

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.003

多层纤维球生物滤池净化工厂化养殖循环水处理

吕 剑^{1,2}, 于晓斌^{1,2}, 张宇轩^{1,2}, 武 君²

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对传统工厂化循环水养殖系统能耗偏高、工艺复杂等缺点, 研发了一种新型多层纤维球生物滤池反应器。该反应器实现了在零换水条件下去除 SS 和含氮污染物, 同时达到高 DO 出水的效果。结果表明, 实验室条件下, 自然挂膜的方式使纤维球形成外部好氧、内部缺氧的环境, 反应器可以同时完成硝化和反硝化过程。此外, 分析了不同水循环率对反应器的影响。在水循环率为 3 次/d 时: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度降低到 0.2 mg/L, 去除率可达到 96.15%; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率稳定在 70% 左右; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度低至 0.1 mg/L, 去除率高达 95.82%; 出水 COD 质量浓度降至 4.0 mg/L, 去除率达到 60% 以上; SS 去除率高达 100%。该反应器较好地实现了养殖废水的同步硝化和反硝化过程。

关键词: 工厂化循环水养殖; 多层纤维球滤料; 生物滤池; 污染物去除效果; 多级复氧; 同步硝化和反硝化

中图分类号: X714

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2019)04-0304-06

Treatment of recirculating aquaculture water using biological filter with multi-layer fiber ball

LYU Jian^{1,2}, YU Xiaobin^{1,2}, ZHANG Yuxuan^{1,2}, WU Jun²

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new biological filter reactor with multi-layer fiber ball was designed to overcome the disadvantages of traditional aquaculture, such as the high energy consumption and the complicated process. This reactor removed SS and nitrogen pollutants without changing water, and achieved a high concentration of dissolved oxygen in the effluent water. The results show that the naturally-formed biofilm built an externally-aerobic and internally-anoxic environments in the fiber. Therefore, the reactor could simultaneously accomplish the nitrification process and denitrification process. The influence of different water recirculating rate was discussed. In the case of water circulation rate of three times a day that was the optimal for the reactor, the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in effluent could be reduced to 0.2 mg/L with the removal rate of 96.15%. The removal efficiency of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was stable at about 70%, and the concentration of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in effluent could be reduced to 0.1 mg/L with the removal rate of 95.82%. Besides, the concentration of COD in effluent decreased to 4.0 mg/L and the removal rate reached 60% or higher. At the same time, the SS removal rate was up to 100%. The simultaneous nitrification-denitrification process in the reactor was successfully achieved, and this study provides a new idea for the recirculating aquaculture system.

Key words: recirculating aquaculture system; multi-layer fiber ball filter; biological filter; effect of biological removal; multi-level reaeration; simultaneous nitrification and denitrification

基金项目: 国家自然科学基金(41877131); 中国科学院“百人计划”项目(Y629041021); 烟台市“双百计划”项目(Y739011021)

作者简介: 吕剑(1979—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海岸带水资源与水环境研究。E-mail: jlu@yic.ac.cn

引用本文: 吕剑, 于晓斌, 张宇轩, 等. 多层纤维球生物滤池净化工厂化养殖循环水处理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 304-309.

LYU Jian, YU Xiaobin, ZHANG Yuxuan, et al. Treatment of recirculating aquaculture water using biological filter with multi-layer fiber ball[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(4): 304-309.

在过去50年里,水产养殖业发展迅速,全球水产养殖业总产量已从20世纪50年代初的100万t增长到超过5000万t。我国是水产养殖大国,连续多年居于世界首位,养殖模式逐步从传统养殖业转变为集约化、工厂化养殖。但是,由于环保技术水平较低,大排大换现象严重,废水处理与利用效率低下^[2],对环境造成了极大的污染,因此,改善水产养殖循环水水质迫在眉睫^[3-4]。养殖水体中存在大量残饵和代谢产物,导致水体中氮、磷浓度较高^[5],使水体自净能力严重下降^[6-7],对环境和水生生物都会产生极大的危害。因此,水产养殖中氮元素的去除一直是研究热点。

