban area of Jiujiang City and the practical application needs of the project, firstly the idea of MBBR process running at full load in rainy days and low load in dry days is put forward. It is found that the MBBR process could normally maintain the microbial activity and play a good effect of organic matter removal at the full water load in rainy days ( $0.44 \text{ m}^3/\text{h}$ ) and 10% full load in dry days. Further increasing the water load in dry days (to 30%, 50%, 70%) has no significant improvement on the removal rate of  $\text{COD}_{\text{cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$ . Secondly, the maximum outage period which MBBR system can accept when there is no rainfall for a long time is studied. The results show that when the concentrations of  $\text{COD}_{\text{cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  in raw water are  $98.67 \text{ mg/L}$  and  $13.01 \text{ mg/L}$ , respectively, and the stopover period was 4, 6 and 8 days, the effluent  $\text{COD}_{\text{cr}}$  concentrations could reach the surface water level of Class IV. When the stopping period is 4 days, the effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration can reach the Class IV water standard. More than 4 days, the removal effect of MBBR system on  $\text{NH}_3\text{-N}$  is greatly reduced, and the effluent is far beyond the class IV water standard. This running idea and test parameters can provide some reference for actual engineering operation and maintenance scheduling and related engineering scheme design.

## Keywords

Initial Rain Pollution, MBBR Process, Stationary Phase

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着习近平总书记提出“要把修复长江生态环境摆在压倒性位置，共抓大保护、不搞大开发”决策以后(以下简称“长江大保护”),长江沿线城市高度重视、积极落实。九江作为第一批开展“长江大保护”的四大城市之一,中心城区采取了一系列工程措施改善其水体环境。初期雨水未经处理排放为受纳水体带来大量面源污染,相关研究表明初期雨水中 SS、 $\text{COD}_{\text{cr}}$  浓度均超过《污水综合排放标准》二级标准[1][2],因此有必要进行处理后排放。目前我国尚未建立完善的处理排放标准[3],但九江湖泊明确以国家地表水环境质量 III 类水质为保护目标[4],结合其水环境容量,初期雨水处理后排放标准基本需达到地表水环境质量标准(GB 3838-2002) IV 类水质(以下简称“IV 类水”)方能满足要求,因此对初期雨水面源污染(以下简称“初雨污染”)处理工艺要求十分严格。

考虑到初雨污染具有突发性、分散性和非连续性,传统的活性污泥工艺无法有效应对,须探索安全可行的生物膜法确保处理效果。移动床生物膜反应器(以下简称“MBBR 工艺”)是一种高效的生物膜法污水处理工艺,向反应器中投加填料,作为微生物附着生长的载体,通过优化曝气、进水等水力条件使填料充分流化,创造优越的固、液、气三相反应空间,使水中污染物得以去除。该工艺融合了生物接触氧化与传统流化床的共同特点,运行灵活、抗冲击性强、污泥量少,广泛应用于生活污水和工业废水处理中[5][6][7]。有研究发现该工艺耦合 A/O 可高效去除  $\text{COD}_{\text{cr}}$  及凯氏氮[8],李春梅等人[9]研究发现通过对其填料亲水性改良进一步提高了其脱氮效率。部分学者针对盐度等影响因子进行了研究,发现盐度梯度驯化有望促进

MBBR 快速启动处理高盐度雨水[10], 赵佳伟等[11]研究发现随着驯化盐度的提升, 硝化生物膜成熟时间逐渐延长。事实上, 国内外对于 MBBR 处理初雨污染的研究及其工程实践很少。尤其在非连续性降雨下, 工艺如何运行既能确保未降雨时 MBBR 微生物系统充分维持其活性, 又能确保降雨发生时快速发挥其处理污染物的功能; 以及长期未发生降雨时, 该系统能接受的最大停置时间等相关数据和经验缺乏。因此本文以 MBBR 生物膜法为主要处理工艺, 结合九江相关工程的开展, 针对以上问题进行研究, 以期为其他地区初雨污染治理 MBBR 工艺提供相关经验及设计参数。

