

不同稻渔系统对池塘养殖尾水的净化效果分析

董贯仓¹, 王亚楠¹, 孙鲁峰¹, 师吉华¹, 杜兴华¹, 谭圣延²

(1. 山东省淡水渔业研究院, 山东 济南 250013; 2. 济宁任兴水产有限公司, 山东 济宁 272061)

摘要:采用围隔实验法考察不同虾蟹共作稻渔系统对养殖尾水的净化效果。结果表明:稻田及分别投放小龙虾和河蟹等稻渔共作系统均对养殖尾水净化作用显著,且相互间基本无显著差异($P > 0.05$);稻渔系统对水体中氨氮、亚硝氮、TN和TP的最大去除率分别为67.48%、78.13%、37.97%和53.05%;养殖尾水中 I_{Mn} 与悬浮物于1 d~2 d、氨氮于2 d~4 d、TN于4 d~8 d、TP于8 d~16 d后显著降至较低水平;混养小龙虾和河蟹未对稻田净化水体产生显著扰动影响。

关键词:池塘养殖尾水;稻田系统;净化效果;渔业利用

中图分类号:X714

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)01-0065-04

A Comparison Study on Purifying Ability of Different Rice-Fish Farming Systems on Wastewater from Aquaculture Pond

DONG Guan-cang¹, WANG Ya-nan¹, SUN Lu-feng¹, SHI Ji-hua¹, DU Xing-hua¹, TAN Sheng-yan²

(1. Shandong Freshwater Fisheries Research Institute, Jinan, Shandong 250013, China;

2. Jining Renxing Fishery Co., Ltd, Jining, Shandong 272061, China)

Abstract: In this paper, the purification effects of different rice-fish farming systems on aquaculture wastewater were studied through enclosure experiments. Results showed that paddy field, rice-crayfish and rice-crab farming systems all had significant purification effects on aquaculture wastewater, and there was no significant difference among different systems ($P > 0.05$). The maximum removal rates of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, TN and TP were 67.48%, 78.13%, 37.97% and 53.05%, respectively. I_{Mn} and suspended solids in aquaculture wastewater were reduced to a minimum in 1~2 days, ammonia nitrogen was in 2~4 days, TN was in 4~8 days and TP was in 8~16 days. In addition, the co-culture of crayfish and crab in paddy fields had no significant disturbance on the purification of aquaculture wastewater.

Key words: Wastewater from aquaculture pond; Paddy field system; Purifying ability; Fishery utilization

池塘养殖是我国当前主要生产方式之一,伴随生产中大量物质投入,常存在水质恶化并导致病害、效益下降及影响品质等诸多弊端,污水排出还可能加剧周边水体富营养化^[1-2],控制养殖污染是实现渔业健康发展和水资源可持续利用的重要保障。在尾水处理方法中,生物净化是最为绿色环保的处理技术^[3-4],而适宜的水生植物是影响净化效果的关键因素。水稻作为我国重要的粮食作物,在水质净化中具有独特的作用^[5-6],其生长需肥旺期与养殖需换水周期较一致,故可作为养殖尾水的净化植物。在山东淡水养殖面积逐年萎缩现状下,渔业和稻田生产的有机耦合,对减轻养殖物质富集和

“促养增粮”均具有巨大的应用潜力。今通过将池塘养殖水体排入稻渔系统实现尾水营养物质再次利用,并于稻田中增殖虾蟹获取更多经济产出,同时对其水质调控效果进行跟踪监测,以期分析套养渔业生物对水质净化系统的扰动影响,优化构建渔

收稿日期:2019-10-29;修订日期:2020-11-09

基金项目:山东省重点研发计划基金资助项目(2019GSF109111);山东省农业重大应用技术创新“淡水池塘生态养殖关键技术研究及示范”基金资助项目(2018—2020);山东省现代农业产业体系鱼类创新团队环境调控岗基金资助项目(SDAIT-12-07)

