

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200303001

http://www.yykxjz.cn/

唐小双, 张可可, 贾军, 崔正国, 曲克明. 不同水力负荷下人工湿地对海水养殖尾水污染物的净化特征. 渔业科学进展, 2021, 42(5): 16-23

TANG X S, ZHANG K K, JIA J, CUI Z G, QU K M. Purification characteristics of constructed wetland under different hydraulic loads after treatment of marine aquaculture tailwater. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(5): 16-23

不同水力负荷下人工湿地 对海水养殖尾水污染物的净化特征*

唐小双^{1,2} 张可可^{1,2} 贾军^{1,2} 崔正国^{2①} 曲克明²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所

农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室

青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071)

摘要 海水养殖尾水的达标排放是海水养殖产业面临的主要问题之一, 人工湿地作为一种生态、综合水处理技术, 可有效去除养殖尾水中的氮、磷等污染物, 获得适宜的水力负荷条件是该技术推广和应用的前提。构建一套复合垂直流人工湿地处理系统, 研究3种水力负荷条件($V_1=0.50$ 、 $V_2=0.19$ 、 $V_3=0.10$ m/d)对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)养殖尾水的处理效果的影响。结果显示, 3种水力负荷状态下, 该系统对于海水养殖尾水中主要污染物的处理效果差异显著。进水中的化学需氧量(COD)浓度相对较低时, 去除率均较低(最高去除率为36.25%), 水力负荷状态对COD的去除率影响不明显。水力负荷为0.50 m/d时, 总氮(TN)的去除率为49.50%; 在0.10 m/d时, TN去除率达到85.90%。活性磷酸盐($PO_4^{3-}-P$)的去除率受到水力负荷的影响较小, 最低去除率为77.44%。水力负荷状态会影响系统内氮、磷的浓度变化: 在不同水力负荷下, 下行池中氮污染物去除率在80%以上; 上行池则会在高水力负荷状态下产生硝酸盐氮($NO_3^- -N$)或亚硝酸盐氮($NO_2^- -N$)的累积, 影响出水水质。 $PO_4^{3-}-P$ 的吸附转化主要发生在下行池的中上层, 水力负荷越大, $PO_4^{3-}-P$ 的吸附转化就越靠近系统后程。

关键词 海水养殖尾水; 人工湿地; 水力负荷

中图分类号 X55 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)05-0016-08

养殖尾水达标排放是建设渔业强国和水产养殖绿色发展的内在要求。目前, 我国海水工厂化养殖水体已达 3.37×10^7 m³ (2019年中国渔业统计年鉴), 未经处理的养殖尾水排放会影响近海生态环境, 增加水体富营养化程度(温志良等, 2000; 舒廷飞等, 2002)。

由于海水盐度效应, 单纯针对海水工厂化养殖尾水处理的技术较少, 而常规的设施设备等处理技术则

存在投资运行费用高、能耗高等不足(曲克明等, 2018; 乔卫龙等, 2019)。人工湿地通过基质、植物和微生物的物理、化学和生物协同作用来去除水体中的氮、磷和有机物, 具有投资建设成本低、运行费用少、净化率高和易维护等优点, 已引起国内外学者的广泛关注(夏汉平, 2002; 贺锋等, 2005; Ji *et al.*, 2007)。

国内外有许多人工湿地应用在污水处理中的报

* 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019YY001)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2019CY01)共同资助 [This work was supported by Shandong Province Agricultural Major Applied Technology Innovation Project (SD2019YY001) and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Found (2019CY01)]. 唐小双, E-mail: 1162274476@qq.com

① 通讯作者: 崔正国, 研究员, E-mail: cuizg@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2020-03-03, 收修改稿日期: 2020-05-21

道,但是大部分研究侧重于植物选取、基质改良、微生物筛选等方面(丁怡等, 2019; Zhang *et al*, 2016; Gary *et al*, 2017),而对于水力负荷等因素考察较少,特别是在高盐度背景下,对人工湿地的净化效果及其影响因素(许永辉等, 2018)。研究发现,水力负荷、水深、水力停留时间是影响人工湿地运行的三大要素;适宜的水力负荷能减少人工湿地占地面积,提升处理效率(王世和等, 2003; 胡小芳等, 2008)。因此,本研究探讨不同水力负荷状态下复合垂直人工湿地系统对牙鲆养殖尾水中主要污染物质的处理效果,分析系统内部化学需氧量(COD)、活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的浓度变化特征,探究水力负荷对人工湿地处理海水养殖尾水的影响机制,为研究人工湿地处理海水养殖尾水提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 人工湿地构建

构建了一套实验室规模的海水养殖尾水处理系统(图 1),主要由牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)养殖池、沉淀池、复合垂直人工湿地和储水池组成。养殖池为圆柱体,直径 \times 高为 0.6 m \times 0.8 m,有效容积为 130 L [$\pi \times (0.3 \text{ m})^2 \times 0.46 \text{ m}$];人工湿地长 \times 宽 \times 高为 0.8 m \times 0.6 m \times 0.8 m,有效容积为 300 L。人工湿地由面积均为 0.1 m²的下行池和上行池 2 部分组成,有效表面积为 0.1 m²,由下往上依次填入碎石(粒径 5~15 cm)、煤渣(粒径 3~10 cm)和细砂(粒径 1~5 mm);外置采样管,在各层填料中部取样,按照水流方向设置 7 个采样点(图 1);滤砂层种植互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel),种植密度为 60 株/m²。系统各个单元通过水管和水泵连接。