## 2. 试验方法

### 2.1. 试验装置

试验装置分为 4 组(1#~4#), 单组有效容积约  $1.32 \text{ m}^3$  ( $1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ )。装置内填充 HDPE 材质填料, 填充比为 45%, 有效生物膜面积约  $475.2 \text{ m}^2$ 。4 组装置前端设置有格栅及沉淀池等预处理装置(图 1)。



Figure 1. Schematic diagram of the pilot test device  
图 1. 中试试验装置示意图

### 2.2. 检测指标及方法

本工程对温度、DO 以及受纳水体比较敏感的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  等指标进行检测分析。温度采用水温计法; DO 采用电极法;  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  检测采用快速催化消解分光光度法;  $\text{NH}_3\text{-N}$  检测采用纳氏试剂分光光度法。此外, 本工程利用显微镜对 MBBR 反应装置中生物相进行了检测观察。

### 2.3. 研究内容及操作步骤

#### 2.3.1. 研究内容

根据 MBBR 工艺特征, 进水水质水量均衡稳定、污染物本底浓度、温度等外界条件直接决定了系统微生物的生长, 继而影响到该工艺对于污染物去除效果。本试验处理对象为雨水污染, 具有本底浓度低, 水量不稳定, 停置进水等特点, 对于 MBBR 系统的控制要求严格, 因此重点开展两个阶段试验。

第一阶段的内容包括以下方面:

- 1) 连续运行条件下, MBBR 工艺处理雨水污染适用效果研究。
- 2) 旱天不同进水负荷梯度对 MBBR 工艺去除雨水污染效果的影响。

第二阶段的内容包括以下方面:

- 1) 间歇运行条件下, MBBR 工艺处理雨水污染适用效果研究。
- 2) 不同停置期对 MBBR 工艺去除雨水污染效果的影响。

### 2.3.2. 操作步骤

雨天进水水源为周边管网雨水，旱天进水水源为周边管网的市政污水与湖水的混合水。源水经过前置的格栅及沉淀池处理后，去除掉大颗粒的杂质，继而进入 4 组 MBBR 反应单元。

第一阶段试验步骤如下：

在 2022 年 7 月 13 日至 8 月 22 日期间，发生降雨时 1#~4#MBBR 反应装置均满负荷运行(进水量为  $0.44 \text{ m}^3/\text{h}$ )，水力停留时间均为 3 h；未降雨时旱天 1#~4#反应装置低负荷运行，进水流量梯度分别为  $0.044 \text{ m}^3/\text{h}$  (10%满负荷)、 $0.132 \text{ m}^3/\text{h}$  (30%满负荷)、 $0.22 \text{ m}^3/\text{h}$  (50%满负荷)、 $0.308 \text{ m}^3/\text{h}$  (70%满负荷)，对应的水力停留时间为 30 h、10 h、6 h、4.29 h。运行期间于每天上午 10:00、下午 5:00 分别取样检测 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度。每周检测一次生物相。

第二阶段试验步骤如下：

在 9 月 1 日至 9 月 29 日期间开展停置运行，具体步骤为：① 停置期：第一阶段试验结束后，1#~4#反应单元均停置 8 d 再重启系统。② 重启期：重启时若为雨天，则进水为雨水，进水流量为  $0.44 \text{ m}^3/\text{h}$ ；重启时为旱天，则进水为周边管网的市政污水和湖水的混合水，流量为  $0.44 \text{ m}^3/\text{h}$ 。③ 恢复期：系统运行 3 d 后，若为雨天，则继续以雨水为原水，满负荷运行；若为旱天，则按照第一阶段旱天 1#~4#进水负荷控制，该阶段运行 4 d。④ 循环期：当第③阶段结束后，重复前①~③阶段运行内容，停置期依次调整为 6 d、4 d。运行期间于每天上午 10:00、下午 5:00 分别取样检测 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度。

