

清洗频率对固定床生物滤器水处理性能的影响

李 叶^{1,2}, 杜以帅^{1,3}, 徐建平^{1,2}, 邱天龙^{1,3}, 周 利^{1,3}, 孙建明^{1,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所 实验海洋生物学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 本实验基于一种新型的具有自洁功能的固定床生物滤器, 研究了不同的清洗频率: 0.5次/d (S1)、1次/d(S2)和 2次/d(S3)对生物滤器的硝化性能、截污能力和硝酸盐氮积累的影响。研究表明: 清洗频率对生物滤器去除氨氮(NH₄⁺-N)没有显著影响($P>0.05$); 在第 6~9 d 对生物滤器内亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)的浓度有显著影响($P<0.05$), 第 11 d 后均无显著影响($P>0.05$); 在整个实验过程中, S3 处理组与 S1、S2 处理组相比总固体悬浮物(TSS)去除分别提高 53.52%和 19.01%, 化学需氧量(COD_{Mn})去除分别提高 57.94%和 27.01%, 差异性显著($P<0.05$); 在硝酸盐氮(NO₃⁻-N)积累方面, S3 处理组积累最少, 在整个实验过程期间与 S1、S2 处理组相比分别降低 16.04%和 23.01%, 差异性显著($P<0.05$)。总体来说, 高清洗频率对生物滤器的硝化性能无显著影响, 但能使生物滤器截留的 TSS 快速排出系统, 从而减少系统内的水处理负荷和硝酸盐氮积累, 有利于系统的长期稳定运行。

关键词: 自洁生物滤器; 清洗频率; 硝化性能; 截污能力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)05-0122-09

DOI: 10.11759/hyqx20210117001

循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)利用一系列的水处理设备去除养殖水体中的有害物质, 实现水体的重复利用^[1], 具有高效节水、环保、可控等诸多优点, 是水产养殖业发展的重要方向之一^[2-3]。RAS 中养殖生物产生的代谢废物以及残饵是养殖水体的主要污染源^[4]。总固体悬浮物(total suspended solids, TSS)在 RAS 中的积累和分解矿化, 会导致养殖水体中氨氮、亚硝酸盐氮和化学需氧量浓度升高^[5-6], 从而影响养殖系统的负载及生物滤器的硝化功能^[7]。因此, 快速去除 RAS 中的固体悬浮物, 对维持系统净化效果, 避免水质下降, 保证养殖生物健康生长至关重要。生物滤器是 RAS 成功运行的关键, 对于养殖水体的净化和循环再利用起到关键作用^[8]。

固定床生物滤器比悬浮式生物滤器更稳定, 应用更加广泛^[9-11]。传统的固定床生物滤器类型多样, 其中浸没式生物滤器具有截留悬浮物、高效可控的优点, 但由于易堵塞、水流分布不均匀、老化菌膜不易排除等缺点, 限制了其广泛应用^[12-13]。本实验研究的固定床生物滤器是一种改进设计的具有自洁功能的固定床生物滤器, 其不仅具有悬浮物截留功能, 还可通过自清洗功能克服上述缺点, 但不同清洗频

率对自洁生物滤器的水处理能力影响尚未明确, 因此本实验设计不同的清洗频率, 探讨清洗频率对生物滤器水处理性能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为三套挂膜成熟的循环水养殖系统, 结构示意图如图 1 所示, 装置由微滤机过滤装置、蓄水池、自洁生物滤器、清洗装置和养殖池组成。

微滤机过滤装置为转鼓式微滤机, 网目 250 目。蓄水池为圆柱形, 直径 80 cm, 高 80 cm, 容积为 400 L。生物滤器为圆柱形, 直径为 40 cm, 高 180 cm, 由 PVC 材料制成, 在底部安装筛板以支撑生物填料。生物填料为纤维球, 其具有截污能力强、过滤精度

收稿日期: 2021-01-17; 修回日期: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900502); 广西科技重大专项(桂科 AA17204094-3)

[Foundation: National Key R&D Program, No. 2019YFD0900502; Science and Technology Major Project of Guangxi, No. AA17204094-3]

作者简介: 李叶(1994—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事循环水养殖生态学及水污染控制研究, 电话: 0532-82898031; E-mail: 2301093152@qq.com; 孙建明(1960—), 通信作者, 男, 研究员, 主要从事工厂化循环水养殖工艺与装备研发, 电话: 0532-82863893, E-mail: sjmqd@qdio.ac.cn

高等特性^[14], 填料比表面积为 3 000 m²/m³, 填充率为 100%。清洗装置由 PVC 材料制成, 下方连接筛板, 上方连接电机, 中间支柱部分直径为 10 cm, 高为 160 cm, 中间支柱周围制成螺旋形状, 并采用上流式旋转搅动填料, 转速控制在 0.5 r/s。自洁生物滤器清洗时, 清洗装置由生物滤器顶部电机带动, 采用

上流水方式搅动填料, 同时电动阀开启, 生物滤器出水流向微滤机, 利用微滤机滤除生物滤器中经生物膜絮凝的固体颗粒物。养殖池的直径为 100 cm, 水位高为 50 cm, 容积为 300 L, 每组设 3 个平行。系统利用液体流量计以精确控制流量, 确保每个养殖池水力负荷相同。