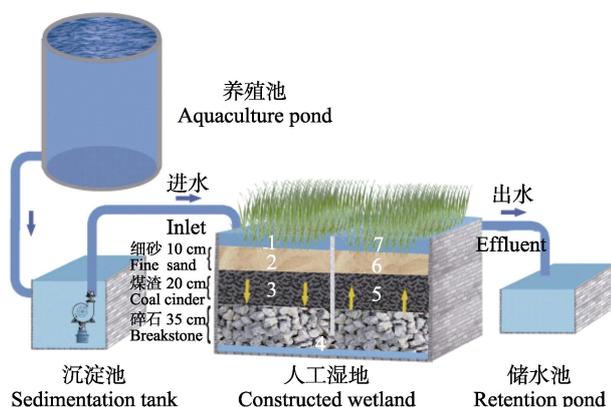


图 1 养殖尾水处理系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of aquaculture tail water treatment system

1~7 为人工湿地系统采样点

1~7 are sampling points for constructed wetland system

1.2 实验内容

2019 年 8—10 月开展实验。将人工湿地系统置于室外,处理对象为牙鲆养殖的尾水,每日喂食牙鲆 2 h 后,将尾水排入复合垂直人工湿地系统。尾水沉淀过滤之后,由水泵提升进入人工湿地,依次经过下行池和上行池,净化后进入储水池中。每次实验使用新鲜的养殖尾水,处理后的尾水不进行再循环。经过 1 个月的试运行,微生物群落形成,出水水质稳定,开展水力负荷对净化效果影响的实验。

参考《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010),设置 3 组不同水力负荷, $V_1=0.50$ 、 $V_2=0.19$ 、 $V_3=0.10$ m/d,系统在 V_3 (0.10 m/d)下运行时间为 1.5 h,将其设定为所有实验组的运行时间。设定水力负荷之后,运行 4 d,处理效果稳定后再进行取样分析,每组水力负荷共运行 7 d,实验总时长为 30 d。实验期间,天气良好、无雨天,避免了雨水进入系统造成的干扰。

在人工湿地各填料层设置取样点,通过水质指标监测系统运行状态。每组水力负荷运行的第 7 天,系统开始运行 1.5 h 后进行采样。测定的主要水质指标包括 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、温度、pH 和盐度。

1.3 分析方法

采用水质多参数测定仪(YSI 556, 美国)对水温(T)、盐度(S)、pH 进行现场测定,实验期间,进水温度和盐度分别为(23.78 \pm 0.17) $^{\circ}\text{C}$ 和(30.11 \pm 0.09),进水和出水的 pH 分别为 7.76 \pm 0.08 和 8.57 \pm 0.05。TN 使用总有机碳分析仪(TOC-VCPH)进行测定。其他水质指标按照《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)进行测定,其中, COD 采用碱性高锰酸钾法, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用磷钼蓝分光光度法, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用靛酚蓝分光光度法, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用 N-1-萘基-乙二胺分光光度法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用铈镉还原法测定。

采用 Excel 软件进行数据处理,对水力负荷与污染物去除率相关性分析,利用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 COD 的处理效果

COD 浓度变化情况见图 2。如图 2 所示,进水中 V_1 、 V_2 和 V_3 组 COD 的浓度分别为(5.75 \pm 0.30)、(3.70 \pm 0.45)和(2.79 \pm 0.59) mg/L,对应的去除率分别为 28.23%、36.40%和 36.25%。下行池所有实验组 COD 浓度均呈下降趋势,且在底部到达最低值。 V_3 组能保

持稳定的 COD 浓度水平, 而 V_1 组中的 COD 浓度起伏明显。其中, V_1 组在最底部浓度为 1.10 mg/L, 去除率达到 68.50%; 而进入上行池之后, COD 浓度出现一定程度的升高。

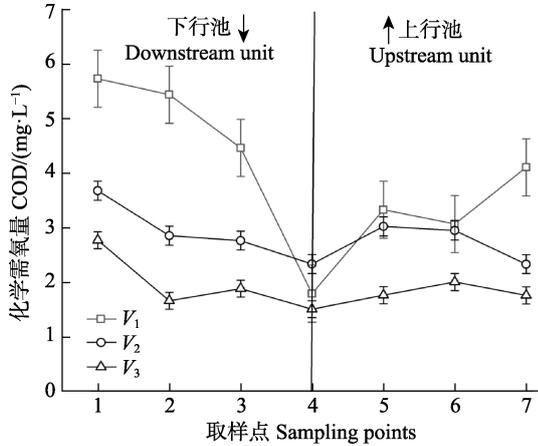


图2 系统内部 COD 浓度变化趋势

Fig.2 Variation trend of COD concentration in the system

尾水中 COD 浓度较低, 水力负荷对 COD 去除率的影响并不显著 ($P>0.05$), 初步沉淀过滤之后, 基本上能满足《海水养殖水排放要求》(SC/T9103-2007) ($COD \leq 10$ mg/L)。COD 进水浓度偏低, 水力负荷对 COD 的影响并不显著。海水鱼类养殖尾水中 COD 的浓度较低, 而水力负荷对于 COD 浓度较高的虾类养殖尾水等的去除率影响有待进一步研究。