## 3. 结果和讨论

### 3.1. 污染物去除效果分析

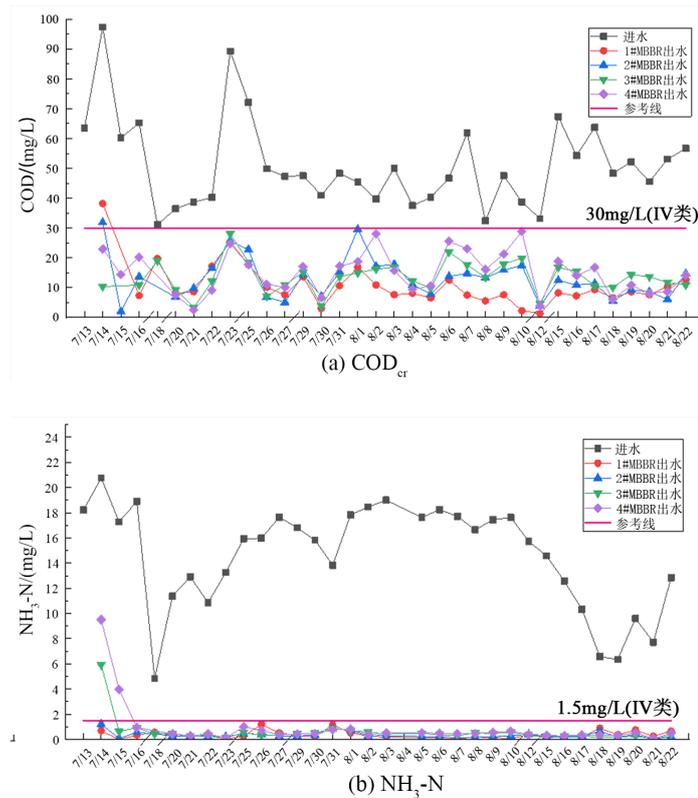
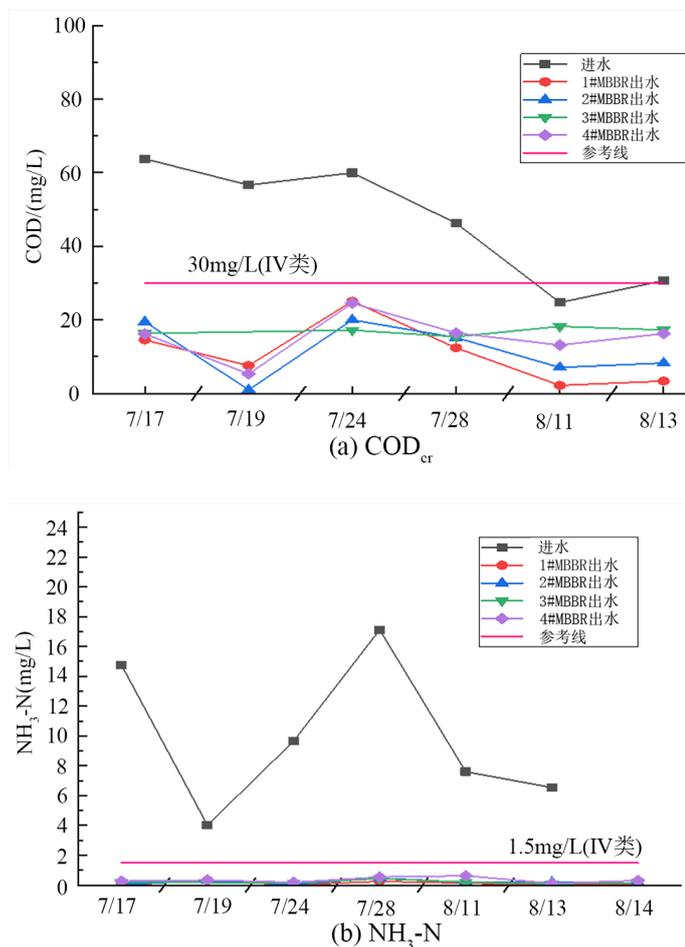


Figure 2. Variation of effluent  $\text{COD}_{\text{cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration in dry days in the first stage  
图 2. 第一阶段晴天中试装置出水  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度变化图



**Figure 3.** Variation of effluent COD<sub>cr</sub> and NH<sub>3</sub>-N concentration in rainy days in the first stage  
**图 3.** 第一阶段雨天中试装置出水 COD<sub>cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 浓度变化图