工厂化循环水养殖技术(RAS)是一种环境友好型养殖模式,单位产量高于其他养殖模式^[8],节能70%以上^[9],可以实现节能减排和高密度养殖的目的^[10-12]。生物脱氮被认为是目前养殖废水中氮元素去除的最经济有效的方法之一,不会造成二次污染^[13]。近年来,研究者提出了多种新型生物脱氮工艺,生物滤池由于占地面积小、工艺简单、管理方便等优点,一直被不断地改进开发,在水产养殖废水处理中得以应用^[14-16]。此外,水产养殖体系中,溶解氧含量对生物的生死至关重要,然而,传统的生物滤池出水溶解氧浓度较低,限制了生物滤池技术在水产养殖尾水处理中的应用。

为提高出水溶解氧含量,节省曝气成本,提高氮元素去除率,本研究选用比表面积大、吸附性强的纤维球为滤料,研发了一种新型多层纤维球生物滤池反应器,层层跌水,多级复氧。此外,通过检测反应器进出水水质变化,探究该反应器对养殖废水的净化效果,研究在不同水循环率条件下该反应器对污染物的去除效果,以期为工厂化循环水养殖提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验反应器及净水流程

本研究所构建的多层纤维球生物滤池反应器如图1所示,该生物滤池反应器为高2m的塔式分层反应器,反应器从上至下共分为10个滤层,每个滤层长400mm、宽300mm、高120mm,每个滤层下均设有承托架,第1滤层上方安装布水器,第10滤层下方与养殖池相连,使养殖尾水能够均匀地流经反应器。滤层内铺设直径为30~50mm的纤维球填料,每层填料厚度为100~120mm。养殖池容积为48L,选取20条体长5~10cm的罗非鱼为养殖用鱼。

养殖池水经由循环水泵提升,通过布水器均匀喷洒于第1滤层内的填料上部,养殖尾水缓慢流经填料进行生物处理,经过10层滤层后最终流入底部养殖池,完成水循环过程。试验反应器置于普通室温环境中,中途不换水,仅对试验过程中蒸发的水分进行定期补充。

1.2 纤维球表面挂膜流程

采用多层纤维球生物滤池处理工艺,各滤层填充纤维球滤料,在25~30℃的条件下自然挂膜,生物滤池反应器中持续重力自流布水。自然挂膜期间,采用连续不间断循环进水方式,并保证良好的通风和均匀的布水条件,进水流量为6L/h。

1.3 不同水循环率的设定

研究流量及循环率对该反应器净水效果的影响,设置5个循环率梯度,分别为1.5次/d、3次/d、4.5次/d、6次/d、12次/d,对应进水流量分别为3L/h、6L/h、9L/h、12L/h、24L/h。

1.4 水样采集和分析方法

每天采集反应器进出水水样各一次,并进行水质测定,进水水样从养殖池中直接采集,出水水样取自生物滤池最底端出水口。水质测定项目包括pH、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、溶解氧(DO)和悬浮物(SS)。pH使用美国Thermo公司的pH仪测定,DO使用上海仪电科学仪器有限公司溶解氧仪测定。其他水质指标均按照国家标准方法测定^[17]。

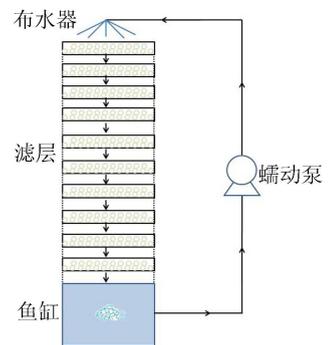


图1 试验反应器示意图

Fig.1 Scheme map of the laboratory-scale reactor

2 结果与讨论

2.1 纤维球滤料的挂膜

挂膜期间,纤维球具有良好的SS物理截留功能。由于纤维球滤料具有比表面积大、孔隙率高、含污量大等特点,挂膜性能良好。养殖废水与纤维球接触充分的位置,挂膜第2天就可肉眼观察到进水端的纤维球表面有黄色生物膜形成。随着挂膜时间增长,第1滤层至第10滤层均有生物膜形成,颜色逐渐变成棕黄色或黑色(图2)。挂膜期间,各水质指标在11d后逐渐趋于稳定。16d后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率稳定在60%以上,可认为挂膜成功。