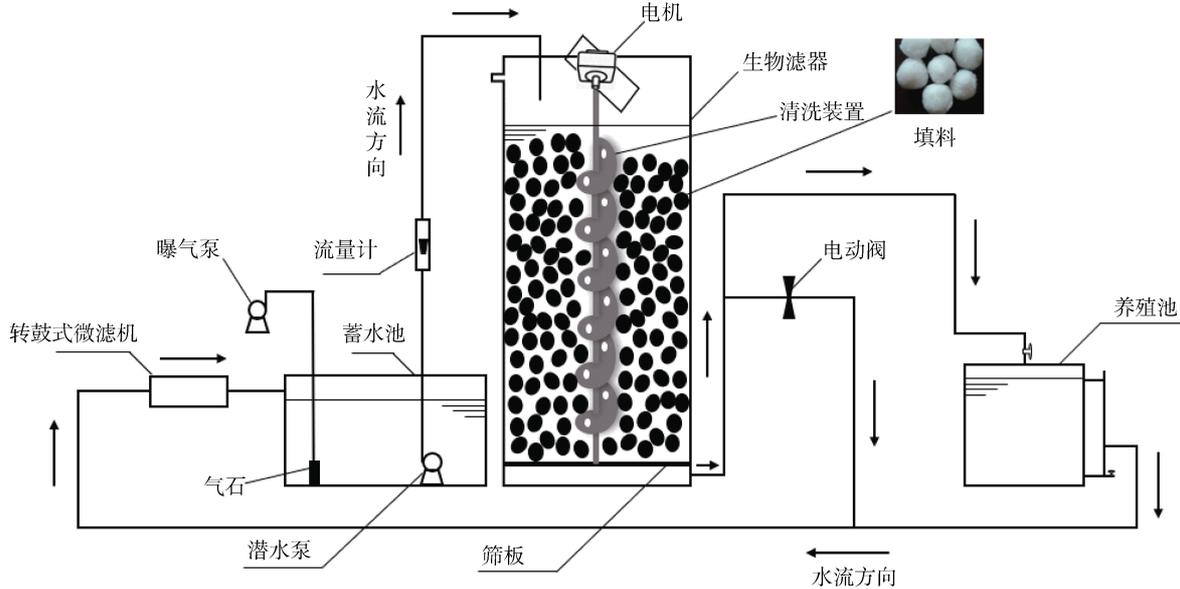


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental device diagram

1.2 实验负载

养殖过程中的主要负载是未被摄食的残饵和养殖生物的粪便。为了真实还原实际生产养殖过程, 本实验所用养殖负载是养殖场中所收集的凡纳滨对虾的残饵、粪便, 每日将养殖负载定时、定量向养殖池添加, 每个养殖池每天大约添加干重 100 g, 每套系统每天共加入干重 300 g。

1.3 实验设计

实验采用三组挂膜成熟的自洁生物滤器装置, 自清洗频率分别设置为 0.5 次/d (S1)、1 次/d (S2)、2 次/d (S3), 每组进水流量为 900 L/h, 养殖系统循环次数为 1.5 次/h。每天在添加实验负载前, 分别在生物滤器的进水口、出水口取水样, 自清洗 10 s 后在生物滤器出水口取水样, 进行各项水质指标的检测, 包括氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总固体悬浮物、化学需氧量。实验为循环水系统, 由于同一时间点生物滤器进出水口的氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮浓度差异小, 因此实验取生物滤器的进水口水质指标

进行分析。实验期间溶氧(DO)保持在 7.0~9.0 mg/L, 温度为 15~19℃, 盐度为 20, pH 为 7.7~8.1。

1.4 水质指标测定与数据分析

1.4.1 水质指标测定

水质指标的测定参照海洋监测规范(GB 17378.4—2007)及其优化方法, 氨氮采用纳氏试剂比色法^[15], 亚硝酸盐氮采用萘乙二胺分光光度法^[16], 硝酸盐氮采用紫外分光光度法^[17], 总固体悬浮物采用重量法, 化学需氧量采用碱性高锰酸钾法^[16], DO、温度、pH 采用 YSI—556(美国)多参数水质分析仪检测。

1.4.2 数据分析

生物滤器污染物的去除量 R 和去除率 η 的计算公式如下:

$$R=c_1-c_2, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{c_1-c_2}{c_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, R 为污染物去除量, mg/L; η 为污染物去除率, %; c_1 为生物滤器进水中污染物的平均质量浓度, mg/L; c_2 为生物滤器出水中污染物的平均质量浓度, mg/L。

采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)评价相关水质指标显著性差异水平。实验结果表示为平均值±标准差(mean±S.D.), 显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 清洗频率对生物滤器硝化性能的影响

清洗频率对生物滤器氨氮变化的影响如图 2a 所示。图中显示三个处理组中的氨氮浓度变化趋势基本一致, 均是先升高后降低最后趋于稳定。S2

处理组和 S1 处理组均在实验第 8 d 达到了氨氮浓度的最大值, 第 8 d 之后 S2 处理组和 S1 处理组的氨氮浓度迅速下降, 且 S2 处理组比 S1 处理组氨氮浓度降低的速度快。S3 处理组在实验第 6 d 氨氮浓度达到最高, 且达到的最高氨氮浓度比 S2 处理组和 S1 处理组低, 第 6 d 之后 S3 处理组氨氮浓度开始下降, 实验最后两天三个处理组的氨氮浓度降为 0.04 mg/L 左右, 差异性不显著($P<0.05$)。S3 处理组的氨氮下降时间比 S2 处理组和 S1 处理组提前两天。

