

生态沟—根孔湿地系统对大规模 水产养殖尾水的净化作用

薛锐¹, 杨琪琦¹, 刘国荣¹, 邱文杰², 管卫兵^{1,3}

(1.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306;

2.银川市贺兰县农业农村局, 宁夏 银川 750000; 3.农业农村部稻渔综合种养生态重点试验室, 上海 201306)

摘要: [目的] 分析基于根孔湿地构建的生态沟渠对水产养殖尾水的净化效果, 为大面积养殖区循环养殖和污染减量化提供科学参考。[方法] 选取养殖面积超过 500 hm² 的宁夏回族自治区贺兰县寇家湖园区进行试验, 以原有农田排水沟渠为基础, 在沟渠两岸构建根孔湿地提升其净化能力, 于 2022 和 2023 年对沿程水体进行采样, 分析该系统对大面积水产养殖区产生的养殖尾水的净化效果。[结果] 2022 年系统初运行时生态沟渠能有效净化养殖尾水中的磷酸盐、亚硝酸盐和氨氮, 净化率分别为 97.15%, 96.00% 和 59.65%; 2023 年日常运行时该生态沟渠能有效净化大面积养殖区日常养殖过程中产生的养殖尾水, 对磷酸盐、亚硝酸盐和氨氮净化率最高可达到 87.70%, 72.89% 和 83.15%, 系统净化末端氨氮浓度低于 0.5 mg/L, 达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 II 类标准; 缩短 1/2 的净化路程后, 生态沟渠对养殖尾水依旧具有较好的净化效果, 两个长度下生态沟渠出水口的营养盐浓度无显著性差异 ($p < 0.05$)。[结论] 基于根孔湿地构建的生态沟渠能有效处理大面积水产养殖区日常养殖过程中产生的尾水, 可实现养殖尾水的循环利用。

关键词: 大面积养殖区; 水产养殖尾水; 水体净化; 生态沟渠; 根孔湿地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0168-09

中图分类号: X52, F323.22

文献参数: 薛锐, 杨琪琦, 刘国荣, 等. 生态沟—根孔湿地系统对大规模水产养殖尾水的净化作用[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 168-176. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240719.001; Xue Rui, Yang Qiqi, Liu Guorong, et al. Purification of tail water from large-scale aquaculture by ecological ditch-root channel wetland system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 168-176.

Purification of Tail Water from Large-scale Aquaculture by Ecological Ditch-Root Channel Wetland System

Xue Rui¹, Yang Qiqi¹, Liu Guorong¹, Qiu Wenjie², Guan Weibing^{1,3}

(1.College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai

201306; 2.Helan County Agricultural and Rural Bureau, Yinchuan City, Yinchuan 750000 in Ningxia;

3.Key Laboratory of Comprehensive Nourishing Ecological Ecology of Agricultural and Rural Ministry, Shanghai 201306)

Abstract: [Objective] The capacity of a drainage ditch modified as a root channel wetland (ecological ditch) to purify aquaculture tail water was analysed in order to provide a scientific reference for circular aquaculture and pollution reduction in areas of large-scale aquaculture. [Methods] The study site was Koujia Lake Park, in Helan County, Ningxia Hui Autonomous Region, with an aquaculture area exceeding 500 hectares. We constructed experimental root channel wetlands on both sides of an original farmland drainage ditch to improve the purification capacity of the ditch. To evaluate the purification effect of this ecological ditch system on the tail water from large-scale aquaculture, we collected water samples in the ecological ditch in 2022 and 2023. [Results] In 2022, at the onset of its operation, the ecological ditch effectively purified phosphate, nitrite, and ammonia nitrogen in the aquaculture tail water, with the purification rate being

收稿日期: 2024-03-30

修回日期: 2024-06-03

资助项目: 宁夏回族自治区科技重点研发计划项目“稻渔综合种养立体复合系统生态养殖技术研究与示范”(2020BBF02009)

第一作者: 薛锐(1999—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 硕士研究生, 研究方向为资源生态和恢复。Email: xuerui0619@126.com。

通信作者: 管卫兵(1972—), 男(汉族), 上海市人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事生态渔业及恢复生态方面的研究。Email: wbguan@shou.edu.cn。

97.15%, 96.00%, and 59.65%, respectively. In 2023, the ecological ditch effectively purified the aquaculture tail water on a daily basis. The maximum purification rate for phosphate, nitrite, and ammonia nitrogen was 87.70%, 72.89%, and 83.15%, respectively. The concentration of ammonia nitrogen at the purification end of the system was less than 0.5 mg/L, reaching the Class II standard of the ‘Surface Water Environmental Quality Standard’ (GB3838-2002). After shortening the purification distance by half, the ecological ditch still had a good purification effect on the aquaculture tail water, with no significant increase in the nutrient concentration at the ditch outlet ($p < 0.05$). [Conclusion] The construction of a root channel wetland around the drainage ditch could effectively purify the tail water generated in the daily aquaculture operations across a large-scale aquaculture area, and achieve water recycling.