在 2022 年 7 月 13 日至 8 月 22 日试验期间，7 月 17 日、7 月 19 日、7 月 24 日、7 月 28 日、8 月 11 日、8 月 13 日为雨天，降雨量分别为 36 mm，18.8 mm，12.6 mm，1.3 mm，17.4 mm 和 43.2 mm。其余时间均为旱天。试验期间水温为 28.3℃~35.4℃，DO 浓度为 5.82 mg/L~6.90 mg/L。

从图 2 可知，晴天原水 COD<sub>cr</sub> 浓度均值为 51.26 mg/L，经过 MBBR 处理后，1#~4# 反应装置出水浓度均值分别为 10.77 mg/L、13.09 mg/L、13.47 mg/L、15 mg/L。原水 NH<sub>3</sub>-N 浓度均值为 14.59 mg/L，经过 MBBR 处理后，1#~4# 反应装置出水浓度均值分别为 0.36 mg/L、0.34 mg/L、0.58 mg/L、0.88 mg/L。1#~4# 反应装置对进水 COD<sub>cr</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 去除率均达到了 74% 和 90% 以上，效果良好。且 4 个反应装置去除率并无本质差别，COD<sub>cr</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N，出水 COD<sub>cr</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度均达到地表 IV 类水水平。

进一步研究，在 7 月 13 至 7 月 21 日期间，出水两指标稍有超 IV 类的情况，推测可能是由于该时间段系统刚启动，填料前长期时间空置，生物尚未充分发挥其活性。

雨天原水 COD<sub>cr</sub> 浓度均值为 47.01 mg/L。经过 MBBR 处理后，1#~4# 反应装置出水浓度均值分别为 10.86 mg/L、11.83 mg/L、16.89 mg/L、15.32 mg/L。雨天原水 NH<sub>3</sub>-N 浓度均值为 9.95 mg/L。经过 MBBR 处理后，1#~4# 反应装置出水浓度均值分别为 0.12 mg/L、0.19 mg/L、0.21 mg/L、0.34 mg/L。

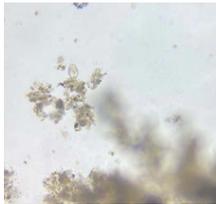
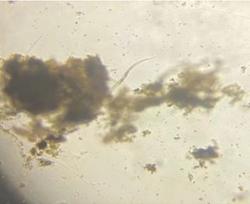
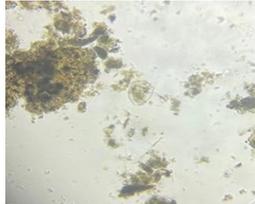
如图 2，图 3，横向对比晴、雨天水质数据，在九江市现状排水条件下，试验期间晴、雨天进水 COD<sub>cr</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度均为较低水平，晴天略高。MBBR 系统稳定后，在雨天满负荷旱天不同负荷梯度连续运行

的条件下, 该工艺对于雨水污染物均有良好去除效果。旱天 10%的低运行负荷下生物系统已经能够正常维持活性, 且发挥良好的污染物去除效果, 出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  可达到地表水 IV 类水平, 进一步提高旱天负荷比例对于整体去除率的提升未体现明显助益效果。因此在实际运维中, 可参考此实验结果, 控制旱天维护性运行水量为雨季满负荷的 10%左右, 从而在发挥微生物活性的同时降低运行成本。

### 3.2. 生物相的演变

通过 SEM 观察 1#~4#反应装置中微生物种类随时间增长的变化情况, 如表 1 所示。

**Table 1.** Microscopic examination of different MBBR reaction devices in the first stage  
**表 1.** 第一阶段不同 MBBR 反应装置微生物镜检

日期	1#系统	2#系统	3#系统	4#系统
7月22日	少量钟虫、楯纤虫、轮虫、线虫	钟虫、轮虫、累枝虫、楯纤虫、摩门虫、锤吸虫等	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫等;	钟虫、累枝虫、轮虫、楯纤虫、漫游虫、板壳虫、鞘居虫、鼬虫、喇叭虫
7月29日	钟虫、累枝虫、轮虫、鞘居虫、锤吸虫;	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫、鞘居虫、楯纤虫、游仆虫等	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫、鞘居虫、楯纤虫、游仆虫等	钟虫、累枝虫、轮虫、楯纤虫、赫纤虫等
8月5日	钟虫、累枝虫、轮虫、鞘居虫	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫、鞘居虫、匣壳虫	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫、鞘居虫、匣壳虫	钟虫、累枝虫、轮虫、鞘居虫、摩门虫等
8月9日	钟虫、累枝虫、轮虫、匣壳虫、锤吸虫	钟虫、累枝虫、轮虫、线虫、匣壳虫等	钟虫、轮虫、累枝虫、盖纤虫、摩门虫、锤吸虫、匣壳虫	钟虫、累枝虫、轮虫、腔轮虫、摩门虫、匣壳虫
镜检图				