作者简介:董贯仓(1980—),男,山东巨野人,副研究员,博士,研究方向为水产增养殖、渔业资源与环境评价等。

业的稻田多重利用模式。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验在山东省济宁市任城区进行,于0.033 km²稻田的东北向、距离环沟5 m处南北向设置两排共计10个4 m×4 m×1.5 m的双面涂塑高密度聚乙烯编织布围隔,排间距与行间距均为2.0 m,期间稻田水深0.15 m~0.70 m。实验用小龙虾(*Procambarus clarkii*)和河蟹(*Eriocheir sinensis*)以地笼采捕于稻渔混养池塘,用网围在环沟暂养1周后放入围隔,小龙虾和河蟹体重分别为(18.75±2.14)g和(82.96±8.02)g。

1.2 实验设计

设水稻(R)、水稻+小龙虾(RP)和水稻+河蟹(RC)3个处理,其中R为4个重复,其余各3个重复,实验期为2018年9月5日—10月7日共32 d。

小龙虾和河蟹于8月30日散养于围隔中,投放量分别为30只/围隔和12只/围隔,实验期间无河蟹死亡,少数小龙虾死亡后及时以暂养虾补充。

1.3 样品采集与测定

实验初用水泵将养殖尾水注入围隔,期间不排水亦不再补水。分别于0 d、1 d、2 d、4 d、8 d、16 d和32 d,在各围隔东侧中部内侧0.5 m处采集表层水样分析。水温、溶解氧(DO)和pH值用YSI-MP556型水质分析仪现场测定,高锰酸盐指数(I_{Mn})、亚硝氮(NO₂⁻-N)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和悬浮物(SS)参照《水环境监测规范》(SL 219—2013)中的方法分析测定。依据《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007)(以下简称《排放要求》)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《标准》)对水质状况进行分析与评价。数据统计分析使用Office Excel 2010和SPSS 21.0软件。

2 结果与分析

2.1 池塘养殖尾水水质状况

对养殖尾水的检测结果显示,池塘养殖水体中NH₃-N、NO₂⁻-N、TN、TP和I_{Mn}测定值分别为(2.52±0.12) mg/L、(0.017±0.001) mg/L、(5.52±0.14) mg/L、(0.29±0.01) mg/L和(6.49±0.10) mg/L。其中,TP和I_{Mn}值均达到《排放要求》I类排放标准,而TN值超出II类排放标准

10.34%。养殖尾水SS值较高(85.67±3.51) mg/L,超I类排放标准71.33%而符合II类排放要求。 $\rho(\text{N})/\rho(\text{P})$ 平均值是19,为磷限制水体。

2.2 稻田系统水体理化状况

实验期间,不同稻渔系统间水体理化状况无显著差异($P>0.05$),水温在16.4℃~23.0℃间浮动,并随时间推移逐渐下降($P<0.05$)。DO在初期相对较高,为(6.49±0.29) mg/L,然后迅速下降并于8 d后降至最低(3.14±0.28) mg/L($P<0.05$),随后稍上升不过无显著差异($P>0.05$)。pH值在8.43~9.44间波动,均值为8.76±0.25。实验系统内水位变化显著,由最初的(62.50±1.58) cm随时间差异急剧下降至(27.40±1.17) cm,不同时间均差异显著($P<0.05$)。水位的急剧下降,一方面是由于水分的蒸发^[7],另一方面,实验稻田地势相对较高且系统内水位高于周边稻田,期间可能存在一定的土壤水分渗漏。而刘路广等^[8]对灌溉定额计算也发现,受计算时段较长、水面蒸发大于土壤蒸发、系统内水层较深及基于渔业需求的较大定额补水等因素影响,虾稻共作系统的灌溉定额约为水稻灌溉定额的3倍左右。