Keywords: large-scale aquaculture; aquaculture tail water; water purification; ecological ditch; root channel wetland

水产养殖在农业水产中占有重要的地位,集约化和高密度养殖模式在提高产量的同时也加大了环境污染的风险。水产养殖系统中富含有机质的水体和沉积物会在养殖户进行换水、销售、清淤等养殖活动时进入到外界环境中,若不对水产养殖尾水进行有效处理,大量氮磷营养元素及有机物外排,会造成流域水体的富营养化,破坏河流、湖泊等水体的生态环境^[1]。

人工湿地具有高净化率、运行简易和费用低等优势,被广泛应用于处理养殖尾水^[2]。人工湿地中的植物、微生物和基质通过吸收、截留、吸附等作用能降低污水中的营养物质含量^[3]。不同湿地类型如垂直流人工湿地^[4]、潮汐流湿地以及组合湿地^[5]的运用均对养殖尾水具有较好的去除效果。陶玲等^[6]利用稻田湿地与鱼塘相结合,能有效减低养殖尾水中的营养盐含量并实现循环水养殖。人工湿地在净化过程中由于大量颗粒物的进入会使得湿地发生堵塞,降低其净化效率。王为东等^[7]构建的根孔湿地通过以秸秆为湿地的填料,上面栽种芦苇为主的挺水植被,能在大量自然根孔未形成的空白期提高湿地的净化能力,并实现根孔的不断更新,解决了人工湿地堵塞的问题,在人工湿地构建初期和运行过程中都具有较好的净化能力。芦苇根孔湿地已经在浙江水源地治理中得到大面积推广应用,累计构建湿地面积超过 600 hm²,如贯泾港湿地(147.13 hm²)、嘉兴石臼漾湿地(108.67 hm²)、泰山港湿地(101.40 hm²)等。经过根孔湿地净化后的主要水质指标可提高一个等级,如经过贯泾港根孔湿地净化后的水体氨氮浓度由 0.33 mg/L 降低到 0.10 mg/L,达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 I 类标准;石臼漾水厂构建的湿地对氨氮的年平均去除率达到 74.10%,多年运行过程中其出水口水体氨氮浓度始终低于 0.10 mg/L^[8-9]。杨林章等^[10]研究指出沟渠在污染的“过程阻断”中具有重要作用,沟渠是连通农田与下游水体的通路,对传统农田排水沟渠系统进行升级与改造,例如在水泥沟渠中布设人工水草将其改造为生态

沟渠后,沟渠对氨氮的去除率能提高到 55.13%^[11];在土质沟渠中构建生物滤坝、生物绳填料后也能提高沟渠的净化能力^[12]。通过种植水生植物、改变基质等方式,可延长水—植物—基质之间的相互作用时间,通过植物吸收、微生物的新陈代谢以及基质的吸附作用对养殖尾水的营养物质进行净化,生态沟渠能用较少的占地面积对农业面源污染起到较好的防治作用,降低农业活动中产生的营养盐含量^[13]。相较于常规的污水处理方法,还能够简约化污水处理流程,在治理水体的同时带来一定的生态景观效应^[14-15]。徐嘉波等^[16]在生态沟渠中种植菱角有效处理了 5.27 hm² 养殖面积的池塘尾水,使其达标排放。芦苇、美人蕉、菖蒲也是生态沟渠中常用于净化水体的植物^[16-18]。在养殖过程中还可将生态沟渠与其他净化系统相结合提高净化尾水的效率。阳龙江等^[19]调查了养殖面积为 13.33 hm² 的养殖区,通过构建沉淀池、曝气池、生物滤池、生态池和生态沟渠,对尾水中氮磷的去除率达到 48.39%, 52.62%。陈浩等^[20]通过构建生态湿地处理 1 420 hm² 的养殖区产生的尾水,尾水达标排放的同时也改善当地生态环境。

当前水产养殖尾水处理技术的研究面积大多小于 15 hm²,而大面积(>100 hm²)养殖区的尾水处理研究较少。为探究如何有效处理大面积水产养殖区产生的养殖尾水,本研究选取养殖面积超过 500 hm² 的宁夏贺兰县寇家湖园区进行试验,由于园区中养殖户众多,大部分未经处理的养殖尾水排放汇入沟渠中后输送至河道中。为实现养殖尾水的有效净化和循环利用,在园区原有的、具有连通作用的沟渠上创新地将常用于净化大面积饮用水源的根孔湿地运用到养殖尾水的净化上,并将其修建在沟渠两侧,基于根孔湿地的构建将普通的沟渠改造成生态沟渠。通过对园区水质进行研究,探讨该方式构建的生态沟渠是否具有净化能力以及该模式在运行中的净化效果,以为大面积池塘养殖尾水处理和循环利用提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况和生态沟渠的构建

试验区位于宁夏回族自治区银川市贺兰县,地处内陆(东经 105°33′—106°36′,北纬 38°27′—38°52′之间),属中温带干旱气候区。园区总养殖池塘占地约 566.67 hm²,园区渔业配套沟渠 33.3 hm²,养殖池塘附近具有普通的植物沟渠,养殖户可向该沟渠中排放养殖尾水,同时当植物沟渠中水质良好时亦可作为水源为鱼池补水。养殖区的植物沟渠与园区西部构建的生态沟渠相连通,生态沟渠为园区最主要的净化部分。园区生态沟渠以及循环系统的构建于 2022 年 8 月底完成,2023 年在池塘养殖主要育肥的 6—9 月系统持续运行,净化流程如图 1 所示。生态沟渠由原有的普通排水沟渠改造而来,保留沟渠两边生长的本地芦苇和菖蒲,未对沟渠的土壤基质进行改变。对沟渠进行清淤后沿宽阔的沟渠两侧交替修筑人工的芦苇根孔湿地,生态沟渠长度约 1.6 km,水深约 2 m。大部分芦苇根孔湿地设计成长 20 m 高 10 m 的等腰三角形,相邻的湿地间隔约 25 m,同侧湿地间隔约 50 m,但由于沟渠的宽度并不均一,实际构建过程中,湿地根据沟渠实际情况大小与间隔距离会有调整。湿地基质以玉米芯为主要填充物质,基质高约 1.5 m,最上方种植芦苇,生态沟渠水位没过根孔湿地基质。在生态沟渠的岸边也生长着本地芦苇、菖蒲等,整个沟渠中还设有两个生态过滤坝,生态过滤坝以石头堆砌而成,在其中放置鸢尾浮床。