2.2 PO_4^{3-} -P 的处理效果

不同水力负荷下, PO_4^{3-} -P 的浓度变化趋势一致 (图 3), 水力负荷状态对 PO_4^{3-} -P 去除率的影响不显著 ($P>0.05$)。 V_1 、 V_2 和 V_3 组进水中 PO_4^{3-} -P 的浓度分别为 (0.08 ± 0.01) 、 (0.51 ± 0.06) 和 (0.49 ± 0.06) mg/L, 对应的去除率分别为 77.44%、79.08% 和 88.19%。降低水力负荷对系统的 PO_4^{3-} -P 吸附降解能力有一定提升。

经过下行池滤砂层之后, PO_4^{3-} -P 浓度迅速下降, 并在上行池依然保持稳定的水平, 说明, 在经过填料过滤吸附之后, 系统对 PO_4^{3-} -P 的处理能力达到下限。在水力负荷适宜的情况下, PO_4^{3-} -P 的吸附转化主要发生在下行池的中上层, 即滤砂层。 V_3 组下行池的滤砂层对 PO_4^{3-} -P 的去除贡献率在 62.03%, 但 V_1 组在碎石层的 PO_4^{3-} -P 去除率才达到最大 (82.41%)。水力负荷影响填料层对 PO_4^{3-} -P 的吸附降解能力, 水力负荷越大, 对 PO_4^{3-} -P 起主要吸附转化作用的填料层就越靠后, 最终影响出水水质。

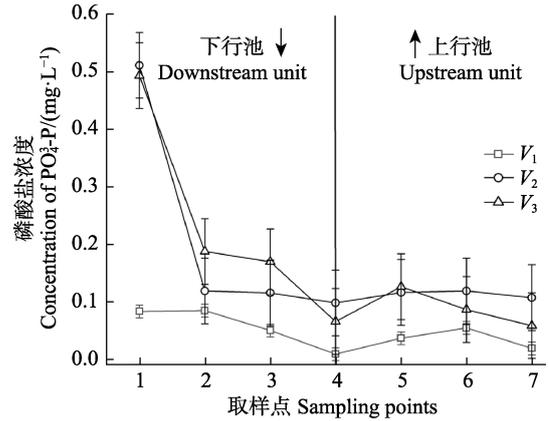


图3 系统内部 PO_4^{3-} -P 的浓度变化趋势

Fig.3 Variation trend of PO_4^{3-} -P concentration in the system

2.3 TN 的处理效果

系统对尾水中 TN 的去除效果与 COD/ρ (TN) 见图 4。 V_1 、 V_2 和 V_3 组进水中的 TN 浓度分别为 (3.68 ± 0.38) 、 (3.47 ± 0.39) 和 (3.16 ± 0.42) mg/L, 对应的去除率分别为 49.50%、84.02% 和 85.90%。水力负荷越低, 系统对 TN 的去除率越高, 出水水质也越稳定 ($P<0.05$)。在下行池, TN 的去除率均约为 80%, 去除效果明显; 而在上行池, 滤砂层出现了 TN 浓度升高的情况。水力负荷为 0.19 和 0.50 m/d 时, 出水水质波动较大; 而水力负荷为 0.10 m/d 时, 水质保持稳定。

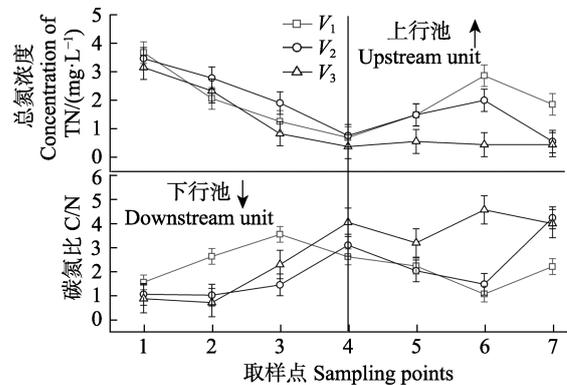


图4 系统内沿程 TN 的浓度与 COD/ρ (TN) 变化趋势

Fig.4 Variation trend of TN concentration and COD/ρ (TN) in the system

进水中 COD/ρ (TN) 在 1~1.5 之间, 而经过处理之后, 能达到 4 左右。下行池之中, V_2 、 V_3 组 COD/ρ (TN) 在滤砂层之后才开始上升, 说明, 低水力负荷下微生物能利用大量被基质与植物根系拦截吸附的有机污染物, 而系统下层对 TN 的消耗速率更快; 而 V_1 组在煤渣层之后 COD/ρ (TN) 却开始下降, 有机质的消耗速率要高于 TN, 这说明高水力负荷不利于系统中微生物