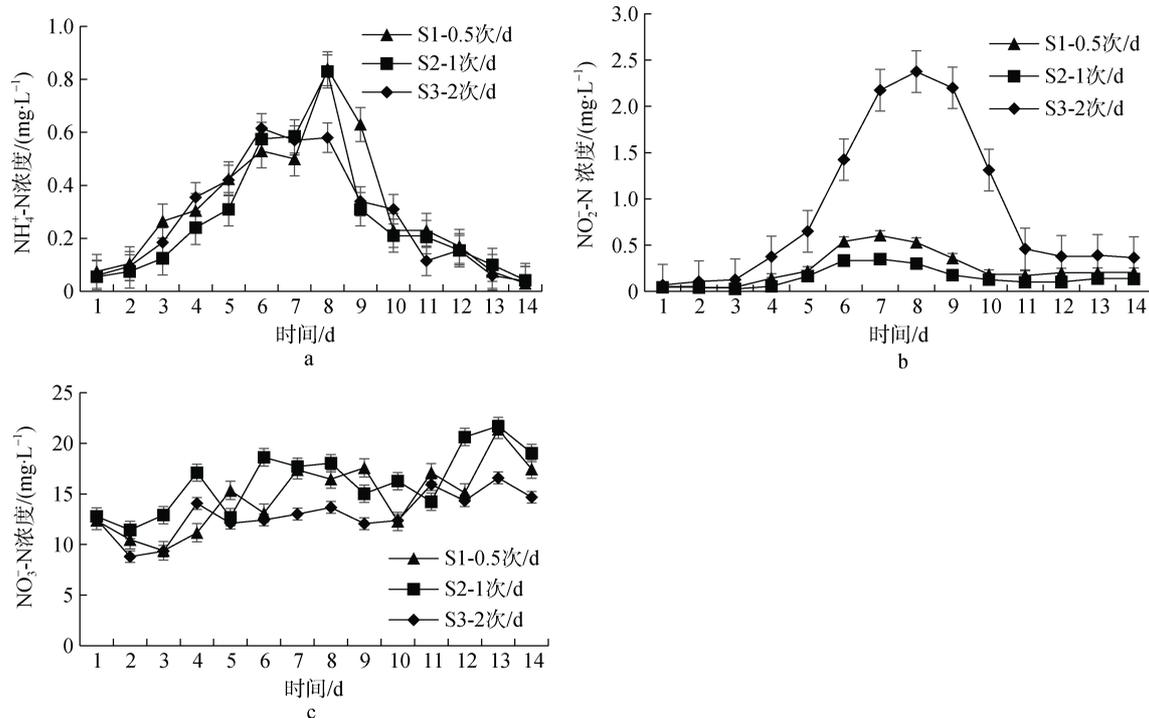


图 2 不同清洗频率实验组氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮变化

Fig. 2 Changes of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen in different cleaning frequency test groups

清洗频率对生物滤器亚硝酸盐氮变化的影响如图 2b 所示。图中显示三个处理组的亚硝酸盐氮浓度变化趋势均先升高后降低最后趋于稳定。S2 处理组和 S1 处理组的亚硝酸盐氮浓度达到的最大值分别为 0.34 mg/L 和 0.67 mg/L, 而 S3 处理组的亚硝酸盐氮的浓度最大值达到了 2.4 mg/L。在整个实验期间 S3 处理组亚硝酸盐氮浓度最高, S1 处理组次之, S2 处理组最低。S2、S1 和 S3 处理组的亚硝酸盐氮浓度下降时间分别为实验开展的第 6 d、第 7 d 和第 8 d。在实验开展的第 5 d 至第 10 d, S3 处理组中亚硝酸盐氮浓度均显著高于 S2 处理组和 S1 处理组($P<0.05$), 在实验开展的第 6 d 至第 9 d, S1 处理组中亚硝酸盐氮的

浓度显著高于 S2 处理组($P<0.05$)。而 S2、S1 和 S3 处理组的亚硝酸盐氮浓度在实验第 11 d 之后分别稳定在 0.13 mg/L、0.21 mg/L 和 0.26 mg/L, 差异性不显著($P<0.05$)。

清洗频率对生物滤器硝酸盐氮变化的影响如图 2c 所示, 图中显示在实验期间三个处理组的硝酸盐氮的浓度上下波动, 但三个处理组的硝酸盐氮浓度总体是增加的趋势。实验第 1 d, 三个处理组的硝酸盐氮无明显差异($P>0.05$), 实验第 7 d 和实验第 14 d, S3 处理组的硝酸盐氮含量低于 S1 和 S2 处理组, 且差异性显著($P<0.05$)。实验到第 14 d S3 处理组硝酸盐氮含量分别比 S1 和 S2 处理组低了 16.04% 和 23.01%。

2.2 清洗频率对生物滤器截污能力的影响

2.2.1 清洗频率对 COD_{Mn} 的影响

自清洗频率对生物滤器中 COD_{Mn} 的影响如图 3 所示。从图中可以看出三个处理组生物滤器进出水口的 COD_{Mn} 含量均随着残饵粪便量的增加而逐渐升高。清洗频率不同, 三个处理组生物滤器中 COD_{Mn} 的含量也不同, S2 处理组比 S1 处理组和 S3 处理组的 COD_{Mn} 含量高, 而 S1 处理组的 COD_{Mn} 含量在整个试验期间最低。但三个处理组生物滤器的进水口和出水口 COD_{Mn} 含量均比较低, 能够保证水体较好