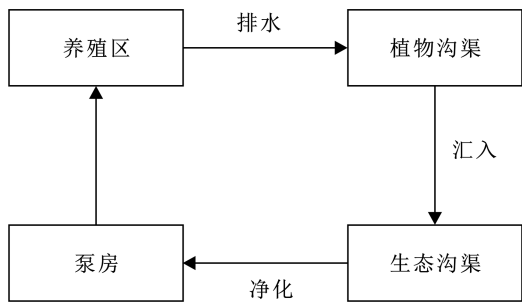


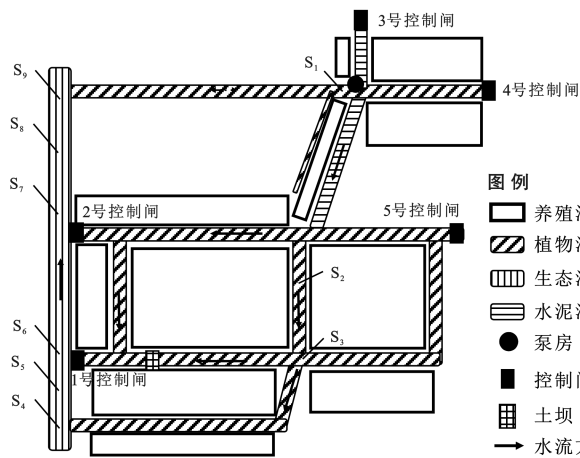
图 1 生态沟渠以及循环系统净化流程
Fig.1 Ecological ditch and purification processes of circular systems

1.2 系统运行模式与样品采集

如图 2 所示,系统运行时 3,4,5 号控制闸均关闭,通过泵房处 22 kW 的水泵抽取沟渠中的水,通过水泥沟渠流入 2,5 号控制闸控制的植物沟渠中,通过控制 1,2 号控制闸,系统运行有 2 种模式,水流可有两条汇入生态沟渠的途径。①第一种模式。打开 1 号闸,关闭 2 号闸,此时由于抬高了 2,5 号控制闸控

制的植物沟渠的水位,水体将沿着植物沟渠自北向南流,最终通过植物沟渠与生态沟渠交汇处流入生态沟渠中,生态沟渠的水体依靠地势以及泵房抽水提供的动力自南向北流动,净化后的水流回泵房处,通过水泥沟渠和植物沟渠输送至各个池塘。②第 2 种模式。打开 2 号闸门,关闭 1 号闸门,水流直接由 2 号闸门流向植物沟渠,养殖区植物沟渠中的尾水也自南向北汇入 2,5 号控制闸控制的植物沟渠。与第一条路径相比,此路径经过生态沟渠的净化距离缩短约 1/2。

2022 年 8 月 28 日系统建成后首次启动运行,系统水体采取第一种模式。运行期间泵房 8:00 开启 19:00 关闭,运行后于 8 月 30 日,9 月 1 日,9 月 4 日,9 月 9 日每日 9:00—12:00 进行采样,采样天气均为晴天。运行期间由于修补水渠,泵房于 9 月 1 日 12:00 停止运行,9 月 3 日重新启动,在泵房停止运行期间(9 月 2 日),泵房处有养殖池塘排放尾水进入沟渠中。采样点设置如图 2 所示,2022 年,由于 1 号控制闸沟渠附近有土坝,阻拦了通路,养殖区植物沟渠水体除了通过 1 号控制闸进入生态沟渠外,还从更远端的交汇处进入生态沟渠。以采样点 S₁,S₂,S₃ 作为养殖区排放进入植物沟渠的浓度,S₄,S₅,S₆ 采样点为生态沟渠前端净化情况,S₇,S₈,S₉ 采样点为生态沟渠末端净化情况。



注:采样点 S₁,S₂,S₃ 作为养殖区排放进入植物沟渠的浓度,S₄,S₅,S₆ 采样点为生态沟渠前端净化情况,S₇,S₈,S₉ 采样点为生态沟渠末端净化情况。下同。

图 2 净化系统 2022 年初运行时采样点分布
Fig.2 Distribution of sampling points during initial operation of system in 2022

由于气温降低,10 月后养殖户不再向池塘中投喂大量饲料,也几乎不再进行池塘换水,故系统于 2022 年 10 月至 2023 年 5 月停止运行。在宁夏地区 6—9 月为水产养殖的主要生产时期,2023 年系统在该时间段内开启日常运行,采集生态沟渠沿程的水质

变化具有重要意义。系统运行过程中泵房 9:00 开启 18:00 关闭,每月上、中、下旬对生态沟渠水体净化沿程,每隔 600 m 进行 3 次采样,采样天气均为晴天,每日 10:00—12:00 进行采样。采样点如图 3 所示。在试验过程中 6—7 月系统采取第一种运行模式,此时 S_2 采样点水质指标作为池塘尾水总出水口。为了探究生态沟渠长短对养殖尾水的净化效果是否有影响,8—9 月采取第 2 种运行模式(长度约缩短 1/2),此时以 S_1 的水质指标作为池塘尾水总出水口。 S_3, S_4, S_5 均位于生态沟渠中, S_3 和 S_4 采样点位于植物沟渠和生态沟渠交汇处略远的位置, S_5 在生态沟渠出水口处采样, S_6 为植物沟渠中的一点,该植物沟渠周围没有养殖池塘,起到连接泵房和生态沟渠水体的作用, S_7 位于泵房抽水处,为系统净化的末端。