图2 挂膜前后纤维球表面变化

Fig. 2 Surface changes of fiber ball before and after the formation of biofilm

2.2 不同循环率对养殖水体中污染物的去除效果

在循环水养殖系统中,水循环率越高,水力停留时间越短,对营养盐处理能力下降;水循环率过低会造成污染物的积累,限制循环水养殖技术的应用。因此,选择最佳水循环率,对于氮素等污染物的去除、减少环境污染以及降低养殖成本具有重要意义^[18]。水循环率作为循环水养殖的重要运行参数之一,对罗非鱼生长和系统水质变化有显著影响,试验设置5个水循环率梯度,待系统运行稳定后,测定不同水循环率条件下的水质变化。研究表明,随着循环率的升高,SS和COD的去除率先升高、后降低,并分别在4.5次/d和3次/d时达到最高去除率。随着水循环率的升高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率呈先升高、后降低趋势,在3次/d时去除率最高,达74.8%和88.4%;而在1.5次/d时,去除率仅为67.8%和80.4%;在12次/d时,去除率降低为71.4%和55.5%。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率也在3次/d时达到最高。考虑到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 对水生生物有毒,在选择最佳水循环率时,优先考虑 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除。综上,在水循环率为3次/d时,污染物总体去除效果较好。因此,设置反应器持续流量为6L/h,水循环率为3次/d进行后续研究。

2.3 多层纤维球生物滤池对COD和SS的去除效果

多层纤维球生物滤池对COD的去除效果如图3所示,随着微生物膜逐渐成熟,出水也相对稳定,出水COD质量浓度维持在0~5 mg/L,纤维球生物滤池的COD去除率稳定在50%以上。同时,生物滤池进水COD负荷较低,进水COD波动较大,但出水COD相对稳定。结果表明,该生物滤池系统对COD的去除率受进水COD浓度影响,在较低的进水COD负荷下,仍能有效去除COD。

SS主要来源于残饵及生物粪便,主要是粒径为6.5~130 μm 的颗粒物,这些固体颗粒物长时间在水体中会产生有害污染物,堵塞生物滤池,消耗DO,损害鱼鳃^[19]。如图3所示,该生物滤池中的纤维球滤料对SS表现出良好的去除效果,尽管进水SS浓度变化较大,但是该生物滤池对SS的去除率始终稳定在80%以上,出水SS浓度低至零。结果表明,进水SS浓度不同时,生物滤池对SS的去除作用存在差异,进水SS浓度较高时,SS主要由无机大颗粒物质组成,过滤作用主要为去除作用,大部分颗粒物直接被纤维球截留在表面;进水SS浓度低,悬浮颗粒物较少时,直接过滤作用低,主要是生物降解作用对SS

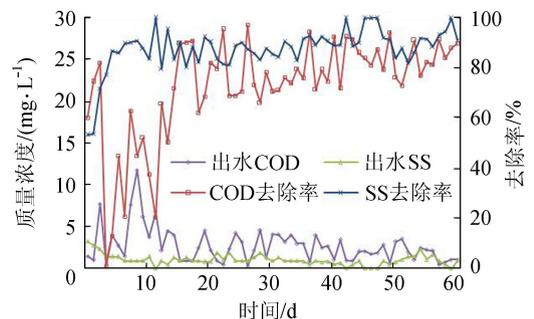


图3 多层纤维球生物滤池对COD和SS的去除效果

Fig. 3 Removal effects of COD and SS by biological filter with multi-layer fiber ball

进行去除。由于反应器滤层较多,长时间运行后,1~4 滤层纤维球表面会截留大量 SS,5~10 滤层纤维球表面附有生物膜,几乎没有 SS 截留。但是,1~4 滤层截留的 SS 会使反应器对污染物的去除效果下降。针对这种情况,将根据检测的水质指标变化和肉眼观察到的实际情形,对各滤层的纤维球定期更换,更换下来的纤维球经清洗后,可反复使用。

2.4 多层纤维球生物滤池的脱氮效果及机理分析

如图4和图5所示,反应器运行稳定后,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度稳定在 0~0.4 mg/L,且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率高达 96.15%。养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要依靠生物作用^[20],通过硝化菌和亚硝化菌等细菌的联合作用完成。硝化菌和亚硝化菌附着在填料上,好氧条件下,通过亚硝化反应将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 进一步通过硝化反应被氧化成无毒的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对水生动植物的不利影响^[21]。该生物滤池为好氧反应器,纤维球表面 DO 含量充足,故有较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率,除氮效果明显。