物获取溶解性污染物,使得脱氮效率变差。上行池中, V_3 组 COD/ ρ (TN)上升点要比 V_1 、 V_2 组更靠前, 适宜的水力负荷有利于脱氮菌群的活动, 提升人工湿地系统整体的脱氮能力。

2.4 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的处理效果

V_1 、 V_2 和 V_3 组进水中 NO_3^- -N 浓度分别为(2.47±

0.28)、(2.49±0.34)和(2.60±0.36) mg/L。随着水力负荷的改变, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的浓度趋势类似(图 5)。 V_1 组条件下, 出水中 NO_3^- -N 的浓度为 0.88 mg/L, 去除率为 64.30%, NH_4^+ -N 的去除率只有 48.20%。 V_2 、 V_3 组对 NO_3^- -N 的去除率在 92%以上, 并且 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率在 98%以上。

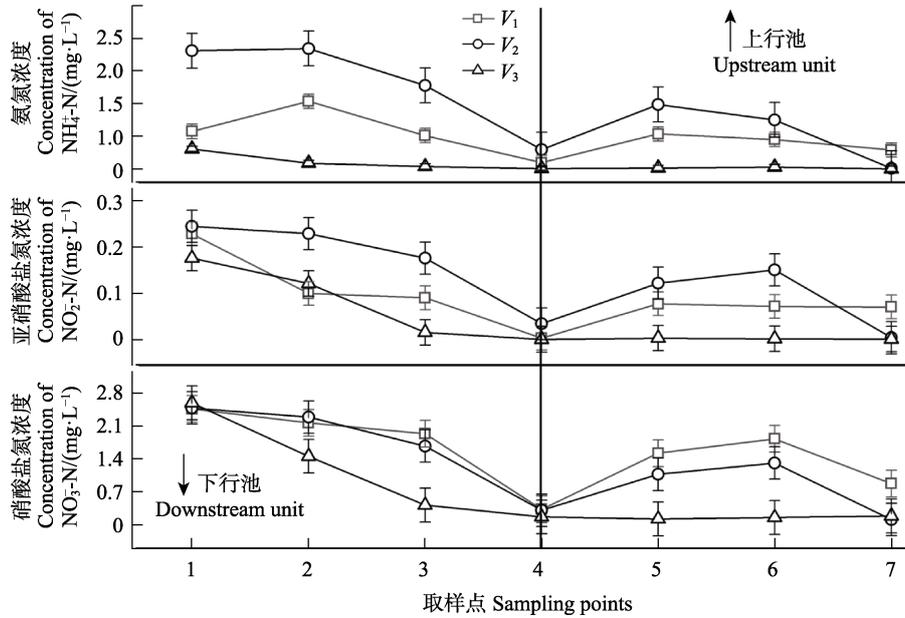


图 5 系统沿程无机氮的变化趋势

Fig.5 Variation trend of dissolved inorganic nitrogen in the system

NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 的曲线变化类似于 NO_3^- -N, 水力负荷对于无机氮(DIN)各组分的影响具有一致性。上行池滤砂层, V_1 组的 NO_3^- -N 的浓度增加了 0.31 mg/L, NH_4^+ -N 的浓度减少了 0.09 mg/L, pH 值降为 8.38。硝化反应中, $\text{NH}_4^++2\text{O}_2\rightarrow\text{NO}_3^-+\text{H}_2\text{O}+2\text{H}^+$, 消耗 NH_4^+ -N 会产生等质量 NO_3^- -N, 并产生一定量 H^+ , 但实际上却有 0.22 mg/L 多余的 NO_3^- -N 累积, 水力负荷过大导致了 NO_3^- -N 的累积。

系统内部的 pH 变化情况如图 6 所示, 3 组实验中, 进水 pH 值为 7.76±0.08, 进入下行池后 pH 都迅速上升, 系统底部则达到了 8.57±0.05, 出水 pH 都在 8 以上。在系统底层, V_3 组 NO_3^- -N 的浓度减少了 2.43 mg/L, pH 值从 7.73 增加到 8.74, 反硝化反应消耗 NO_3^- -N 并积累了大量的 OH^- 离子, 使水质呈碱性。进入上行池后, V_3 组 pH 曲线保持稳定的下降趋势, 其他 2 组曲线略有起伏。

2.5 不同水力负荷下 DIN 的占比

DIN 由 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 组成。进水中, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 占 DIN 主要成分, 经过处理后, NO_3^- -N 则占主要成分。3 组实验中, DIN 在系统内部

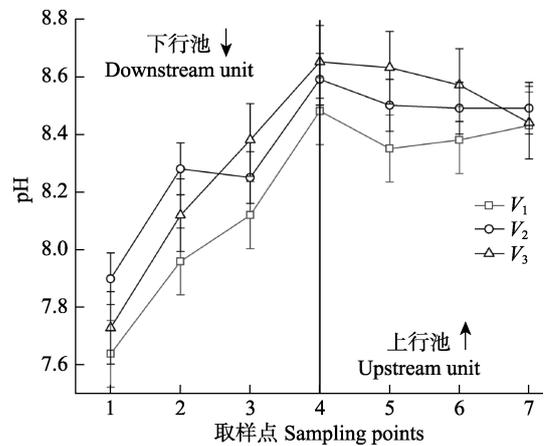


图 6 系统沿程 pH 值变化趋势

Fig.6 Variation trend of pH value in the system

的占比如图 7 所示。 V_1 组进水中, NO_3^- -N 占 DIN 的 75.30%, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 则占据 25.70%; 出水中, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 总占比达到 29.30%, 而 NO_3^- -N 则只有 70.70%。而在 V_2 与 V_3 组进水中, NO_3^- -N 分别占 DIN 的 54.70%、86.00%, 且出水中, V_2 、 V_3 组的 NO_3^- -N 占比都在 86%以上。