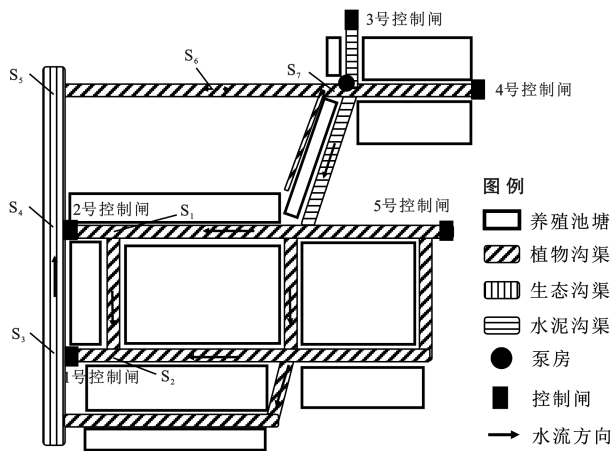


图3 净化系统 2023 年日常运行时采样点分布

Fig.3 Distribution of sampling points during daily operation of purification system in 2023

1.3 试验方法

采样容器均为无菌采样瓶,采集上、中层混合水样,进行水质测定。将获得的水样置于便携冰箱进行低温保存,24 h 完成样品的水质指标测定。检测指标为溶解氧(DO)、水温(WT)、pH 值、溶解性磷酸盐($PO_4^{3-}-P$)、亚硝酸盐氮($NO_2^{-}-N$)、氨氮(NH_3-N)等水质指标,溶解氧、水温使用哈希溶氧仪(HQ40 d)测定;pH 值使用 pH 计(雷磁 PHS-3 C)测定;溶解性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法(HJ632—2011)测定;亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法(GB/T11889—1989)测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法(HJ535—2009)测定。

1.4 数据处理

试验数据通过 Excel 2016 进行数据基本处理,用 SPSS 25.0 统计软件进行单因素方差分析,采用最小极显著差数法(LSD)比较不同数据间的显著性差

异($p < 0.05$)。绘图使用 Origin 2019 软件。

2 结果与分析

2.1 初运行沟渠水质变化

2022 年系统初运行后,不同采样片区之间的水质存在差异(图 4)。随着系统运行各片区水体的溶氧逐渐下降,生态沟渠前端的溶氧均较高,但与其他区域无显著差别($p > 0.05$)。前 3 次采样中养殖区水体的 pH 值显著高于($p < 0.05$)生态沟渠前端。磷酸盐浓度在养殖区与生态沟渠前段的变化趋势不同,养殖区水体具有下降趋势,而生态沟渠前段呈现上升趋势,生态沟渠末端的磷酸盐浓度始终较低。系统运行过程中养殖区亚硝酸盐氮含量逐渐降低,生态沟渠水体在前两次采样中具有较高值,9 月 1 日采样时生态沟渠末端浓度达到 0.13 mg/L。与磷酸盐变化趋势相似,养殖区的氨氮浓度具有下降趋势,最高时浓度为 1.05 mg/L,最后一次采样时,浓度下降到 0.62 mg/L。生态沟渠末端在 8 月 30 日和 9 月 4 日采样中具有较高浓度达到了 1.38 和 1.85 mg/L。

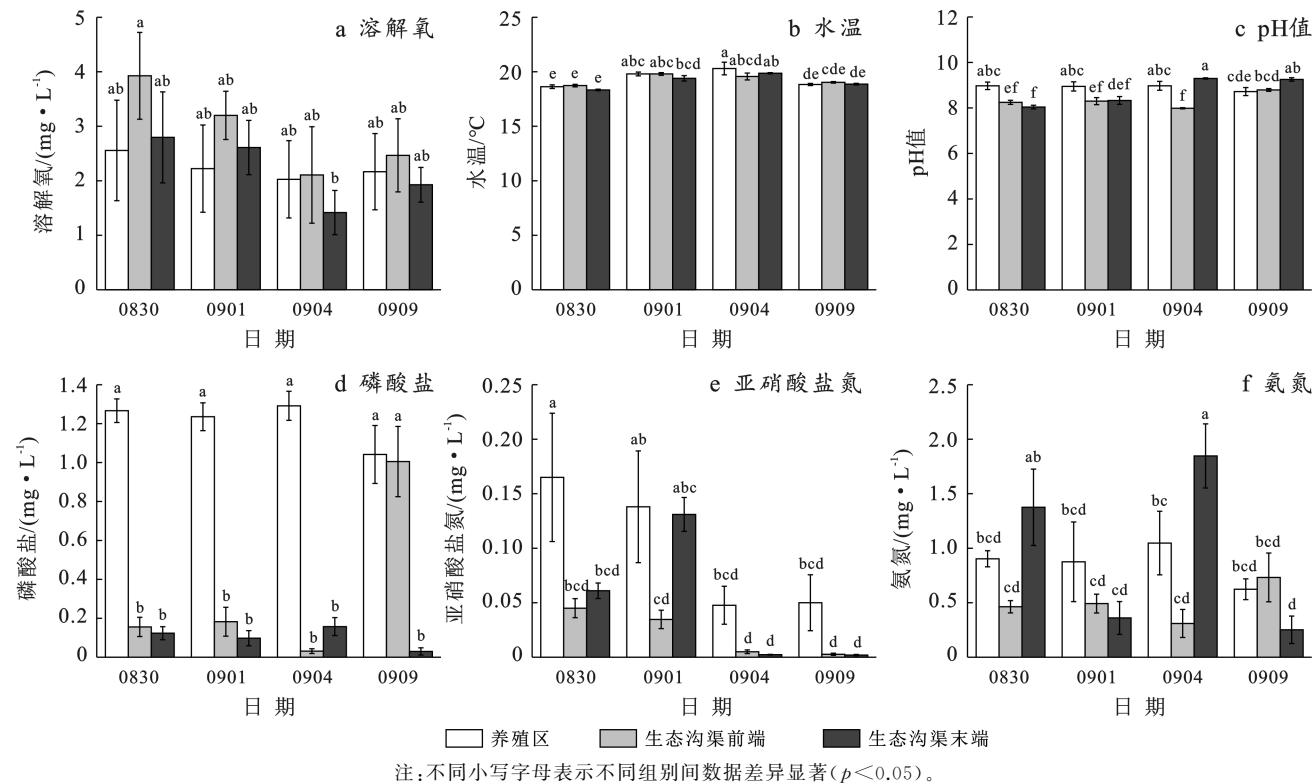
在最后一次采样时(9 月 9 日),生态沟渠前端 pH 值、磷酸盐含量与采样区均无显著差别($p > 0.05$),生态沟渠末端磷酸盐、亚硝酸盐的浓度较低,氨氮浓度小于 0.5 mg/L,达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 II 类标准。以此次采样时的数据计算,生态沟渠对磷酸盐、亚硝酸盐氮、氨氮的净化率分别为 97.15%,96.00%和 59.65%。

