

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.012

不同增氧条件下强化生态浮床净化养殖水体的效果

张玲玲, 刘立早, 张玉平, 刘淑梅, 陈雪婷, 孙振中
(上海市水产研究所 上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要: 通过设置不同增氧条件,研究立体弹性填料强化生态浮床对淡水养殖水体的净化效果及出水中氮的组成。结果表明,当增氧强度为1 L/min、每天增氧3 h时,立体弹性填料强化生态浮床对淡水养殖水体中TN、COD和TP的去除率最高,分别为73.9%、81.7%和54.9%;不增氧会导致系统出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高,当每天增氧4 h或8 h时会造成出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累。因此,综合考虑对上海市淡水养殖池塘水体的净化效果及出水中“三氮”的组成,当增氧强度为1 L/min、每天增氧3 h时,立体弹性填料强化生态浮床系统运行效果最佳。

关键词: 强化生态浮床; 淡水养殖水体; 增氧; 生态修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0069-06

Purification Efficiencies of Aquaculture Water by Enhanced Floating Treatment Wetlands under Different Aeration Conditions

ZHANG Ling-ling, LIU Li-zao, ZHANG Yu-ping, LIU Shu-mei, CHEN Xue-ting,
SUN Zhen-zhong

(Shanghai Fisheries Technical Promotion Station, Shanghai Fisheries Research Institute,
Shanghai 200433, China)

Abstract: Purification efficiencies of enhanced floating treatment wetlands (EFTWs) on aquaculture water and the nitrogen composition of the effluent under different aeration conditions were studied. When aeration intensity and time were 1 L/min and 3 hours per day, the removal efficiencies of TN, COD and TP in aquaculture water were the highest, which were 73.9%, 81.7% and 54.9%, respectively. The absence of aeration resulted in a higher concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the effluent of the system, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ would accumulate when the aeration time was 4 or 8 hours per day. Therefore, purification efficiency and composition of nitrogen in the effluent were comprehensively considered, and purification efficiency of EFTWs with three-dimensional elastic packing was the best when aerobic intensity and time were 1 L/min and 3 hours per day.

Key words: enhanced floating treatment wetland; aquaculture water; aeration; ecological restoration

2019年1月11日,国家十部委联合印发了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》,意

基金项目: 上海市科技兴农推广项目[沪农科推字(2017)第1-12号]; 国家自然科学基金青年基金资助项目(51709172); 上海市青年人才成长计划项目[沪农青字(2017)第3-8号]

通信作者: 张玉平 E-mail:13918321369@163.com

见指出,要大力发展生态健康养殖,完善循环水和进排水处理设施,支持生态沟渠、生态塘、潜流湿地等尾水处理设施升级改造,加快推进养殖节水减排,鼓励采取进排水改造、生物净化、人工湿地、种植水生蔬菜花卉等技术措施;开展集中连片池塘养殖区域和工厂化养殖尾水处理,推动养殖尾水资源化利用或达标排放。

生态浮床技术因具有操作简单、成本低、净化效果好等优点,目前已被养殖户广泛接受和认可。但是该技术也存在一定的局限性,如水生植物生长速率慢、系统中微生物数量有限等,导致生态浮床技术对水体中氮的去除能力有限^[1-2]。通过向传统生态浮床中引入人工填料,形成人工填料强化生态浮床(EFTWs),从而增强系统对污染物的去除能力^[3]。课题组前期研究了3种不同类型的人工填料强化生态浮床对上海市淡水养殖水体的净化效果,发现立体弹性填料强化生态浮床的水质净化效果最好,对TN和TP的去除率分别达到了83.9%和69.3%,对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率也在70%以上^[4]。