2.3 不同稻渔系统的养殖尾水净化效果

水体SS的产生与饲料利用和生物扰动有关,不仅影响水体中藻类生长,还对养殖生物造成不利影响^[9]。本实验中,水体SS因注水扰动稍上升为(96.80±5.79) mg/L,后随净化时间推移急剧下降($P<0.05$),于2 d后降至较低水平(34.70±11.42) mg/L,并达到《排放要求》I类排放标准,虽稍高于16 d后测定结果,但无显著差异($P>0.05$),随后稍波动,不过均显著低于0 d测定结果($P<0.05$)。该结果与陈兴华等^[10]发现稻田降低污水中SS 50%~70%的结果一致。同时,不同稻渔系统SS在相同时间无显著差异($P>0.05$),表明实验条件下养殖虾蟹未产生显著的生物扰动。李德尚等^[11]发现,精养池中SS分解耗氧约占池塘氧总支出的65%,去除SS即可有效净化水体。实验稻渔共作系统对尾水SS的良好去除效果表明了良好的水体快速净化能力。

因残饵和养殖动物排泄物的存在,养殖尾水多富含N、P等营养物质。稻田作为一个复合系统,可利用植物的吸收、底质的吸附与截留及根系微生物的降解等功能,对N、P富集水体具有较好的净化潜能,实验水体的N、P营养盐类在不同稻渔系

统中均去除效果显著。

水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 随时间推移逐步下降而后稍有上升,于 2 d 后均达到《标准》Ⅲ类水质,并于 4 d ~ 8 d 降至最低水平 ($P < 0.05$),R、RP 和 RC 处理对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 最大去除率分别为 64.8%、68.6% 和 69.7% 且相互间无显著差异 ($P > 0.05$)。随后水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 值稍有上升,不过与 2 d、4 d 的测定结果无显著差异 ($P > 0.05$)。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 随时间推移稍波动后逐步降低,至 32 d 降至最低,R、RP 和 RC 处理对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 最大去除率分别为 86.9%、81.4% 和 68.8%,且不同处理的系统内 $\text{NO}_2\text{-N}$ 总量逐步下降并于 32 d 最大降低了 94.3%、91.9% 和 86.2%。

TN 随时间推移先下降而后上升,于 4 d ~ 8 d 降至最低而后显著增加 ($P < 0.05$),其中,R、RP 和 RC 处理对 TN 最大去除率分别为 41.1%、37.6% 和 34.7%,相互间无显著差异 ($P > 0.05$)。TP 随时间推移先上升后下降而后稍升高地波浪式下降,至 16 d 降至最低,且 R、RP 和 RC 处理 TP 最高去除率分别为 52.4%、57.8% 和 49.3%,随后水体 TP 含量显著上升。

伴随养殖尾水在稻渔系统的净化,实验水体各营养盐含量呈显著下降趋势,表明了稻渔系统对养殖尾水良好的净化作用。同时,实验稻渔系统对尾水 TN 和 TP 的最大去除率分别为 37.97% 和 53.05%,稍低于 Li 等^[5-6]将农村污水引入稻田后 TN 55.7% ~ 69.3% 和 TP 56.7% ~ 71.4% 的去除率。由于实验期间水位下降明显,若以水体营养盐总量去除率计算,水体 TN、TP 总量去除率最终达 59.26% 和 69.43%,与 Li 等^[5-6]研究结果基本一致。同时,实验末 TN、TP 含量有所上升,一方面可能随水温降低系统净化功能减弱,另一方面秋季枯枝落叶因腐烂或微生物作用进入水体^[12],该研究结果与生态湿地净化功能的季节变化相符^[13]。此外,实验水体 I_{Mn} 和 SS 于 1 d ~ 2 d、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 于 2 d ~ 4 d、TN 于 4 d ~ 8 d 及 TP 于 8 d ~ 16 d 后显著降至较低水平,除 SS 外随后均逐步上升特别是实验末期含量多显著升高,亦反映了由于蒸发和渗漏等水分流失导致的浓缩作用影响了测定结果。袁新程等^[14]研究发现,养殖废水的 SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 均具有较好的自由沉降效果,甚至 SS 的沉降率在 150 min 后达 59% 以上。水体 N、P 的去除主要通过植物的吸收同化、微生物的消化和反硝化及基质的吸附等作用^[15],作用