的清洁度。S1 处理组(图 3a)对 COD_{Mn} 的去除率在试验前 5 d 处于波动状态, 波动范围在 5%~25%左右, 但在试验开展的第 6 d 至第 14 d 内基本稳定在 12%左右。S2 处理组(图 3b)中 COD_{Mn} 的去除率在试验前 4 d 不断升高, 试验第 4 d 后除第 11 d 外, 去除率在 9%左右波动。S3 处理组(图 3c)中 COD_{Mn} 去除率不稳定且波动范围比较大, 其中 S3 处理组对 COD_{Mn} 的去除率在试验前 5 d 在 13%~26%之间波动, 试验开展第 6 d 后对 COD_{Mn} 的去除率在 8%~25%之间波动。

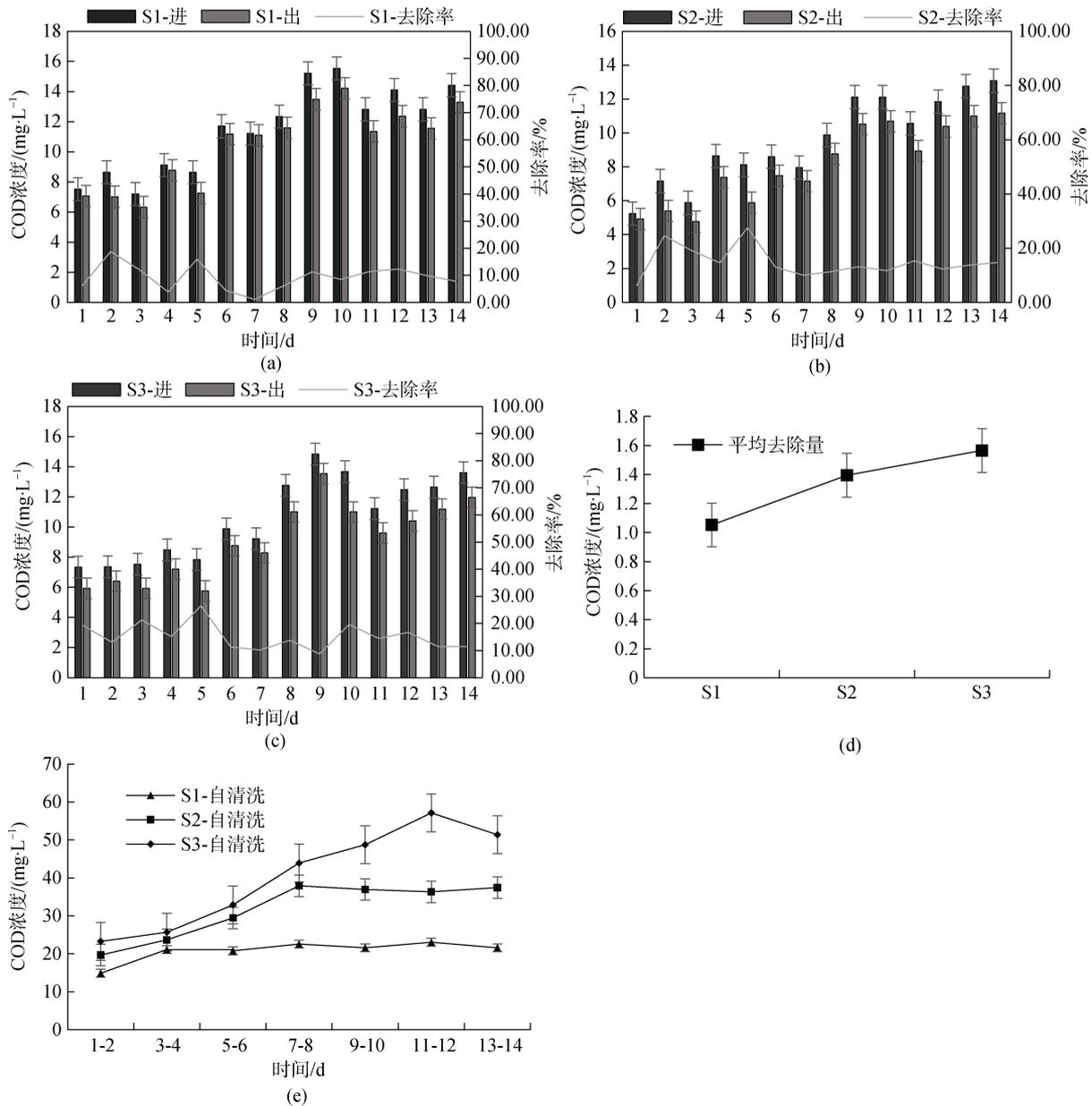


图 3 实验期间各处理组生物滤器进、出口 COD_{Mn} 去除率、平均去除量及清洗后 COD_{Mn} 的变化

Fig. 3 Changes in the inlet and outlet COD_{Mn} removal rate, average removal volume, and COD_{Mn} after cleaning of the biofilter of each treatment group during the test

图 3d 表示整个实验周期三个处理组的生物滤器在 14 d 的实验周期内进水口 COD_{Mn} 总量与出水口 COD_{Mn} 总量差的平均量。结果显示, S1 处理组的平均去除量最低, 且与另外两组差异性显著 ($P < 0.05$), S3 处理组平均去除量最高, 但与 S2 处理组之间差异性不显著 ($P > 0.05$)。图 3e 表示每两天三个处理组清洗之后生物滤器出水口的 COD_{Mn} 含量, 均随着残饵粪便量的增加而逐渐升高。清洗后生物滤器出水口中 S3 处理组 COD_{Mn} 浓度最高, S2 处理组次之, S1 处理组最低, 且三个处理组之间 COD_{Mn} 含量差异性显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 清洗频率对 TSS 的影响