然而,生态浮床的载体在一定程度上遮盖了部分水面,阻碍了水体表面的氧气交换,使得水体中的溶解氧浓度不高,不利于有机物的好氧分解和硝化作用的进行,因此该技术的运行还需要一定程度的人工增氧^[5]。然而,增氧过多又会造成能源浪费,还会增加养殖户的投入成本。因此,人工填料强化生态浮床技术运行时的最佳增氧条件还需要进一步研究。笔者通过设置不同的增氧条件,研究人工填料强化生态浮床技术对淡水养殖水体的净化效果以及出水中氮的组成,确定其运行的最佳增氧条件,旨在为该技术在发展绿色水产养殖业的应用中提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 实验设计与材料

2019年5月—8月,实验在8个尺寸为40 cm × 80 cm × 60 cm的PVC水箱中进行,水箱一侧底部进水,另一侧在高度为30和50 cm处分别设置取样阀门和出水口。实验分2个阶段进行,第1阶段共设置4个处理组:不增氧和每天增氧2、4、8 h;第2阶段设置3个处理组:每天增氧2、3和4 h。定时器设置的开始增氧时间为早上09:00,设置流量计的增氧强度为1 L/min,设置蠕动泵的进水流速为17 mL/min(HRT为7 d)。每组悬挂9串立体弹性填

料(直径为15 cm,每串长度为50 cm,比表面积为90~110 m²/m³),种植4株挺水植物,植物和人工填料均匀交错分布。实验选用黄花美人蕉作为受试植物,选取大小一致的黄花美人蕉幼苗,单株平均质量为(65.5 ± 1.53) g,株高为(48.2 ± 4.55) cm。浮床载体选用尺寸为60 cm × 40 cm × 4 cm的聚苯乙烯发泡塑料板。

采用人工配制进水,成分包括葡萄糖、 KH_2PO_4 、 NH_4Cl 、 KNO_3 (均为分析纯),根据上海市淡水养殖池塘水体中污染物平均浓度水平,人工配水中TN、COD、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度分别设置为5、84、0.5、1.5、3和0.5 mg/L。

1.2 分析项目及方法

pH值和DO使用WTW多参数水质分析仪测定,TN使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP使用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定,COD使用HACH消解器和分光光度计测定,氨氮使用纳氏试剂分光光度法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 均采用分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 第1阶段强化生态浮床的运行效果

图1为不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中TN的净化效果。

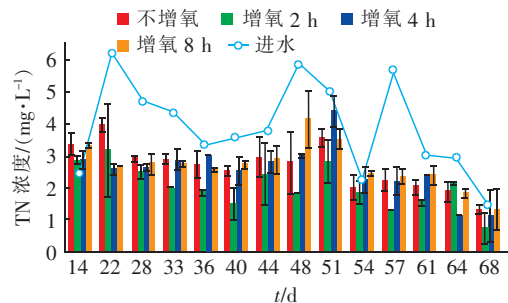


图1 不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中TN的净化效果

Fig. 1 Removal efficiency of TN in aquaculture water by EFTWs under different aeration conditions

从图1可以看出,当进水TN浓度为1.53~6.19 mg/L时,在不增氧和每天增氧2、4、8 h条件下,4组强化生态浮床处理系统平均出水TN浓度分别为(2.72 ± 0.71)、(2.10 ± 0.67)、(2.62 ± 0.79)和(2.75 ± 0.71) mg/L,对TN的平均去除率分别为29.8%、46.1%、31.4%和28.0%。可见,在立体弹性填料强化生态浮床系统中,增氧2 h时对TN的去

除效果最好。该系统中,对氮的去除主要依靠微生物转化及植物的吸收作用^[2]。在微生物转化过程中,对氮的去除作用有好氧反应和厌氧反应。当溶解氧浓度太低时,不利于氨化作用和硝化作用的发生,导致出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高;当溶解氧浓度太高时,水体中的氨氮都转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 导致水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低,不利于植物的生长和对氮的吸收。另外,较高的溶解氧也不利于反硝化作用的发生,导致出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累^[6]。因此,不增氧或增氧时间太长均不利于立体弹性填料强化生态浮床对水体中 TN 的去除。