2.2 日常运行时生态沟渠水质变化

2023 年各月采样中,生态沟渠沿程的水质情况如图 5 所示,系统部分点位的磷酸盐、氨氮浓度详见表 1。经过生态沟渠处理后,养殖尾水的溶氧得到提升,4 个月中 S_7 水体溶氧含量均高于 3.45 mg/L。6—8 月采样时水体水温相近,9 月采样时各点位水温均最低。养殖尾水经过生态沟渠净化后,水体的 pH 值下降,除 8 月采样外生态沟渠中 S_5 处的 pH 值最低,不超过 8.57,但进入植物沟渠后水体的 pH 值又逐渐升高。磷酸盐、亚硝酸盐氮、氨氮浓度不同月份沿程采样中浓度均呈现下降趋势,经过生态沟渠净化后,营养盐的去除率分别为 74.25%~87.70%,33.33%~72.87%和 55.65%~83.15%。在 6 月生态沟渠对磷酸盐和氨氮均具有最高的去除率,生态沟渠出水口磷酸盐和氨氮浓度达到 0.19 和 0.18 mg/L,系统净化末端磷酸盐含量能降低至 0.02 mg/L,但净化后的水质与生态沟渠出水口水质无显著差异($p > 0.05$)。除 7 月外,亚硝酸盐氮的含量在生态沟渠前端(6 月的 S_3 采样点、8 月和 9 月的 S_1 采样点)的浓度高于

池塘尾水总出水口的浓度,但随着净化路径的延长,亚硝酸盐氮含量逐渐降低,且整个采样月份中亚硝酸盐氮含量均小于 0.1 mg/L。S₇ 作为系统净化的末

端,磷酸盐、亚硝酸盐氮浓度减少,水体氨氮浓度在 4 个月采样中均小于 0.5 mg/L,达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 II 类标准。



注:不同小写字母表示不同组别间数据差异显著($p < 0.05$)。

图 4 净化系统 2022 年采样点不同采样时间的水质变化

Fig.4 Water quality changes of purification system at different sampling times at sampling sites in 2022