效果相对较慢,故而养殖尾水的排放或循环再利用均需根据具体需求选择适宜的净化时机。

水体 I_{Mn} 作为衡量水中有机物质多少的指标,直接影响养殖生物的生长。本研究中,实验初期及 1 d 后水体 I_{Mn} 分别为 (10.12 ± 0.46) mg/L 和 (12.05 ± 0.94) mg/L,稍高于池塘养殖水体,可能尾水注入时的人为扰动及稻田生产前期施用的有机肥导致了 I_{Mn} 的升高;研究期间,水体 I_{Mn} 变化趋势与 SS 基本一致,于 2 d 降至较低水平的 (4.11 ± 0.26) mg/L,达到《标准》Ⅲ类并接近Ⅱ类水质,随后虽有波动但无显著差异 ($P > 0.05$),对环境威胁不大。不同稻渔系统 I_{Mn} 在相同时间内无显著差异 ($P > 0.05$),对 I_{Mn} 最大去除率为 59.41%,稍低于陈兴华等^[10]稻田湿地对生活污水 I_{Mn} 的去除率 60% ~ 80%,而与徐芳等^[16]20 d 供试植物对 I_{Mn} 去除率达到 59% 以上的研究结果基本一致。Montemurro 等^[17]研究表明植物对水体中某种营养物质的吸收利用率与其供应浓度有关,周玥等^[18]研究也发现湿地植物对高浓度污水中 I_{Mn} 的净化效果优于低浓度污水,本实验 I_{Mn} 去除率稍低可能与养殖尾水中含量不高有关。同时,实验水体 I_{Mn} 随后波动并有所上升,均属《标准》Ⅲ类水质。徐芳等^[16]和周玥等^[18]研究均表明,前期 I_{Mn} 迅速下降随后缓慢下降,在经历了前期较好的净化后,水中剩余部分有机质很难去除。

2.4 稻田净水系统的渔业利用

稻田渔业是充分利用土地和水体资源及生物间互惠关系,将水稻种植与经济渔业动物养殖相结合的一种生态利用模式。水体环境是影响稻渔共作的重要因素,水质好坏直接影响着养殖及水体生物的生长发育。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 作为重要的渔业环境指标,是渔业生产中的常见胁迫因子,对水生动物具有较强的毒害作用。上述研究中,除初始阶段养殖尾水及扰动影响水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 稍高外,净化水体中 (0.65 ± 0.12) mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 (0.002 ± 0.001) mg/L 的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 均处于较低的水平(2 d ~ 32 d),远低于江敏等^[19]仔蟹 $\text{NH}_3\text{-N}$ (5.12 mg/L) 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 安全值 (0.11 mg/L),故而实验稻田系统中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量不会影响养殖生物的正常生长。

DO 是渔业生产重要的水环境因子,由于稻田系统中植株过密造成透光条件差,故而水体 DO 是

制约稻田渔业的关键因素。上述研究中,养殖尾水注入初期 DO 较高 (6.47 ± 0.29) mg/L, 随后显著降低并处于相对较低的水平 (3.41 ± 0.39) mg/L ($P < 0.05$)。魏万权等^[20]认为 DO 在 4 mg/L 或 3.0 mg/L 以上即可满足多数鱼或虾蟹的生存条件,一般鱼或虾蟹的致死 DO 分别为 1.0 mg/L ~ 2.0 mg/L 或 0.5 mg/L ~ 1.0 mg/L。同时,在 DO 较低水平的稻田系统中,小龙虾的活动趋少或者栖息在水稻上^[21],而河蟹也可以爬到田埂上活动^[22],故实验系统 DO 虽偏低但应该不影响小龙虾和河蟹的正常生长。然而,DO 的降低会引起水体污染和水质下降,而低氧胁迫可能造成养殖生物免疫机能的下降,对养殖生物造成一定负面影响。故在稻渔共作中,仍需慎重对待水体环境变化,并采取如人工增氧、增加池梗设置或稀疏种植密度等措施,以规避水体 DO 降低等不利影响。