图2为不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中 COD 的净化效果。可知,当进水 COD 为 36 ~ 115 mg/L 时,在不增氧和每天增氧 2、4、8 h 条件下,平均出水 COD 浓度分别为 (23.7 ± 7.19) 、 (18.4 ± 8.71) 、 (14.1 ± 8.77) 和 (15.2 ± 8.07) mg/L,对 COD 的平均去除率分别为 62.7%、70.0%、78.1% 和 76.5%。可见,在立体弹性填料强化生态浮床系统中,增氧 4 h 时对 COD 的去除效果最好,其次是增氧 8 和 2 h,不增氧系统的 COD 去除率最低。在该系统中,对 COD 的去除主要依靠微生物降解有机物的作用,水体中的 DO 浓度和微生物量是影响其去除效果的重要因素,增氧有利于好氧微生物的繁殖和有机物的降解,但过高的增氧量对提高水体中有机物的去除效率并不明显^[7]。

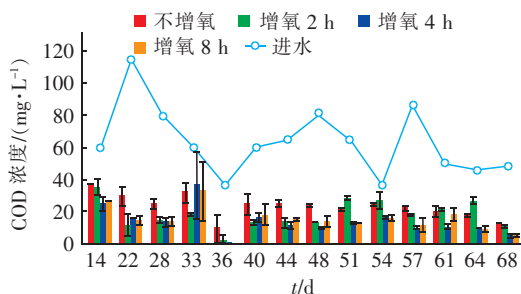


图2 不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中 COD 的净化效果

Fig. 2 Removal efficiency of COD in aquaculture water by EFTWs under different aeration conditions

当进水 TP 为 0.28 ~ 0.74 mg/L 时,在不增氧和每天增氧 2、4、8 h 条件下,平均出水 TP 分别为 (0.42 ± 0.08) 、 (0.39 ± 0.05) 、 (0.41 ± 0.06) 、 (0.42 ± 0.06) mg/L (见图3),对 TP 的平均去除率分别为 18.3%、24.5%、21.6% 和 17.2%。可见,在

该系统中,增氧 2 h 时对 TP 的去除效果最好。在人工填料强化生态浮床系统中,植物的吸收作用是去除 TP 的重要途径^[2,8]。另外,不同的增氧条件还会影响水体中氮的存在形态,而水体中的氨氮和硝酸盐氮浓度会影响植物的生长,从而影响植物对水体中磷的吸收。

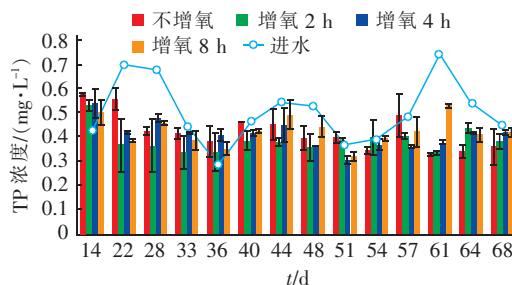


图3 不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中 TP 的净化效果

Fig. 3 Removal efficiency of TP in aquaculture water by EFTWs under different aeration conditions

综上所述,立体弹性填料强化生态浮床对淡水养殖水体中 TN、TP 和 COD 均有一定的去除效果;当增氧强度为 1 L/min 时,增氧 2 h 系统的净化效果优于不增氧、增氧 4 h 和增氧 8 h 系统。