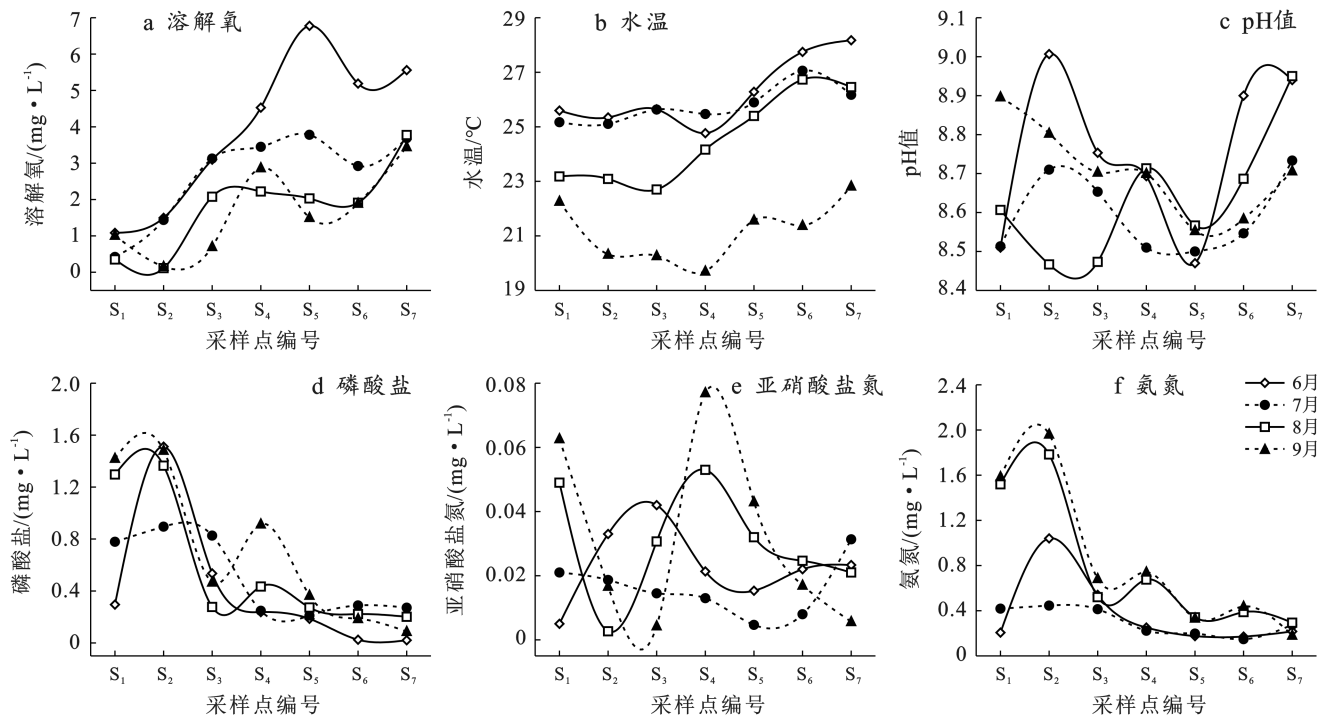


图 5 净化系统 2023 年采样点不同月份的水质变化

Fig.5 Water quality changes of purification system in different months at sampling sites in 2023

池塘尾水总出水口磷酸盐和氨氮浓度在7月具有最小值,而8—9月的氨氮浓度显著高于($p < 0.05$)6—7月。不同运行模式下生态沟渠出水口的浓度存在差异,采用第一种运行模式时氨氮和磷酸盐浓度较

第2种模式较低。然而无论是哪种运行模式生态沟渠出水口处磷酸盐和氨氮的浓度显著低于($p < 0.05$)池塘尾水总出水口浓度,经不同长度生态沟渠净化后的浓度无显著性差别($p > 0.05$)。

表1 净化系统不同采样点磷酸盐、氨氮浓度

Table 1 Concentration of phosphate and ammonia nitrogen at different sampling points in purification system

月份	S_1/S_2		S_5		S_7	
	磷酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	磷酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	磷酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)
6	1.51±0.19 ^a	1.04±0.17 ^b	0.19±0.03 ^c	0.18±0.05 ^c	0.02±0.01 ^c	0.22±0.01 ^c
7	0.90±0.15 ^b	0.45±0.07 ^c	0.21±0.11 ^c	0.20±0.04 ^c	0.27±0.06 ^c	0.28±0.02 ^c
8	1.30±0.42 ^{ab}	1.52±0.20 ^a	0.27±0.04 ^c	0.34±0.04 ^c	0.20±0.05 ^c	0.30±0.09 ^c
9	1.42±0.34 ^a	1.59±0.36 ^a	0.37±0.08 ^c	0.33±0.14 ^c	0.09±0.02 ^c	0.18±0.03 ^c

注: S_1/S_2 代表池塘尾水总出水口,6—7月为 S_2 的浓度,8—9月为 S_1 的浓度; S_5 代表经过生态沟渠出水口的水质; S_7 代表经过整个系统净化末端的水质;同列小写字母不同表示不同组别间数据差异显著($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 初次运行时生态沟渠的净化效果

本研究显示,将原有排水沟进行清淤以及在两侧构建根孔湿地形成生态沟渠后,在初次运行的最后一次采样时生态沟渠末端对磷酸盐、亚硝酸盐氮和氨氮的削减率达到97.15%,96.00%和59.65%。有学者利用种植再力花的142 m的生态沟渠对养殖尾水中氨氮具有较好去除作用,去除率达到66.61%^[21];利用种植芦苇的生态沟渠处理凡纳滨对虾养殖尾水,在处理前期磷酸盐削减率约为90.00%^[17]。本研究结果与前人研究相似,证明基于根孔湿地构建的生态沟渠对养殖尾水具有一定的净化能力。

初次运行时氨氮的净化率较低,同时在2次采样中生态沟渠末端的氨氮含量均高于养殖区,这可能是由于系统刚刚投入运行,水泵的开启对末端具有一定的扰动使得生态沟渠末端水体中氨氮含量出现了上升,这与前人发现水体扰动后间歇水中的氮元素扩散进入水体结果相似^[22]。在泵房检修期间, S_1 处有池塘排水,水体可能沿着植物沟渠流向生态沟渠末端,导致9月4日采样时,生态沟渠末端氨氮较高。

根孔湿地基底的植物秸秆在腐烂后形成空隙,能进一步加大水体的入渗率,空隙与芦苇形成的植物根孔为微生物对营养盐的吸附、转化和降解提供了更多的场所,进一步提高污染物的去除效果^[10,23]。与向速林^[24]利用农田沟渠系统对磷酸盐仅36.6%的截留率相比,本试验对磷酸盐的削减率较高,这可能正是由于与普通的芦苇生态沟渠不同,构建的根孔湿地增大了芦苇与磷酸盐、亚硝酸盐氮等营养物质的接触面积,提高了净化效果。

3.2 日常运行中生态沟渠的净化效果

为达到净化养殖尾水的目的,多种类型的生态沟渠被研究,有学者利用生态沟渠与人工湿地相串联,对养殖面积为400 m²的尾水进行处理后,氮、磷元素的去除率可达到68.94%和43.56%,循环后的水能再次用于养殖^[5]。本研究构建的生态沟渠对磷酸盐、亚硝酸盐氮、氨氮的削减率最高可达到87.70%,72.87%和83.15%,对大面积养殖区日常生产活动中排放的尾水同样具有净化能力。污水中的氮磷等元素可被生态沟渠中的植物吸收利用,存储在植物的根茎叶中、也能通过沟渠沉积物的吸附直接去除水体中的氮磷元素^[25]。生态沟渠中微生物通过硝化与反硝化等作用对水体中氮元素进行净化^[26],磷元素可通过聚磷积累生物吸收周围环境中的磷,并将其作为细胞内的聚磷酸盐储存起来^[27]。