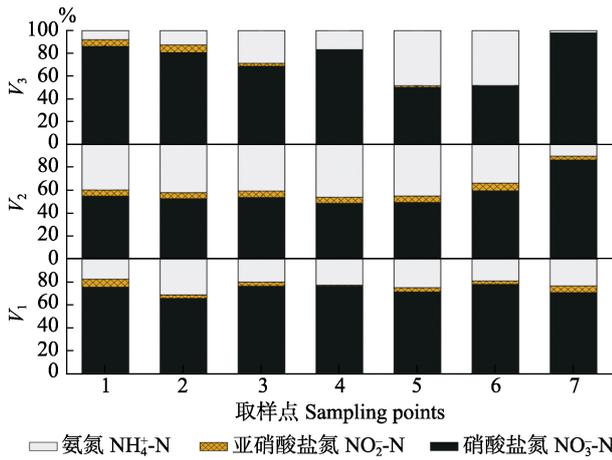


图 7 人工湿地系统沿程 DIN 占比
Fig.7 Proportion of DIN along the constructed wetland system

水力负荷对出水中 DIN 组成成分影响明显，水力负荷越大，出水中 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的占比就越大。低水力负荷下，各个形态下的氮污染物都能被微生物充分利用；高水力负荷下，氮污染物与微生物接触时间短，部分有机氮被转化为 NH₄⁺-N 后未被充分吸收转化，导致出水 NO₃⁻-N 的占比降低。

V₁ 组出水中，NH₄⁺-N 的占比要比进水中的高 33% 左右，而 V₃ 组 NH₄⁺-N 的占比则降低了 74.89%。V₁ 组中，NH₄⁺-N 占比在 20% 左右，且全程变化不大；在 V₂ 组中，NH₄⁺-N 在下行池中占 DIN 的 40% 左右，而进入上行池 NH₄⁺-N 则开始减少；V₃ 组实验中，经过下行池煤渣层处理之后，NH₄⁺-N 的占比开始提升，在上行池中，NH₄⁺-N 的占比接近 50%。

3 讨论

3.1 水力负荷对氮污染物去除的影响

V₁ 与 V₂ 组的 TN 在上行池中浓度升高，这可能与颗粒态污染物的分解有关(赵联芳等, 2006)。高水力负荷下，污水在上行池中流速变缓，使颗粒态污染物得以被分解，导致了 TN 指标的升高。系统对氮污染物的去除主要在系统中下层，尤其是煤渣层以及碎石层。Rousseau 等(2004)研究显示，湿地系统对 NO₃⁻-N 主要通过厌氧条件下微生物的反硝化反应去除，而系统内部 pH 及 DIN 浓度的变化趋势都说明反硝化活动激烈。

各个形态氮污染物的浓度及其占比变化都表明，高水力负荷容易影响脱氮微生物的活动，不利于有机氮的转化和无机氮的吸收。这主要是由于高水力负荷下，部分脱氮细菌随水流带出系统，且污染物在系统内停留的时间过短，与微生物接触不充分。而系统中上层由于溶解氧的补充，使得硝化细菌更活跃，造成了系统末端 NO₃⁻-N 或者 NO₂⁻-N 的累积，影响出水水质，从 V₁ 和 V₂ 组中 NO₃⁻-N 浓度的上升可以说明这一点。

V₃ 组中，NH₄⁺-N 在系统空间内的占比变化可以说明，适宜水力负荷下，系统中氨氧化细菌不断的将有机氮转化为 NH₄⁺-N，而反硝化细菌消耗 NO₃⁻-N 速率更快，使得 NH₄⁺-N 的占比逐渐上升。从而可以认为，下行池煤渣层到上行池煤渣层之间，水力负荷适宜的情况下，氨氧化与反硝化细菌主导氮污染物的转化过程。吴晓磊(1995)认为，复合垂直流人工湿地系统在能够承受的水力负荷范围内出水水质波动不大。如表 1 所示，不同类型的人工湿地系统中 TN 的去除率均与水力负荷负相关。适宜的水力负荷下，TN 的

表 1 不同实验中水力负荷对人工湿地中 TN 去除率的影响
Tab.1 Effects of hydraulic loads on TN removal rates of constructed wetland in different experiments