3 结语

上述研究的池塘养殖尾水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 和 I_{Mn} 值分别属《标准》劣 V 类、劣 V 类、IV 类和 IV 类水质,各超 III 类水质标准 152%、452%、43.7% 和 8.2%。稻渔共作系统对养殖尾水净化效果显著,水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN 和 TP 最大去除率分别为 67.5%、78.1%、38% 和 53.0%,且养殖尾水中 I_{Mn} 与 SS 于 1 d ~ 2 d、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 于 2 d ~ 4 d、TN 于 4 d ~ 8 d 及 TP 于 8 d ~ 16 d 后显著降至较低水平。投放小龙虾和河蟹未对稻田净化水体产生显著扰动影响,稻渔耦合共作有助于拓展渔业利用空间,虽在济宁地区具有一定应用前景,但其量化配比及投放渔业生物的种类、规模与管理技术还有待进一步验证和改进。

[参考文献]

- [1] 文建辉,李建,许睿,等. 基于 GIS 技术和线性结构模型的漓江流域水污染状况分析[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(1):27-30.
- [2] 王霞,刘雷,何跃,等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(2):58-61.
- [3] AKINBILE C O, YUSOFF M S. Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment [J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, 14(3): 201-211.
- [4] 吴湘,王友慧,郭建林,等. 3 类水生植物对池塘养殖废水氮磷去除效果的研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(9): 1876-1881.
- [5] LI S, LI H, LIANG X Q, et al. Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China [J]. J Soil Sediments, 2009, 9(5): 433-442.
- [6] LI S, LI H, LIANG X Q, et al. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basina [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1-3): 301-308.
- [7] 张翠翠,张泽铭,马宁,等. 济宁市近 40 年蒸发量变化特征分析[J]. 甘肃农业, 2012(7): 91-92.
- [8] 刘路广,吴瑕,关洪林,等. 虾稻共作灌溉定额确定方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 71-76.
- [9] YANG G J, SONG L, LU X Q, et al. Effect of the exposure to suspended solids on the enzymatic activity in the bivalve *Sinonovacula constricta* [J]. Aquaculture and Fisheries, 2017, 2(1): 10-17.
- [10] 陈兴华,王方成,杨树果,等. 应用人工湿地[稻田系统]处理北部高寒地区小城镇综合污水[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 77-80.
- [11] 李德尚,董双林. 对虾与鱼、贝类封闭式综合养殖的实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(1): 90-96.
- [12] 朱雪生,王丽卿,徐后涛,等. 利用人工湿地处理池塘养殖废水效果分析[J]. 渔业现代化, 2009, 36(4): 8-12.
- [13] 王学华,沈耀良,张娜,等. 季节变化对人工湿地与生态塘组合工艺脱氮除磷性能影响[J]. 环境工程, 2014, 32(6): 20-23.
- [14] 袁新程,施永海,刘永士. 池塘养殖废水自由沉降及其三态氮、总氮和总磷含量变化[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(4): 56-62.
- [15] WU H M, ZHANG J, WEI R, et al. Nitrogen transformation and balance in constructed wetlands for lightly polluted river water treatment using different macrophytes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(1): 443-451.
- [16] 徐芳,刘明,宗俊勤,等. 低温季节不同禾草对富营养水体净化能力的研究[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 184-190.
- [17] MONTEMURRO F, CONVERTINI G, FERRID D. Nitrogen application in winter wheat grown in mediterranean condition; effects on nitrogen uptake, utilization efficiency, and soil nitrogen deficit [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(10): 1681-1703.
- [18] 周玥,韩玉国,张梦,等. 4 种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3353-3360.
- [19] 江敏,臧维玲,朱正国,等. 亚硝酸盐和氨对河蟹蚤状幼体的毒性研究[J]. 水产科技情报, 1997, 24(3): 126-130.
- [20] 魏万权,林仕梅. 水产养殖中溶解氧的研究[J]. 饲料工业, 2007, 28(16): 20-23.
- [21] 管勤壮. 稻虾共作模式下小龙虾活动对稻田环境影响的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2018.
- [22] 孙文通,张庆阳,马旭洲,等. 不同河蟹放养密度对养殖稻田水环境及水稻产量影响的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(3): 366-373.