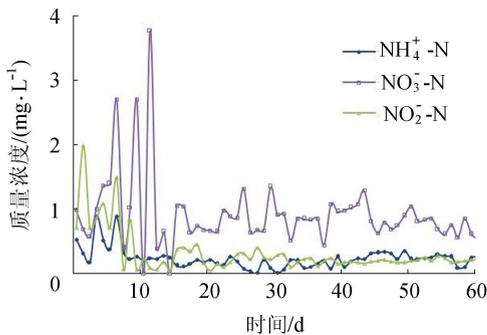


图4 多层纤维球生物滤池出水口的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度

Fig. 4 Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the effluent of biological filter with multi-layer fiber ball

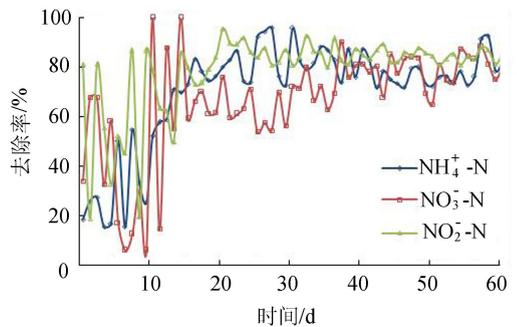


图5 多层纤维球生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率

Fig. 5 Removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the effluent of biological filter with multi-layer fiber ball

多层纤维球生物滤池对养殖水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除效果显著(图4和图5),出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度逐渐稳定在 0.2 mg/L 左右,去除率稳定在 90% 以上。在水环境中, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在硝化作用下被氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时的中间产物,是极为不稳定的状态。DO 充足时 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可以直接被氧化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,缺氧或厌氧条件下 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可以通过反硝化作用被还原为 N_2O 和 N_2 ^[22]。本反应器中,由于大量的微生物附着在 DO 充足的纤维球滤料表面,而生物膜厚度的增加又会使纤维球内部形成厌氧或缺氧环境,因此,该系统中硝化反应和反硝化反应均可达到去除 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的目的。

多层纤维球生物滤池运行稳定后,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度维持在 0~2 mg/L 范围内,平均去除率达到 68.17% (图4和图5)。结果表明,该反应器对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 同样具有较高去除率,由于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在反硝化菌的作用下被还原成 N_2 或 N_2O 、 NO ^[23] 的过程中,纤维球滤料生物膜上微生物量充足,而滤层 DO 浓度不均匀,表层滤料的 DO 浓度较高,而内部会有大面积的缺氧区,从而形成以好氧细菌为主的生物膜外层和以厌氧细菌为主的生物膜内层,同时,外层硝化菌的硝化反应消耗大量 DO,促进生物膜内部缺氧环境的形成^[24]。此外,鱼的残饵和粪便作为有机碳源,好氧反硝化菌和异养硝化菌的存在也有利于同步硝化和反硝化反应的进行^[25]。根据化学计量学统计,同步硝化反硝化反应可进一步降低水处理成本,其在硝化阶段可以减少 25% 左右的曝气能耗,在反硝化阶段可减少 40% 的有机碳源消耗,特别适合高氮、低碳的养殖水处理。

2.5 多层纤维球生物滤池养殖尾水的 pH 和 DO 变化

DO 作为衡量有机污染的重要指标之一^[26],在质量浓度 5~7 mg/L 的情况下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 去除率较高^[27],因此,通过调节气泵通气量大小来调节养殖池中的 DO 质量浓度,使养殖池中的 DO 质量浓度维持在 6~7 mg/L。养殖废水流经多层纤维球生物滤池后,出水 DO 质量浓度可以达到 8~9 mg/L,而我国的 GB 11607—89《渔业水质标准》规定,养殖体系中,连续 24 h 中必须有 16 h 以上的 DO 质量浓度高于 5 mg/L,其余任何时候不得低于 3 mg/L。与其他生物滤池相比,该多层纤维球生物滤池反应器的出水 DO 质量浓度

可以保持在 7~9 mg/L,符合鱼类生长水质标准。出水在回流养殖池时无需进一步复氧处理,极大地节省了曝气费用。

如图 6 所示,反应器进水 pH 稳定在 8.4~8.5 之间,出水 pH 稳定在 8.5~8.7 之间,进水 pH 总是低于出水 pH。理论上而言,反硝化过程中还原 1.0 mg 的 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 会生成 3.57g 的碱度,因此,硝化过程会使 pH 值升高^[27]。pH 是对鱼类生长和水质变化有重要影响的水质指标之一,本研究中养殖池和多层生物滤池内的 pH 稳定在 8.3~8.7 之间,可以满足鱼类生长的需要。