清洗频率对生物滤器的 TSS 的影响如图 4 所示。从图 4a 中可以看出三个处理组生物滤器进水口的

TSS 含量均随着残饵粪便量的增加而逐渐升高, 且 S1 处理组含量最高, 与另外两组相比差异性显著 ($P < 0.05$), S2 处理组次之, S3 处理组最低。图 4b 显示三个处理组生物滤器出水口的 TSS 含量趋势和进水口一致, 且 S1 处理组含量最高, S2 处理组次之, S3 处理组最低。图 4c 表示整个实验周期三个处理组的生物滤器进、出水口 TSS 平均去除量。结果显示, S1 处理组的平均去除量最高, 且与另外两组差异性显著 ($P < 0.05$), S3 处理组平均去除量最低, 与 S2 处理组之间差异性不显著 ($P > 0.05$)。图 4d 表示每两天三个处理组清洗之后生物滤器出水口的 TSS 含量, 均随着残饵粪便量的增加而逐渐升高。清洗后生物滤器出水口中 S3 处理组 TSS 浓度最高, S2 处理组次之, S1 处理组最低, 且三个处理组之间 TSS 含量差异性显著 ($P < 0.05$)。

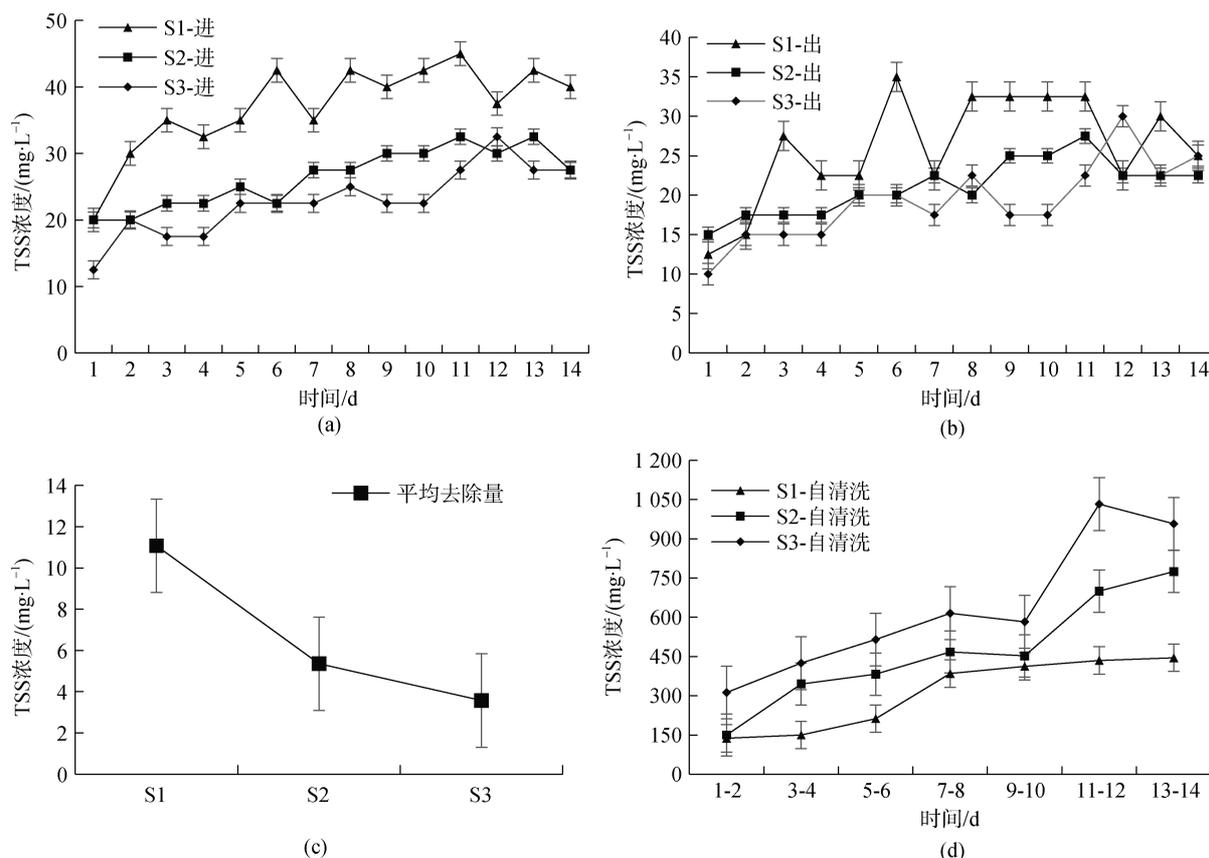


图 4 实验期间各处理组生物滤器进、出口 TSS、平均去除量及清洗后 TSS 的变化

Fig. 4 Changes in the inlet and outlet TSS, average removal volume, and TSS after cleaning the biofilter of each treatment group during the test

3 讨论

3.1 清洗频率对生物滤器硝化性能的影响

氨氮和亚硝酸盐氮逐步积累并达到一定的程度

后会对养殖生物产生明显的毒害作用, 因此控制水体中氨氮和亚硝酸盐氮的浓度尤为重要^[18]。水体中绝大部分的氮是通过养殖生物的新陈代谢作用产生的^[19]。本实验中氨氮主要来源于残饵粪便在微生物