人工湿地类型 Types of constructed wetlands	水力负荷 Hydraulic load /(m·d ⁻¹)	去除率 Removal rate /%	水力负荷 Hydraulic load /(m·d ⁻¹)	去除率 Removal rate /%	水力负荷 Hydraulic load /(m·d ⁻¹)	去除率 Removal rate /%	参考文献 Reference
改良型垂直流人工湿地 Improved vertical flow constructed wetland	0.25	88.70	0.50	76.00	1.00	58.50	孙亚平等 (2019)
水平潜流人工湿地 Horizontal subsurface flow constructed wetland	0.50	53.30	0.80	34.20	1.20	23.80	高奇英等 (2018)
垂直流人工湿地 Vertical flow constructed wetland	0.13	71.39	0.25	56.07	0.50	49.63	梁康等 (2016)
复合垂直流人工湿地 Integrated vertical flow constructed wetland	0.10	85.90	0.19	84.00	0.50	49.50	本研究 This study

去除率为 50.30%~88.70%; 水力负荷过大, 则导致 TN 的去除率明显降低。康传磊等(2018)研究显示, 异养硝化—好氧反硝化菌能够提高对氮污染物的去除效果; 而对高水力负荷考察之后, 高水力负荷人工湿地中水力停留时间是污染物去除效果的限制因素(高奇英等, 2018)。设定合理的水力负荷与水力停留时间, 或者投加适应性更强的脱氮细菌, 能够在高水力负荷的条件下, 提升氮污染物处理效果。

3.2 水力负荷对 pH 和 DO 的影响

在系统中, 微生物活动产生的副产物如 OH^- 、 H^+ 会改变水体的酸碱度, 影响到菌群的生长, 反硝化过程的最佳 pH 一般为 7.0, pH 小于或大于 7.0, 反硝化速率都会随之降低(徐乐中, 1996)。而水力负荷状态对 pH 的改变影响较小, 但从 V_3 和 V_1 组中 pH 曲线变化可以看出, 在系统后期, 低水力负荷能保持 pH 平稳下降, 高水力负荷状态则会导致 pH 上升。

研究表明, 在反硝化过程中会产生大量的碱度(王淑莹等, 2008), 硝化过程则消耗碱度(王建龙, 2000)。实验中 DIN 与 pH 值的变化说明, 上行池在低水力负荷下, 硝化细菌更活跃, 有利于 NH_4^+-N 的去除; 而高水力负荷不利于硝化反应的进行, 使得出水中的 NH_4^+-N 与 NO_2^--N 浓度过高。张欢欢等(2012)发现, 湿地进水有机负荷和温度对碱度有显著性影响, 但目前相关的研究较少。

由于植物的生长, 上中层 DO 含量更充足, 所以系统的上中层硝化作用活跃。脱氮过程集中在系统中下层, 水力负荷越低, 进水中 DO 富集到填料中的越多, 脱氮效果也就越明显。焦玉恩等(2017)研究证明, 随着水力负荷的增加, 填料层内各处 DO 浓度呈现先增加后降低的趋势。适宜的水力负荷能够维持人工湿地系统中的溶氧水平, 保证脱氮率的提升。

3.3 水力负荷对 COD 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的影响

COD 作为衡量水体中耗氧有机物含量的重要指标, 能够反映出水体的受污染程度(过锋等, 2012; 陈芳等, 2013)。水力负荷对 COD 的去除率影响较小, 虽然进水中 COD 浓度不一样, 但去除率却大致相近。和丽萍等(2014)也认为, 人工湿地中, COD 的去除率受水力负荷影响程度较小。

本研究中, 低水力负荷条件下, 系统内部的 COD 浓度稳定, 而高水力负荷可能会造成系统中生物膜的脱落, 使得 COD 浓度波动较大。系统对于低 COD 养殖尾水的处理效果一般, 水力负荷更多的影响到上行池中 COD 浓度的变化, 所以, 对高 COD 浓度的海

水养殖尾水在复合垂直流人工湿地中不同水力负荷状态下的处理效果考察十分必要。

$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的吸附转化主要发生在下行池的中上层, 即滤砂层附近, 并且吸附转化比较彻底, 使得上行池中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度保持稳定; 同时, 植物发达的根系也起到了吸收利用的效果。基质的吸附是磷污染物主要的去除方式(Vymazal, 2007), 从 V_3 和 V_1 组在各填料层 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率可以发现, 水力学因素会导致发挥吸附作用的基质层靠后, 影响最终处理效果。因此, 本研究中高水力负荷条件下 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率都不如低水力负荷条件, 这与凌祯等(2011)的研究结果相似, 磷污染物的去除率与水力负荷负相关。

4 结论

复合垂直流人工湿地系统对海水养殖尾水中的氮、磷污染物有良好稳定的去除效果。水力负荷对 COD 去除率影响不大, 去除率最高只有 36.25%; 水力负荷为 0.50 m/d 时, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率为 77.44%; 水力负荷降低到 0.10 m/d 时, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率达 88.19%。水力负荷越大, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的吸附转化越靠系统后期。水力负荷为 0.50 m/d 时, TN 去除率只有 49.50%; 水力负荷降低到 0.10 m/d 时, TN 去除率达 85.90%。水力负荷状态同样影响脱氮能力, 不同水力负荷状态下, 下行池的氮污染物转化最多, 去除率达到 80% 以上, 高水力负荷会导致上行池中 NO_2^--N 与 NO_3^--N 累积, 适宜的水力负荷才能维持系统的稳定。