3 结 语

研发了一种以纤维球为滤料的新型多层纤维球生物滤池

反应器,通过自然挂膜的方式使纤维球形成了外部好氧、内部缺氧的环境,从而实现同步硝化-反硝化的过程。该反应器中, NH_4^+ -N 去除率高达 96.15%, NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的去除率分别维持在 50% 和 80% 以上,COD 和 SS 的最高去除率可达到 100%,且出水 SS、DO、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度完全符合鱼类生长需要。该反应器构建和运行成本低、管理方便、水质净化效率高、出水 DO 浓度高,对于大幅度降低工厂化循环水养殖成本、节约水资源和保护环境均具有重要意义。在后续研究中,将对该新型生物滤池反应器不断改进和放大,以期尽快将装置应用推广到实际工厂化水产养殖系统。

参考文献:

- [1] MOOK W T, CHAKRABARTI M H, AROU M K, et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: areview[J]. Desalination, 2012, 285(3): 1-13.
- [2] 赵秀侠,杨坤,方婷,等. 3种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性[J]. 水资源保护,2018,34(1):83-87. (ZHAO Xiuxia, YANG Kun, FANG Ting, et al. Growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae in turtle breeding wastewater[J]. Water Resources Protection,2018,34(1):83-87. (in Chinese))
- [3] 陈军,徐皓,倪琦,等. 我国工厂化循环水养殖发展研究报告[J]. 渔业现代化,2009,36(4):1-6. (CHEN Jun, XU Hao, NI Qi, et al. The study report on the development of China industrial recirculating aquaculture [J]. Fishery Modernization, 2009, 36(4): 1-6. (in Chinese))
- [4] 胡庚东,宋超,陈家长,等. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(3):82-86. (HU Gengdong, SONG Chao, CHEN Jiazhang, et al. Modeling of water circulating pond aquaculture system and its N&P removal effect[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(3): 82-86. (in Chinese))
- [5] 燕文明,刘凌,赵倩维,等. 小型浅水湖泊表层沉积物氨氧化古菌群落结构特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):449-453. (YAN Wenming, LIU Ling, ZHAO Qianwei, et al. Characteristics of community structure of AOA in surface sediments of small shallow lakes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):449-453. (in Chinese))
- [6] 刘道玉,吴伟. 水产养殖水体污染及微生物修复的研究[J]. 现代农业科技,2011(17):253-256. (LIU Daoyu, WU Wei. Research on water pollution and microbial remediation of aquaculture[J]. Modern Agricultural Science & Technology, 2011 (17):253-256. (in Chinese))
- [7] CHEN Chongjun, HUANG Xiaoxiao, LEI Chenxiao, et al. Effect of organic matter strength on anammox for modified greenhouse turtle breeding wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2013, 148: 172-179.
- [8] TIMMONS B, EBELING J M. Recirculating Aquaculture[M]. Ithaca: Cayuga Aqua Ventures, 2007.
- [9] BLANCHETON J P. Developments in recirculation systems for medi-terranean fish species[J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22(1):17-31.
- [10] 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.
- [11] 周子明,李华,刘青松,等. 工厂化循环水养殖系统中生物填料的研究现状[J]. 水处理技术,2015,41(12):33-37. (ZHOU Ziming, LI Hua, LIU Qingsong, et al. Current situation of the research on biological media in recirculating aquaculture system[J]. Technology of Water Treatment, 2015,41(12):33-37. (in Chinese))

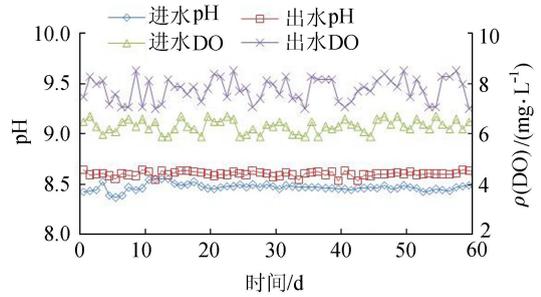


图 6 DO 质量浓度和 pH 在多层纤维球生物滤池的变化

Fig. 6 Changes of DO and pH in the effluent of biological filter with multi-layer fiber ball