作用下的分解释放。随着残饵粪便量的不断增加,不同的清洗频率导致三个处理组具有不同的颗粒物含量,经过微生物的分解释放使三个处理组的氨氮浓度产生差异,这与王华等^[20]关于工厂化不同密度下养殖生物对养殖水体的水质影响的研究结果一致。随着氨氮浓度的升高,生物膜上微生物活性、数量和优势菌也增多^[21],后经氨氧化细菌(AOB)转化为亚硝酸盐氮使氨氮浓度逐步下降。清洗频率次数多去除的颗粒物量多,减少了氨氮的释放,从而使 S3 处理组氨氮浓度比 S2、S1 处理组提前下降。

水体中的氨氮经过 AOB 作用转化为亚硝酸盐氮,随着残饵粪便量的增加,亚硝酸盐氮的浓度逐渐升高,后经过亚硝酸盐氧化菌(NO₂-N)的作用转化为硝酸盐氮。AOB 相比 NO₂-N 对环境的适应性更强,世代周期短,生长速度快,即当 AOB 的活性高于 NO₂-N 时,氨氮转化为亚硝酸盐氮的速率大于亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮的速率时,会造成亚硝酸盐氮的积累现象^[22]。实验结果表明, S3 处理组的亚硝酸盐氮含量在实验中期阶段远大于 S2、S1 处理组。因为生物膜上的微生物时刻在更新换代,老化的生物膜脱落,而生物滤器中微生物的生长代谢及活性受环境因子的影响,进而影响生物滤器的水处理能力^[23]。S3 处理组亚硝酸盐氮中期浓度高,分析原因认为一方面由于 NO₂-N 对环境的适应性不强^[24],频繁的搅拌会破坏 NO₂-N 适宜的生长环境,使附着在生物填料上面的 NO₂-N 的繁殖代谢变慢,无法及时补充生物膜上脱落的 NO₂-N; 另一方面,频繁的搅拌使附着不牢固的微生物脱落。但随着实验的进行,最后 S3 处理组的亚硝酸盐氮浓度降低到低水平,与 S1、S2 处理组无明显差异,说明 S3 处理组中微生物逐渐适应其环境变化,使 S3 处理组的微生物菌膜附着更牢固,生物滤器的水处理能力更稳定。

硝酸盐氮的毒性与氨氮和亚硝酸盐氮相比较小,有研究表明高浓度的硝酸盐氮对养殖生物的生长有抑制作用,认为应将硝酸盐氮的浓度控制在 50 mg/L 以下的安全范围内^[25]。本实验三个处理组硝酸盐氮的浓度均在安全范围以内。研究表明,当 DO<0.2 mg/L 时会发生厌氧反硝化^[26],本实验中生物滤器的底部有可能会由于氧气不足,发生反硝化反应,去除少部分的硝酸盐氮。三个处理组初始硝酸盐氮浓度差异不明显,但实验结束后 S3 处理组硝酸盐氮含量明显低于 S1、S2 处理组,说明频繁的清洗减少了系统内的

有机物含量,从而减少了硝酸盐氮的积累。硝酸盐氮作为氮的最终产物,其含量减少会降低系统中的氮含量,保证生物滤器的水处理功能,从而使水质保持稳定,也为后续的尾水处理环节减轻了负担。

3.2 清洗频率对生物滤器截污能力的影响

COD_{Mn} 反映了水体中有机物的污染程度,含量越高,水体受到的有机物污染越重^[27]。COD_{Mn} 氧化分解会消耗大量的氧气,加快水质恶化进程,增大病害风险^[28],因此控制养殖水体中的有机物含量是十分必要的。实验期间, S1、S2 和 S3 处理组的生物滤器进出水口的 COD_{Mn} 含量均是 S1 处理组最高, S2 处理组次之, S3 处理组最低,说明实验期间循环水系统中 COD_{Mn} 含量 S1 处理组最高, S2 处理组次之, S3 处理组最低。这是因为 S1 处理组清洗频率低,清洗之后去除的 COD_{Mn} 量少,而 S3 处理组清洗频率高,能将更多的 COD_{Mn} 量去除系统,从而降低系统中 COD_{Mn} 含量。生物膜属于一个微生态系统,前期硝化菌和异养菌存在着竞争关系^[21],而随着有机物和氮含量的升高,异养菌和硝化菌维持动态平衡,系统运行稳定^[27]。S3 处理组因为频繁的清洗搅拌破坏了异养菌和硝化菌的平衡,硝化菌对环境的适应能力差^[24],异养菌占优势时其降解有机物的量高,从而导致实验期间生物滤器进出水口的 COD_{Mn} 含量波动大,使 S3 处理组的 COD_{Mn} 的去除率较高且平均去除量高,而 S1 处理组清洗次数少,异养菌和硝化菌维持动态平衡,生物滤器进出水口的 COD_{Mn} 含量差异小,因此 S1 处理组平均去除量低。

循环水系统是复杂的生态系统,残饵粪便不及时清理,会在水中形成悬浮颗粒,造成填料表面阻塞、降低硝化效率,使养殖水体腐殖质积累,易使细菌大量繁殖^[29]。实验期间,由于 S1 处理组清洗频率低,排出系统的 TSS 量少; S3 处理组清洗频率高,排出系统的 TSS 量高,导致循环水系统中 TSS 含量 S1 处理组最高, S2 处理组次之, S3 处理组最低,解决了传统浸没式生物滤器易堵塞,老化菌膜不易清除^[12]的缺点。TSS 的高效去除可以保证循环水系统的水质稳定,缩小生物滤器的规模,节省投资和占地面积。生物滤器出水均经过纤维球过滤,三个处理组填料填充率相同, S1 处理组清洗频率低导致生物滤器截留的颗粒物含量高,会造成一定的堵塞,因此导致 S1 处理组生物滤器进出水口 TSS 平均去除量最高,而 S2 处理组次之, S3 处理组最低。