7月22日, 4个反应系统均发现了水质良好的指示生物钟虫、累枝虫、轮虫。说明了试验开始一周后, 微生物系统逐渐形成并发挥去除污染物的作用, 这与上述7月22日后各系统污染物去除率良好且稳定的结论相一致。

随着运行时间增长, 4个反应装置中微生物种类和数量均呈现增加趋势。在同一时间, 雨天满负荷旱天低负荷运行条件下, 反应单元微生物数量和种类随着旱天运行负荷的增加逐渐递增, 系统形成稳定的优势菌群及微生物群落。

### 3.3. 不同停置期对污染物去除效果的影响

在原水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度分别 98.67 mg/L 和 13.01 mg/L, 停置期分别为 8 d、6 d、4 d 的情况下, 研究不同停置期对 1#~4#系统污染物去除效果的影响。

从表 2 可知, 停置期为 8 d、6 d、4 d 时, 各系统  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  出水浓度为 10.37 mg/L~24.79 mg/L, 均能达到地表水 IV 类水标准。这可能是由于进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  本底浓度较低, 不同的停置期对 MBBR 生物群落的活性虽有影响, 但微生物降解  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的功能仍得到发挥。

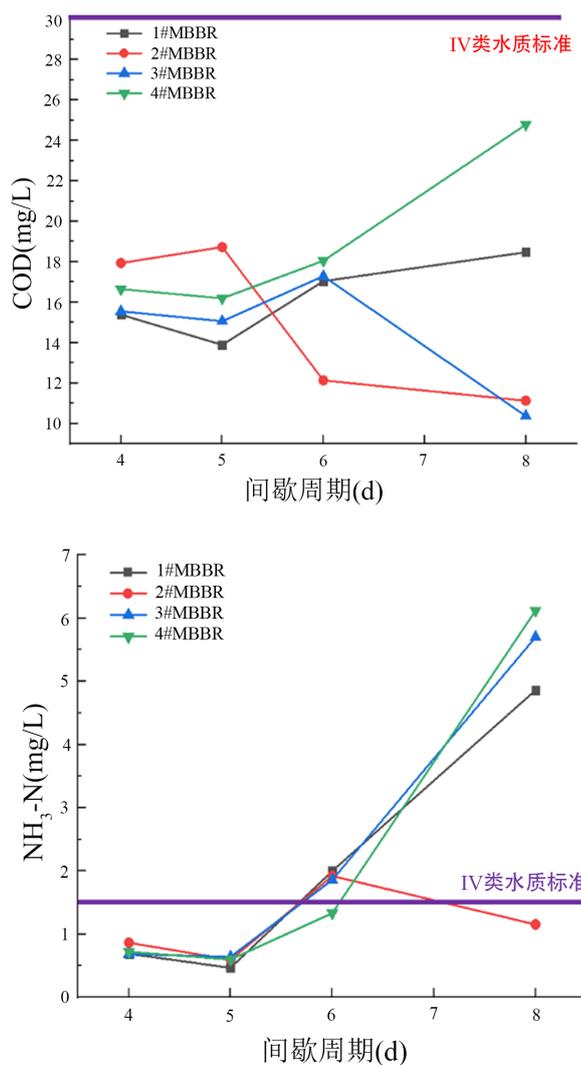
1#~4#反应装置  $\text{NH}_3\text{-N}$  出水浓度为 0.68 mg/L~6.12 mg/L。随着停置期的增加, 1#~4#系统出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均呈现显著增加趋势(图 4)。其中在在停置期为 4 d 时, 4 组反应单元出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度仍能稳定达标;