分析不同增氧条件下,立体弹性填料强化生态浮床系统出水中的不同氮形态组成,结果如图4所示。由图4(a)可以看出,不增氧系统出水中,氨氮浓度所占比例最高,平均占比为 89.5%。相较于其他系统,增氧 2 h 的系统中 3 种形态氮的总浓度最低,实验前期(0 ~ 28 d),出水中以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主,平均占比为 78.4%;实验中期(33 ~ 48 d),出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均占比分别为 27.5%、43.0% 和 29.5%;实验后期(51 ~ 68 d),出水中以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主,平均占比为 93.3%,见图4(b)。由图4(c)、(d)可知,增氧 4 h 和 8 h 系统的出水中氮的组成相似,基本以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为主逐渐转变成以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主,48 d 以后,增氧 4 h 和 8 h 的系统出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所占比例分别为 87.6% 和 91.1%。去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的亚硝化细菌大多属于好氧型微生物,不增氧系统出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高,可能是由于较低的 DO 水平不利于亚硝化作用和硝化作用的发生^[9]。增氧 4 h 和 8 h 虽然有利于硝化作用的发生,但是水体中 COD 浓度较低,缺乏碳源,不利于反硝化作用的发生^[10]。因此,立体弹

性填料强化生态浮床系统中,不增氧会造成出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高,增氧 4 h 和 8 h 会造成出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累。

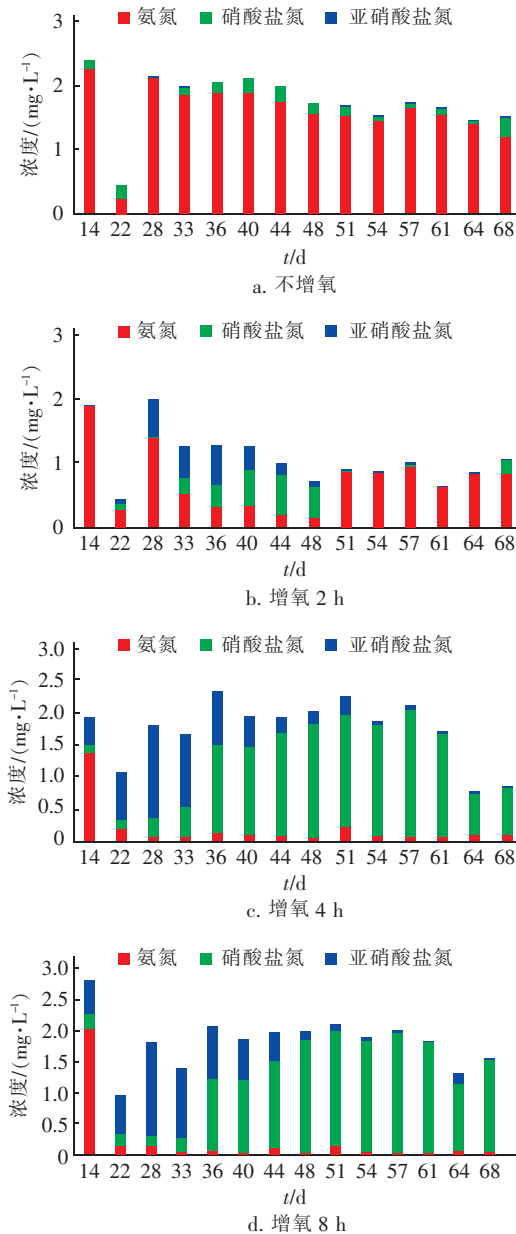


图4 不同增氧条件下强化生态浮床系统出水中氮的组成

Fig. 4 Nitrogen composition of effluent in EFTWs under different aeration conditions

综合 4 组系统对淡水养殖水体中 TN、TP 和 COD 的去除效果及出水中 3 种形态氮的组成结构,发现增氧强度为 1 L/min 时,增氧 2 h 对立体弹性填料强化生态浮床系统较合适。