4 结论

(1) 系统建立初期自洁生物滤器的硝化性能受清洗频率的影响, 长期看影响较小, 差异不显著。但由于 S3 处理组清洗频率高, 减少了氮的释放, 最终与 S1、S2 处理组相比硝酸盐氮含量低, 降低了系统中的氮含量。

(2) 由于 S3 处理组清洗频率高, 与 S1、S2 处理组相比能去除较多的 TSS 量和 COD_{Mn} 量, 从而使 S3 处理组系统中 TSS 和 COD_{Mn} 含量低于 S1 和 S2 处理组, 减少生物滤器的水处理负荷, 保持水质稳定。

(3) 综合清洗频率对自洁生物滤器的硝化性能和截污能力的影响, 应适当增加生物滤器的清洗频率, 在本实验条件下自洁生物滤器自清洗频率 2 次/d 效果较好。

参考文献:

- [1] DALSGAARD J, LUND I, THORARINSDOTTIR R, et al. Farming different species in RAS in NORDIC countries: current status and future perspectives[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 53: 2-13.
- [2] 赵越, 刘鹰, 李贤, 等. 工业化循环水养殖系统移动床生物膜反应器的设计[J]. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(5): 639-643.
ZHAO Yue, LIU Ying, LI Xian, et al. Design of moving bed biofilm reactor for industrial circulating aquaculture system[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(5): 639-643.
- [3] 张业韡, 吴凡, 陈翔, 等. 基于易控的工业化循环水养殖系统[J]. *渔业现代化*, 2017, 44(1): 21-25.
ZHANG Yewei, WU Fan, CHEN Xiang, et al. Industrial recirculating aquaculture system based on easy control[J]. *Fishery Modernization*, 2017, 44(1): 21-25.
- [4] 付成东, 刘华兵, 杨志, 等. 国内循环水养殖发展中的残饵粪便污染与治理现状分析[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(32): 76-79.
FU Chengdong, LIU Huabing, YANG Zhi, et al. Analysis on the pollution and treatment of residual bait and faeces in the development of recirculating aquaculture system in China[J]. *Anhui agricultural sciences*, 2018, 46(32): 76-79.
- [5] CHIAM C K, SARBATLY R. Purification of Aquacultural Water: Conventional and New Membrane-based Techniques[J]. *Separation & Purification Methods*, 2011, 40(2): 126-160.
- [6] TACON A G J, FORSTER I P. Aquafeeds and the environment: policy implications[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1): 181-189.
- [7] MICHAUD L, BLANCHETON J P, BRUNI V, et al. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 224-233.
- [8] 罗国芝, 陈家捷, 于文杰, 等. 一株新型异养硝化细菌处理养殖水的效果[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4206-4212.
LUO Guozhi, CHEN Jiajie, YU Wenjie, et al. Treatment effect of a new type of heterotrophic nitrifying bacteria on aquaculture water[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2016, 10(8): 4206-4212.
- [9] CAMPOS J L, GARRIDO J M, MOSQUERA-CORRAL A, et al. Stability of a nitrifying activated sludge reactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 35(1): 87-92.
- [10] COYTE K Z, TABUTEAU, HERVÉ, GAFFNEY E A, et al. Microbial competition in porous environments can select against rapid biofilm growth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 114(2): E161.
- [11] MALONE R F, PFEIFFER T J. Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 389-402.
- [12] 吴嘉敏, 孙大川. 循环水养殖系统中浸没式生物滤器的水处理效果[J]. *上海水产大学学报*, 2007, 6: 542-548.
WU Jiamin, SUN Dachuan. Water treatment effect of submerged biological filter in circulating aquaculture system[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, 6: 542-548.
- [13] 罗国芝, 曹宝鑫, 陈晓庆, 等. 循环水养殖系统中几种常用的固定膜式生物过滤器[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(1): 5-11.
LUO Guozhi, CAO Baoxin, CHEN Xiaoqing, et al. Several commonly used fixed membrane biological filters in circulating aquaculture systems[J]. *Fisheries Modernization*, 2018, 45(1): 5-11.
- [14] 于广明. 纤维球污水处理技术的研究与应用[J]. *石油知识*, 2017, 2: 52-53.
YU Guangming. Research and application of fiber ball wastewater treatment technology[J]. *Petroleum Knowledge*, 2017, 2: 52-53.
- [15] 闫修花, 王桂珍, 陈迪军. 纳氏试剂比色法测定海水中的氨氮[J]. *环境监测管理与技术*, 2003, 3: 21-23.
YAN Xiuhua, WANG Guizhen, CHEN Dijun. Determination of Ammonia Nitrogen in Seawater by Nessler's Reagent Colorimetry[J]. *Management and Technology of Environmental Monitoring*, 2003, 3: 21-23.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB17378.4—2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB17378.4-2007 Marine Monitoring Specification Part 4: Seawater Analysis[S]. Beijing: China Standard Protection Board, 2007.
- [17] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
National Environmental Protection Agency Book Edition Committee. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [18] 迟爽, 曾勇, 赵振军, 等. 刺参养殖池塘的水质变化[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(3): 239-244.
CHI Shuang, ZENG Yong, ZHAO Zhenjun, et al. Water quality changes in sea cucumber breeding ponds[J]. Journal of Jinan University(Natural Science Edition), 2013, 27(3): 239-244.
- [19] CRIPPS S J, BERGHEIM A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems[J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22(1-2): 33-56.
- [20] 王华, 李勇, 陈康, 等. 工厂化养殖半滑舌鳎生长、摄食和水质的变化特征及规律[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(4): 52-59.
WANG Hua, LI Yong, CHEN Kang, et al. The growth, feeding and water quality characteristics and regularities of factory farmed semi-smooth tongue sole[J]. Journal of Water Ecology, 2009, 30(4): 52-59.
- [21] 李秋芬, 傅雪军, 张艳, 等. 循环水养殖系统生物滤池细菌群落的 PCR-DGGE 分析[J]. 水产学报, 2011, 35(4): 579-586.
LI Qiufen, FU Xuejun, ZHANG Yan, et al. PCR-DGGE analysis of bacterial communities in biological filters of circulating aquaculture system[J]. Acta Fisheries Sinica, 2011, 35(4): 579-586.
- [22] 高霄龙, 刘鹰, 李贤, 等. 鲍放养密度对循环水养殖水质的影响及生物滤器净化效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 244-252.
GAO Xiaolong, LIU Ying, LI Xian, et al. The effect of abalone stocking density on the water quality of circulating aquaculture and the purification effect of biofilter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 244-252.
- [23] 杨志强, 朱建新, 刘慧, 等. 环境因子对循环水养殖系统中生物膜净化效率影响综述[J]. 渔业现代化, 2014, 41(6): 14-17.
YANG Zhiqiang, ZHU Jianxin, LIU Hui, et al. Overview of the impact of environmental factors on the purification efficiency of biofilms in circulating aquaculture systems[J]. Fishery Modernization, 2014, 41(6): 14-17.
- [24] 徐建平, 赵越, 李贤, 等. 温度和 pH 对海水曝气生物滤器硝化性能的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 558-565.
XU Jianping, ZHAO Yue, LI Xian, et al. The influence of temperature and pH on the nitrification performance of seawater aerated biological filter[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(4): 558-565.
- [25] BOYD C E. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level[J]. Aquaculture, 2003, 226(1/4): 101-112.
- [26] KNOWLES R K H R. Production of nitrous oxide by Nitrosomonas europaea: effects of acetylene, pH, and oxygen[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1984, 30(11): 1397-1404.
- [27] 朱建新, 刘慧, 徐勇, 等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 118-124.
ZHU Jianxin, LIU Hui, XU Yong, et al. The membrane technology of biological filter load in circulating aquaculture system[J]. Progress in Fisheries Science, 2014, 35(4): 118-124.
- [28] 马晓娜, 李蕊, 孙国祥, 等. 贝藻混养对大西洋鲑养殖废水的生物滤除[J]. 海洋科学, 2016, 40(1): 32-39.
MA Xiaona, LI Rui, SUN Guoxiang, et al. Biofiltration of Atlantic salmon farming wastewater by shell and algae polyculture[J]. Marine Sciences, 2016, 40(1): 32-39.
- [29] 刘颖, 李丽, 孙大川, 等. 循环水养鳗系统生物过滤器中微生物群落的代谢特性[J]. 水产学报, 2015, 39(10): 1539-1548.
LIU Ying, LI Li, SUN Dachuan, et al. Metabolic characteristics of microbial communities in the biological filter of circulating water eel culture system[J]. Acta Fisheries Sinica, 2015, 39(10): 1539-1548.