岑璐瑶等^[28]通过中试规模的人工湿地探究不同植物对污水的净化效果,研究发现选取芦苇作为湿地植物时对氨氮的去除率最高,达到68.15%。闫金亮等^[29]利用复合生态沟渠系统对13.33 hm²的池塘尾水和农田退水进行净化后,其磷酸盐、亚硝酸盐氮、氨氮的去除率为68.96%,61.36%和51.92%。本研究与前人研究相比具有更好的净化效果,这可能是由于本研究在沟渠两边间隔修筑了根孔湿地,延长了水体在生态沟渠中的停留时间,减缓了流速,加大了水体与微生物、植物的接触时间,这与研究发现“弓字形”生态沟渠与传统的“一字形”沟渠相比净化率较高的结果相似^[30]。同时根孔湿地的构建使得微生物能附着在湿地根区,植物根系可通过分泌的根系分泌物促进细菌生长,通气组织可为微生物提供氧气,通过这些途径能增强微生物对营养物质的消耗利用^[31]。研

究发现^[32]根孔湿地是发生硝化作用、厌氧氨氧化等作用的活跃区域,在利用氮元素的同时微生物的新陈代谢以及湿地基质的吸附作用对磷元素也具有较好去除效果,因此本试验中基于根孔湿地构建的生态沟渠对养殖尾水具有较好的净化作用。

在运行过程中池塘尾水总出水口磷酸盐和氨氮浓度并未呈现逐渐下降的趋势,而在7月具有最小值,8—9月的营养盐浓度逐渐升高,这可能是由于7月几乎不会进行卖鱼、清塘这样大规模排水活动,通过系统的日常运行能促使养殖区水体中磷酸盐和氨氮的含量减少,而进入8月,陆续有养殖户开始排水捕鱼,使得水体中营养盐含量增加。不同运行模式下生态沟渠出水口的浓度存在差异,采用第一种运行模式时氨氮和磷酸盐浓度较第2种模式较低,但无论是哪种运行模式生态沟渠出水口处磷酸盐和氨氮的浓度显著低于($p < 0.05$)池塘尾水总出水口浓度,不同模式间的浓度无显著性差别($p > 0.05$),说明较短生态沟渠依旧对养殖尾水具有好的净化能力。

与系统初次运行时相比较,日常运行中生态沟渠对磷酸盐和亚硝酸盐氮净化率减弱而氨氮的净化率提高,这可能是由于在初次运行时,生态沟渠所承担的污染负荷相对较小,采样时只有泵房处的养殖池塘进行了排水。然而,在日常运行中由于该园区养殖户众多,养殖户在整个采样周期内会根据养殖需求以及养殖经验进行池塘排水,这些尾水富含高营养盐,不定期注入生态沟渠中,从而改变了生态沟渠净化的初始浓度,这导致了磷酸盐和亚硝酸盐氮的净化率发生变化。与王磊等^[33]对凡纳滨对虾整个养殖周期采样中,池塘排水的氮磷等元素在不同养殖时期浓度不同,进而导致净化系统净化率存在差异结果相似。然而,氨氮的净化率却有所提高,这可能是因为初次运行时的扰动使得生态沟渠末端具有较高的氨氮含量。

大面积水产养殖区与工厂化养殖的不同点在于养殖户众多,日常养殖过程中渔民会因为各种换水需求(如:病害防控、防止缺氧和改善水质等)产生尾水的排放,污染的排放更具复杂性和随机性^[34]。而排水渠作为养殖尾水的汇和联通下游水体的通路,是污染“过程阻断”的重要一环,根孔湿地的构建可以看作是农村面源污染治理理论中的生态修复技术^[10],通过在沟渠两侧构建根孔湿地的方式对沟渠进行生态改造后能有效降低过量污染物进入下游水体的风险。同时直接在沟渠两侧构建根孔湿地,能减少对养殖尾水处理面积的消耗,无需压缩生产面积且施工相对容易。基于根孔湿地构建的生态沟渠将过程阻断与生态修复相结合,提高营养盐去除效率的同时保证了系

统具有一定的容量,能在园区售卖成鱼或其他集中排水情况发生时存储一定量的尾水,并通过循环进一步实现污染的减量化,该模式在一定程度上能忽略源头污染排放的不确定性,更有利于在大面积养殖区施用。同时该养殖区通过循环利用养殖排出的尾水,有效增加水资源的利用效率,适合宁夏黄河灌区节约水资源的特点,为没有专用水源的水产养殖业提供了一种循环使用的、可行的养殖尾水生态净化模式。

4 结论

(1) 基于根孔湿地构建的生态沟渠在初运行时能有效净化养殖尾水中的磷酸盐、亚硝酸盐和氨氮,净化率分别为97.15%,96.00%和59.65%。

(2) 该生态沟渠能有效消纳、净化大面积养殖区日常养殖过程中产生的养殖尾水,生态沟渠对磷酸盐、亚硝酸盐和氨氮,净化率最高可达到87.70%,72.89%和83.15%,净化后的水体磷酸盐和亚硝酸盐含量减少,氨氮浓度低于0.5 mg/L,达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的Ⅱ类标准,可实现养殖尾水的循环利用。