参 考 文 献

- CHEN F, BAO H J. Assessment of pollution sources in Laoshan Reservoir and its countermeasures. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(4): 104–108 [陈芳, 包慧娟. 崂山水库污染源评价分析及治理对策. *渔业科学进展*, 2013, 34(4): 104–108]
- DING Y, TANG H Y, LIU X P, *et al.* Research progress in different kinds of constructed wetlands for nitrogen removal from wastewater. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(7): 1–3, 9 [丁怡, 唐海燕, 刘兴坡, 等. 不同类型人工湿地在污水脱氮中的研究进展. *工业水处理*, 2019, 39(7): 1–3, 9]
- GAO Q Y, SHEN W G, LIU X B. Study on the treatment of sewage plant tail water by constructed wetland under high hydraulic load. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(6): 66–71 [高奇英, 沈文钢, 刘晓波. 高水力负荷下人工湿地处理污水厂尾水的研究. *环境科学导刊*, 2018, 37(6): 66–71]
- GUO F, ZHAO J, CHEN J F, *et al.* Nitrogen and phosphorous pollution in shellfish culture areas of Jiaozhou Bay. *Progress*

- in Fishery Sciences, 2012, 33(5): 116–122 [过锋, 赵俊, 陈聚法, 等. 胶州湾贝类养殖区氮、磷污染现状及动态变化. 渔业科学进展, 2012, 33(5): 116–122]
- HE F, WU Z B, TAO J, *et al.* Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 47–50 [贺锋, 吴振斌, 陶菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用. 环境科学, 2005, 26(1): 47–50]
- HE L P, FAN Z W, CHEN J, *et al.* Analysis of pollution treatment effect of constructed wetland under different hydraulic loading. *Sichuan Environment*, 2014, 33(2): 89–94 [和丽萍, 范泽文, 陈静, 等. 不同水力负荷条件下的人工湿地污染处理效果分析. 四川环境, 2014, 33(2): 89–94]
- HU X F, WANG X D, CHEN J. Study on purification of scenic water by vertical flow constructed wetland at high hydraulic loadings. *Sichuan Environment*, 2008, 27(1): 22–26 [胡小芳, 王向德, 陈杰. 高水力负荷下垂直流人工湿地净化景观水的研究. 四川环境, 2008, 27(1): 22–26]
- JI G D, SUN T J, NI J R, *et al.* Surface flow constructed wetland for heavy oil produced water treatment. *Bioresource Technology*, 2007, 98(2): 436–441
- JIAO Y E, LIU R, ZHANG R X, *et al.* Effect of different hydraulic loading rate on migration and transformation of DO in subsurface flow constructed wetlands. *Liaoning Chemical Industry*, 2017, 46(12): 1154–1155, 1158 [焦玉恩, 刘瑞, 张荣新, 等. 不同水力负荷对潜流人工湿地内 DO 迁移转化影响. 辽宁化工, 2017, 46(12): 1154–1155, 1158]
- KANG C L, LI Q F, ZHANG Y, *et al.* Purifying effect of three heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria strains on the farming water of *Verasper variegates*. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 42–48 [康传磊, 李秋芬, 张艳, 等. 三株异养硝化-好氧反硝化细菌对圆斑星鲈养殖水质的净化效果. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 42–48]
- LIANG K, CHANG J J, WANG F H, *et al.* Purification ability of tail water and optimal hydraulic loading rates in vertical flow constructed wetland. *Journal of Lake Science*, 2016, 28(1): 114–123 [梁康, 常军军, 王飞华, 等. 垂直流人工湿地对尾水的净化效果及最佳水力负荷. 湖泊科学, 2016, 28(1): 114–123]
- LIANG X Y, ZHU H, BAÑUELOS G, *et al.* Constructed wetlands for saline wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 275–285
- LING Z, YANG G R, YU G R, *et al.* Influence of different plants and hydraulic loading on the nitrogen and phosphorus removal of constructed wetlands. *China Environmental Science*, 2011, 31(11): 1815–1820 [凌祯, 杨具瑞, 于国荣, 等. 不同植物与水力负荷对人工湿地脱氮除磷的影响. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1815–1820]
- QIAO W L, ZHANG Y, XU X Y, *et al.* Review on treatment of aquaculture wastewater and wastes. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(10): 26–31 [乔卫龙, 张焯, 徐向阳, 等. 水产养殖废水及固体废弃物处理的研究进展. 工业水处理, 2019, 39(10): 26–31]
- QU K M, DU S E, CUI Z G. Construction the engineering and technology of efficient mariculture system (Revised). Beijing: Ocean Press, 2018, 2, 25 [曲克明, 杜守恩, 崔正国. 海水工厂化高效养殖体系构建工程技术(修订版). 北京: 海洋出版社, 2018, 2, 25]
- ROUSSEAU D P L, VANROLLEGHEM P A, DE PAUW N. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Water Research*, 2004, 38(6): 1484–1493
- SHU T F, LUO L, WEN Y M. Effects of mariculture on coastal ecological environment. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(2): 74–79 [舒廷飞, 罗琳, 温琰茂. 海水养殖对近岸生态环境的影响. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 74–79]
- SUN Y P, ZHOU P C, YUAN M Z, *et al.* Effect of hydraulic loading on the degradation of the simulated tail water from wastewater treatment plant by improved vertical flow constructed wetland. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(11): 2629–2636 [孙亚平, 周品成, 袁敏忠, 等. 水力负荷对改良型垂直流人工湿地降解模拟污水厂尾水效果的影响. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2629–2636]
- VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 48–65
- WANG J L. Novel process for nitrogen removal and its technical principle. *China Water and Wastewater*, 2000, 16(2): 25–28 [王建龙. 生物脱氮新工艺及其技术原理. 中国给水排水, 2000, 16(2): 25–28]
- WANG S H, WANG W, YU Y. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(3): 359–36 [王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 359–362]
- WANG S Y, SUN H W, YANG Q, *et al.* Biochemical reaction mechanism and kinetics of denitrification. *Chinese Journal of Applied And Environmental Biology*, 2008, 14(5): 732–736 [王淑莹, 孙洪伟, 杨庆, 等. 传统生物脱氮反硝化过程的生化机理及动力学. 应用与环境生物学报, 2008, 14(5): 732–736]
- WEN Z L, WEN Y M. The impact of mariculture on the environment. *Nanhai Yanjiu Yu Kaifa*, 2000(1): 37–40 [温志良, 温琰茂. 海水养殖对环境的影响. 南海研究与开发, 2000(1): 37–40]
- WU X L. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1995, 16(3): 83–86 [吴晓磊. 人工湿地废水处理机理. 环境科学, 1995, 16(3): 83–86]
- XIA H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4): 51–59 [夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51–59]
- XU L Z. Effect on N and P removals and control of pH and alkalinity. *Water and Wastewater Engineering*, 1996(1): 10–13 [徐乐中. pH 值碱度对脱氮除磷效果的影响及其控