Effect of cleaning frequency on water treatment performance of fixed bed biofilter

LI Ye^{1, 2}, DU Yi-shuai^{1, 3}, XU Jian-ping^{1, 2}, QIU Tian-long^{1, 3}, ZHOU Li^{1, 3},
SUN Jian-ming^{1, 3}

(1. Key Laboratory of Experimental Marine Biology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 17, 2021

Key words: auto-cleaning biological filter; cleaning frequency; nitrification performance; pollution interception capacity

Abstract: The experiment is based on a new type of fixed bed biofilter with a auto-cleaning function. Different cleaning frequencies were studied, such as 0.5 times/d (S_1), 1 time/d (S_2), and 2 times/d (S_3) for biological filters, and the influence of nitrification performance, pollution interception capacity, and nitrate nitrogen accumulation. Studies have shown that the cleaning frequency has no significant effect on the removal of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) from the biofilter ($P>0.05$); it has a significant effect on the concentration of nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) in the biofilter from days 6 to 9 ($P<0.05$), but there was no significant effect after the 11th day ($P>0.05$). During the entire experiment, the total solid suspended solids (TSS) removal in the S_3 treatment group was increased by 53.52% and 19.01% compared with the S_1 and S_2 treatment groups, respectively; chemical oxygen demand (COD_{Mn}) removal increased by 57.94% and 27.01%, respectively, which had a significant difference ($P<0.05$); the accumulation of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) in the S_3 treatment group was the least, which was 16.04% and 23.01% lower than that in S_1 and S_2 treatment groups during the whole experiment, respectively, and the difference was significant ($P<0.05$). High cleaning frequency has no significant effect on nitrification performance of the biofilters; however, it may reduce the water treatment load and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ accumulation in the system by rapidly removing the TSS retained by biofilters; it is beneficial to the long-term stable operation of the system.

(本文编辑: 康亦兼)