停置期超过 4 d 后(6 d、8 d), 4 组反应单元出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均超过地表 IV 类水标准, 无法发挥良好的去除效果。这可能是由于长时间未运行, MBBR 系统缺乏进水有机物补给, 硝化菌等微生物活性受到抑制, 无法充分发挥去除  $\text{NH}_3\text{-N}$  的功能, 长期停置或将引起微生物活性的丧失甚至系统崩溃。

**Table 2.** Water pollution index list of different batch period

**表 2.** 不同停置期出水污染指标一览表

MBBR 反应装置	停置期 8 d		停置期 6 d		停置期 4 d	
	$\text{COD}_{\text{cr}}$ (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	$\text{COD}_{\text{cr}}$ (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	$\text{COD}_{\text{cr}}$ (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)
1#	18.47	4.86	17.04	2.00	15.38	0.69
2#	11.13	1.15	12.13	1.92	17.94	0.86
3#	10.37	5.70	17.29	1.86	15.55	0.68
4#	24.79	6.12	18.05	1.33	16.65	0.72



**Figure 4.** Variation of effluent  $\text{COD}_{\text{cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration of four reaction units during different stationary phase  
**图 4.** 不同停置期四个反应装置出水  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度变化图

## 4. 结论

针对 MBBR 工艺处理非连续发生的雨水污染, 微生物活性难以维持, 去除效果难以保障的问题, 在九江市中心城区开展了试验研究, 提出了系统雨天满水量负荷运行去除初雨污染, 旱天低水量负荷运行维持生物活性的运行思路并对系统短期停置的影响进行了分析。

1、在雨天满水量负荷旱天切换为低水量负荷连续运行条件下, MBBR 工艺处理雨水污染是可行的, 且有较好的处理效果。

2、连续运行条件下, 旱天水量为雨天满负荷的 10%时, 已能够维持系统微生物活性并发挥污染物去除功能。随着旱天负荷梯度进一步增加, 系统中微生物种类和数量随之增加, 污染物去除率有适当提高但无明显差异。实际工程中, 建议结合不同地区地表降雨产污特性, 以 10%为基础或适当提高该比例, 充分发挥工程效益。

3、特殊情况需间歇运行时, 系统对停置期有严格要求。4 d 以上停置期或导致微生物活性及污染物去除率大幅度下降, MBBR 反应器面临崩溃的风险。实际应用中, 需严格控制间歇时间, 必要时采取其他措施, 确保系统稳定运行。

## 参考文献

- [1] 陶霞. 城市道路初期雨水快速处理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [2] 沈君, 胥桂萍, 张婷. 降雨径流对城市环境的污染分析[J]. 能源与环境, 2009(4): 57-58.
- [3] Butar, E.B., Sabar, A. and Handajani, M. (2015) Sustainable Urban Drainage System to Land Use/Land Cover Change in Samarinda, Indonesia. *Applied Mechanics and Materials*, 747, 371-374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.747.371>
- [4] 九江市城市湖泊保护条例[Z]. 2018.
- [5] 柴同志, 谢小龙, 乔新明. MBBR 工艺在几种典型废水处理中的应用[J]. 科技资讯, 2014(3): 136-137.
- [6] 王添添, 陈雪松, 薛建银. MBBR 处理模拟城市污水的动力学研究[J]. 浙江冶金, 2013(1): 4.
- [7] 宁守庆. MBBR 工艺在烟草行业污水处理改造的应用研究[J]. 科技风, 2011(12): 72-73.
- [8] 楼洪海, 王琪, 胡大镛, 等. MBBR 工艺处理化工废水中试研究[J]. 环境工程, 2008, 703(6): 61-62.
- [9] 李春梅. MBBR 填料表面亲水性改性及对污水厂尾水深度脱氮的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [10] 王娜, 张军港, 姚小然, 等. 滨海工业园区初期雨水 MBBR 工艺预处理研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 61-64.
- [11] 赵佳伟, 徐艳梅, 冯丽娟, 等. 盐度胁迫下 MBBR 系统硝化性能及生物膜特性[J]. 中国给水排水, 2015, 31(9): 6-10.