- 制方法. 给水排水, 1996(1): 10–13]
- XU Y H, CUI Z G, QU K M, *et al.* Purification efficiency of mariculture wastewater in constructed wetlands with two salt-tolerant plants. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 80–88 [许永辉, 崔正国, 曲克明, 等. 不同耐盐植物人工湿地净化养殖外排水效果. *渔业科学进展*, 2018, 39(3): 80–88]
- ZHANG H H, HUANG Y M. Variation in pH, acidity and alkalinity in long-term operation of the subsurface flow constructed wetland as a domestic wastewater treatment system. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2012, 34(5): 63–67 [张欢欢, 黄玉明. 潜流人工湿地污水处理系统长期运行中 pH 及酸度和碱度的变化. *西南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(5): 63–67]
- ZHANG S Y, BAN Y H, XU Z Y. Comparative evaluation of influencing factors on aquaculture wastewater treatment by various constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2016, 93: 221–225
- ZHAO L F, ZHU W, ZHAO J. Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1821–1827 [赵联芳, 朱伟, 赵建. 人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理. *环境科学学报*, 2006, 26(11): 1821–1827]

(编辑 马瑾艳)

Purification Characteristics of Constructed Wetland under Different Hydraulic Loads after Treatment of Marine Aquaculture Tailwater

TANG Xiaoshuang^{1,2}, ZHANG Keke^{1,2}, JIA Jun^{1,2}, CUI Zhengguo^{2①}, QU Keming²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment; Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract One of the main problems faced by the aquaculture industry is the discharge of marine aquaculture tailwater. Constructed wetlands may work as a comprehensive water treatment technology, effectively removing pollutants such as nitrogen and phosphorus in aquaculture tail water. For the proper implementation of constructed wetland technology, hydraulic load conditions must be optimized. The treatment effect of vertical flow constructed wetland system on the tail water of *Paralichthys olivaceus* was studied under three hydraulic loads ($V_1=0.50$ m/d, $V_2=0.19$ m/d, $V_3=0.10$ m/d). The treatment effect of the system for the main pollutants in the aquaculture tailwater was significantly different under three hydraulic loading conditions. When the concentration of chemical oxygen demand (COD) in the influent water was relatively low, the removal rate was also low, with a peak removal rate of only 36.25%. The effect of hydraulic loading on the removal rate of COD was not obvious. When the hydraulic load was 0.50 m/d, the removal rate of total nitrogen (TN) was only 49.50%; however, when the hydraulic load was 0.10 m/d, the TN removal rate was 85.90%. The removal rate of active phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) was less affected by hydraulic load, showing a removal rate of more than 77%. Hydraulic load affects the removal effect of nitrogen and phosphorus in the system; for example, in the downstream unit the removal rate of nitrogen pollutants was more than 80%, whereas in the upstream unit, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) or nitrite nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$) accumulated under high hydraulic loads. The adsorption and conversion of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ mainly occurred in the upper and middle layers of the downstream unit; the larger the hydraulic load, the closer the adsorption and conversion of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was to the rear of the system.

Key words Mariculture tailwater; Constructed wetland; Hydraulic load

① Corresponding author: CUI Zhengguo, E-mail: cuizg@ysfri.ac.cn