2.2 第2阶段强化生态浮床的运行效果

图 5 为不同增氧条件下强化生态浮床系统中溶

解氧的变化。

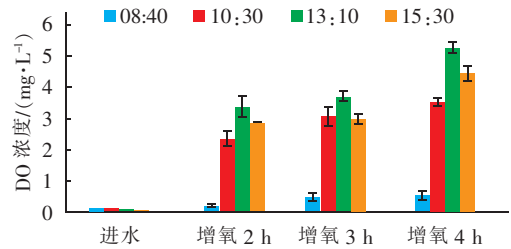


图5 不同增氧条件下强化生态浮床系统中溶解氧的变化

Fig. 5 Variation of DO in EFTWs under different aeration conditions

从图 5 可以看出,08:40 时(9:00 开始增氧),3 组系统中的 DO 浓度为 0.26 ~ 0.55 mg/L;增氧 1.5 h 后(10:30),3 组系统中的 DO 浓度均超过 2 mg/L;13:10 时,3 组系统中的 DO 浓度继续升高,分别为 (3.39 ± 0.34) 、 (3.72 ± 0.15) 、 (5.26 ± 0.17) mg/L;15:30 时,3 组系统中的 DO 浓度均开始降低,但增氧 4 h 系统中的 DO 浓度仍显著高于增氧 2 h 和 3 h 系统。

不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中 TN、COD 和 TP 的净化效果如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出,进水 TN 为 2.08 ~ 4.54 mg/L,当增氧 2、3、4 h 时,系统中出水 TN 平均浓度分别为 (1.27 ± 0.43) 、 (0.76 ± 0.25) 、 (1.58 ± 0.47) mg/L, TN 平均去除率分别为 56.6%、73.9% 和 47.1%。可见,在立体弹性填料强化生态浮床系统中,增氧 3 h 时对 TN 的去除效果最好。实验进水中 COD 浓度为 38 ~ 72 mg/L,当增氧 2、3、4 h 时,系统中出水 COD 平均浓度分别为 (12.9 ± 5.10) 、 (10.1 ± 4.54) 、 (11.7 ± 6.16) mg/L,平均去除率分别为 76.1%、81.7% 和 79.1%,如图 6(b) 所示。进水 TP 浓度为 0.40 ~ 0.54 mg/L,当增氧 2、3、4 h 时,平均出水 TP 分别为 (0.25 ± 0.07) 、 (0.21 ± 0.03) 、 (0.41 ± 0.05) mg/L,平均去除率分别为 46.7%、54.9% 和 9.5%,见图 6(c)。增氧 4 h 时,立体弹性填料强化生态浮床对养殖水体中 TP 的去除率最低,这可能是由于该系统中 DO 充足,硝化细菌繁殖旺盛,氨氮被转化,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低,不利于植物的生长,从而影响了植物对水体中磷的吸收。综上所述,3 种不同增氧条件下,当增氧 3 h 时,立体弹性填料强化生态浮床对养殖水体中 TN、TP 和 COD 的去除效果最好。