- [12] WANG Jianhua, LU Jian, ZHANG Yuxuan, et al. High-throughput sequencing analysis of the microbial community in coastal intensive mariculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 93-102.
- [13] 楼菊青,郭茂新. SBR生物脱氮运行控制方式的优化[J]. *水资源保护*, 2009, 25(4): 70-72. LOU Juqing, GUO Maoxin. Operating modes optimization of biological nitrogen removal in sequencing batch reactor system [J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(4): 70-72. (in Chinese))
- [14] 卢立泉,邱立平,刘盼盼,等. 接种BAF处理海水养殖废水低温启动及微生物特性[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2574-2582. (LU Liqun, QIU Liping, LIU Panpan, et al. Low temperature start-up characteristics and microbial population of BAFs for marine aquaculture wastewater treatment inoculated with two kinds of sludge[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(7): 2574-2582. (in Chinese))
- [15] 赵琳君. 复合式生物滤池和人工湿地对淡水鱼类养殖废水处理效果的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [16] 张世羊,张胜花,张翔凌,等. 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(6): 2419-2428. (ZHANG Shiyang, ZHANG Shenghua, ZHANG Xiangling, et al. Purification efficiency and influencing factors of combined bio-filters for aquaculture wastewater[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2419-2428. (in Chinese))
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [18] JOHN D, CHRISTOPHER G, CARLA W, et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44: 80-96.
- [19] 于冬冬. 海水循环水养殖系统中微细颗粒去除技术的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2014.
- [20] LIU Hongyuan, ZHU Liying, TIAN Xiaohe, et al. Seasonal variation of bacterial community in biological aerated filter for ammonia removal in drinking water treatment[J]. *Water Research*, 2017, 123: 668-677.
- [21] 肖玉冰,冯骞,江峰,等. 有效微生物(EM)在中华绒螯蟹养殖中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 404-409. (XIAO Yubing, FENG Qian, JIANG Feng, et al. Application of effective microorganisms(EM) to *Eriocheir sinensis* culture[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(5): 404-409. (in Chinese))
- [22] 黄翔鹤. 对虾高位池水环境养殖污染和浮游微藻生态调控机制研究[D]. 上海:东华大学, 2013.
- [23] 王琳,田璐. 曝气生物滤池脱氮研究进展[J]. *水处理技术*, 2018, 44(7): 1-5. (WANG Lin, TIAN Lu. Research progress in nitrogen removal by biological aerated filter[J]. *Technology Water Treatment*, 2018, 44(7): 1-5. (in Chinese))
- [24] 邵留,兰燕月,姬芬,等. 玉米芯强化生物反应器对罗非鱼循环养殖废水脱氮效果研究[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(2): 217-226. (SHAO Liu, LAN Yanyue, JI Fen, et al. On nitrogen removal from tilapia recirculating aquaculture waste water using corncob as carbon source and biofilm carrier[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(2): 217-226. (in Chinese))
- [25] 杨麒,李小明,曾光明,等. 同步硝化反硝化机理的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2003, 31(4): 88-91. (YANG Qi, LI Xiaoming, ZENG Guangming, et al. Study progress on mechanism for simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Microbiology*, 2003, 31(4): 88-91. (in Chinese))
- [26] 马牧源,崔丽娟,张曼胤,等. 白洋淀养鸭废水水质组成及其扩散和消减特征[J]. *水资源保护*, 2017, 33(5): 145-153. (MA Muyuan, CUI Lijuan, ZHANG Manyin, et al. Water quality composition of duck farm wastewater in Baiyangdian Lake and its diffusion and reduction characteristics[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(5): 145-153. (in Chinese))
- [27] 陆伟强,高桦楠,刘春胜,等. 不同 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和溶解氧条件下循环海水养殖系统生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、化学耗氧量及颗粒悬浮物的处理效果[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(3): 89-95. (LU Weiqiang, GAO Huanan, LIU Chunsheng, et al. Treatment effect of ammonia nitrogen, cod and ss by a coral stone biological filter in the recirculating aquaculture systems under different concentrations of ammonia nitrogen and dissolved oxygen[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 89-95. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-07 编辑:高建群)