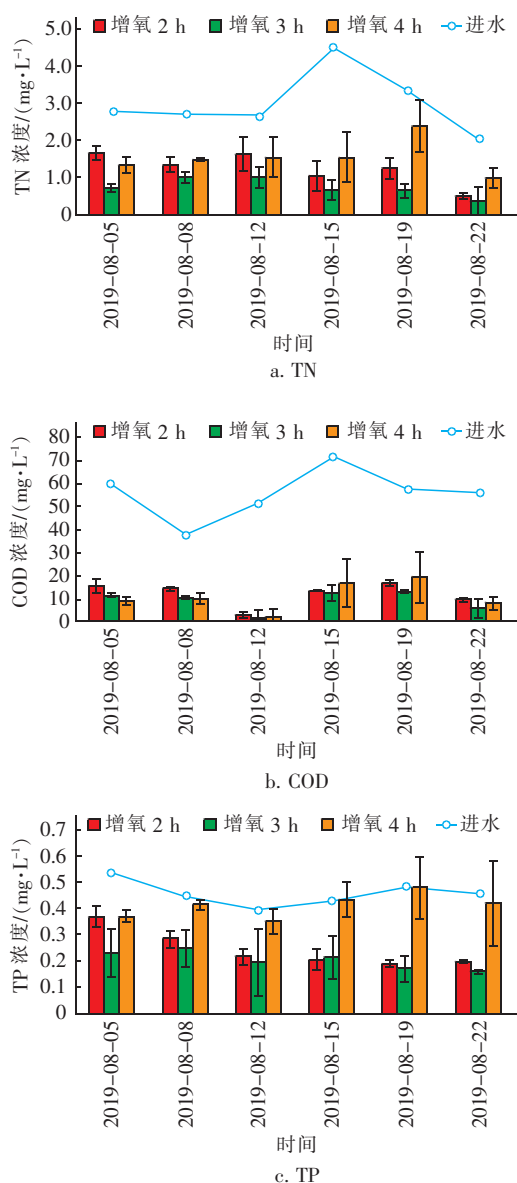


图6 不同增氧条件下强化生态浮床对养殖水体中TN、COD和TP的净化效果

Fig. 6 Removal efficiencies of TN, COD and TP in aquaculture water by EFTWs under different aeration conditions

图7为不同增氧条件下强化生态浮床系统出水中氮的组成。可以看出,当增氧2、3、4 h时,氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的总浓度分别为 (0.79 ± 0.34) 、 (0.23 ± 0.09) 、 (0.73 ± 0.12) mg/L。增氧3 h系统中3种形态氮的总浓度最低且稳定,增氧2 h的系统出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均占比分别为66.4%、26.4%、7.2%,见图7(a);增氧3 h系统出水中3种氮形态的平均占比分别为21.2%、70.4%和8.4%,如图7(b)所示;增氧4 h系统出水中3种氮形态的平均占比分别为6.5%、

82.3%和11.2%,见图7(c)。可见,增氧2 h的系统中出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高,增氧4 h时会造成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累。

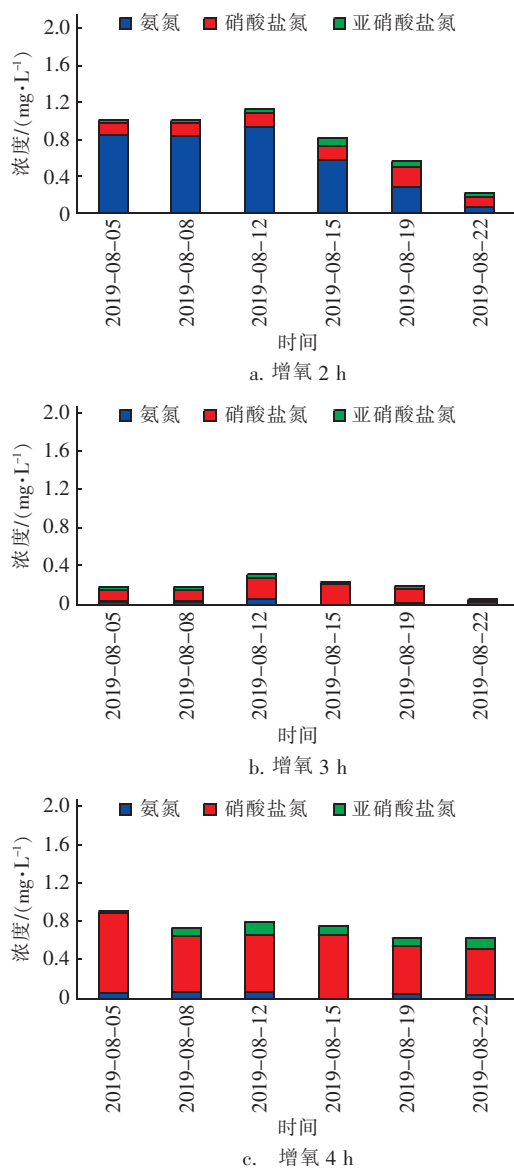


图7 不同增氧条件下强化生态浮床系统出水中氮的组成

Fig. 7 Nitrogen composition of effluent in EFTWs under different aeration conditions

综合3组系统对淡水养殖水体中TN、TP和COD的去除效果及出水中3种氮形态的组成发现,当增氧强度为1 L/min、每天增氧3 h时,立体弹性填料强化生态浮床运行效果最佳,其次是增氧2 h。在实际工程应用中,立体弹性填料的使用量可根据生态浮床的面积来确定,1 m²生态浮床下可悬挂立体弹性填料30~40 m;增氧量根据每日处理水量、水体中COD和氨氮浓度来定,本实验进水中COD

和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别为 38 ~ 72 mg/L 和 0.1 ~ 0.8 mg/L, 立体弹性填料强化生态浮床运行的最佳气液比为 7.86 : 1。

3 结论

采用立体弹性填料强化生态浮床处理上海市淡水养殖池塘水体时, 当增氧强度为 1 L/min、每天增氧 3 h 时, 运行效果最佳, 其次是增氧 2 h。不增氧会造成出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高, 增氧 4 h 和 8 h 则会导致出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累。

参考文献:

- [1] Wu Q, Hu Y, Li S Q, *et al.* Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 211: 451 - 456.
- [2] Zhang L L, Zhao J, Cui N X, *et al.* Enhancing the water purification efficiency of a floating treatment wetland using a biofilm carrier[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(8): 7437 - 7443.
- [3] Cao W P, Zhang Y Q. Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates[J]. *Ecol Eng*, 2014, 62: 148 - 152.
- [4] 张玲玲, 刘立早, 张玉平. 不同填料强化生态浮床对淡水养殖水体的净化效果[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(9): 18 - 22.
Zhang Lingling, Liu Lizao, Zhang Yuping. Purification effect of floating treatment wetlands enhanced with different biofilm carriers on aquaculture water[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(9): 18 - 22 (in Chinese).
- [5] Zhang L L, Sun Z Z, Xie J, *et al.* Nutrient removal, biomass accumulation and nitrogen-transformation functional gene response to different nitrogen forms in enhanced floating treatment wetlands[J]. *Ecol Eng*, 2018, 112: 21 - 25.
- [6] 张晓一, 陈盛, 查丽娜, 等. 表面流人工湿地和复合型生态浮床处理污水厂尾水的脱氮性能分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(6): 46 - 51.
Zhang Xiaoyi, Chen Sheng, Zha Lina, *et al.* Analysis on nitrogen removal performance in treatment of wastewater treatment plant effluent with surface flow constructed wetland and integrated ecological floating-bed[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(6): 46 - 51 (in Chinese).
- [7] 谭剑聪. 微曝气强化生态浮床对污水中 COD 的去除效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
Tan Jiancong. Study on the Decontamination Performance of Organism in Sewage by the Micro-aeration Enhanced Ecological Floating Bed [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [8] 周高峰, 刘义青, 付永胜, 等. 微曝气强化生态浮床对污水中磷的净化效果[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(10): 69 - 74.
Zhou Gaofeng, Liu Yiqing, Fu Yongsheng, *et al.* The purification of phosphorus by the micro-aeration enhanced ecological floating bed in sewage [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(10): 69 - 74 (in Chinese).
- [9] 聂玉华. 微曝气强化生态浮床对污水中氮元素的去除效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
Nie Yuhua. Study on the Decontamination Performance of Nitrogen in Polluted Water by Micro-aeration Enhanced Ecological Floating Bed [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [10] Chen Y, Wen Y, Zhou Q, *et al.* Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface-batch constructed wetlands: A stable isotope and mass balance assessment[J]. *Water Res*, 2014, 63: 158 - 167.



作者简介: 张玲玲 (1985 -), 女, 湖北襄阳人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水体生态修复。

E-mail: 13818353541@163.com

收稿日期: 2019 - 12 - 06