(3) 流经生态沟渠的路程越长,生态沟渠出水口营养盐的浓度越低,但本研究缩短1/2的净化路程后,生态沟渠对养殖尾水依旧具有较好的净化效果,两者浓度无显著性差异($p < 0.05$)。

参考文献(References)

- [1] 童心雨,姜森颖,葛宝明,等.我国池塘养殖业发展现状与对策[J].中国农业科技导报,2020,22(8):5-13.
Tong Xinyu, Jiang Senhao, Ge Baoming, et al. Development status and countermeasures of pond aquaculture industry in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020,22(8):5-13.
- [2] Valipour A, Raman V, Ahn Y H. Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system [J]. Water, 2015, 7(1): 329-347.
- [3] 蒋俊贤,张凯,王广军,等.不同植物搭建人工湿地的根系分泌物组成及其对养殖尾水的处理效果[J].淡水渔业,2023,53(6):88-97.
Jiang Junxian, Zhang Kai, Wang Guangjun, et al. Composition of different plant root exudates in vertically constructed wetlands and their treating effects on aquaculture wastewater [J]. Freshwater Fisheries, 2023,53(6): 88-97.
- [4] 赵可歆,尹振东,张可可,等.复合垂直流人工湿地植物与基底层微生物群落特征比较分析[J].中国水产科学,2022,29(6):874-889.

- Zhao Kexin, Yin Zhendong, Zhang Keke, et al. Comparison of microbial community characteristics in plant rhizosphere and other substrates in an integrated vertical flow constructed wetland [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022,29(6):874-889.
- [5] 柳磊,陶玲,代梨梨,等.基于组合湿地构建的池塘循环水养殖系统运行效果[J].*淡水渔业*,2023,53(1):92-101.
Liu Lei, Tao Ling, Dai Lili, et al. Performance of the pond recirculating aquaculture system constructed based on combined constructed wetland [J]. *Freshwater Fisheries*, 2023,53(1):92-101.
- [6] 陶玲,彭格格,陈思媛,等.稻田湿地循环利用池塘养殖尾水效果[J].*水生生物学报*,2022,46(10):1466-1474.
Tao Ling, Peng Gege, Chen Siyuan, et al. Effect of recycling fishpond wastewater in paddy wetland [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022,46(10):1466-1474.
- [7] 王为东,汪仲琼,李静,等.人工湿地生态根孔技术及其应用[J].*环境科学学报*,2012,32(1):43-50.
Wang Weidong, Wang Zhongqiong, Li Jing, et al. The constructed root channel technology and its application in constructed wetlands [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012,32(1):43-50.
- [8] 王宝玲,潘潇,张荣斌,等.贯泾港构筑根孔湿地水质净化效果[J].*环境工程学报*,2015,9(7):3509-3518.
Wang Baoling, Pan Xiao, Zhang Rongbin, et al. Water purification efficiency of Guanjinggang constructed root channel wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015,9(7):3509-3518.
- [9] 杨婷,王阳,徐静怡,等.河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征[J].*环境科学*,2021,42(8):3695-3708.
Yang Ting, Wang Yang, Xu Jingyi, et al. Differentiation of hydrogen and oxygen isotopes in the water source treatment wetlands of stream networks [J]. *Environmental Science*, 2021,42(8):3695-3708.
- [10] 杨林章,薛利红,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:案例分析[J].*农业环境科学学报*,2013,32(12):2309-2315.
Yang Linzhang, Xue Lihong, Shi Weiming, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: A case study [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013,32(12):2309-2315.
- [11] 滕庆晓,庞燕,胡小贞,等.人工水草技术在波罗江农田排水硬化沟渠中的应用[J].*环境工程技术学报*,2016,6(1):65-71.
Teng Qingxiao, Pang Yan, Hu Xiaozhen, et al. Application of artificial plants in farmland drainage ditches of Boluo River [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016,6(1):65-71.
- [12] 马莹,孙鹏,许占军,等.基于微生物载体技术的沟渠生态修复治理体系的构建及工程应用[J].*环境工程学报*,2022,16(5):1721-1729.
Ma Ying, Sun Peng, Xu Zhanjun, et al. Construction and engineering application of canal ecological restoration and treatment based on microbial carrier technology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022,16(5):1721-1729.
- [13] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:总体思路与“4R”治理技术[J].*农业环境科学学报*,2013,32(1):1-8.
Yang Linzhang, Shi Weiming, Xue Lihong, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013,32(1):1-8.
- [14] Wang Tao, Zhu Bo, Zhou Minghua. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,570:839-849.
- [15] Schilling K E, Streeter M T, St Clair M, et al. Subsurface nutrient processing capacity in agricultural roadside ditches [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,637:470-479.
- [16] 徐嘉波,刘永士,施永海,等.集中连片池塘的尾水处理系统中氮磷的时空变化规律[J].*渔业现代化*,2021,48(4):35-42.
Xu Jiabo, Liu Yongshi, Shi Yonghai, et al. Spatial and temporal variation of nitrogen and phosphorus in wastewater treatment system of centralized continuous aquaculture ponds [J]. *Fishery Modernization*, 2021,48(4):35-42.
- [17] 蒋葛,黎慧,沈辉,等.基于生态沟渠的凡纳滨对虾小型温棚养殖尾水净化技术效能分析[J].*浙江海洋大学学报(自然科学版)*,2021,40(6):518-524.
Jiang Ge, Li Hui, Shen Hui, et al. Effectiveness analysis of a small greenhouse water treatment technology for *litopenaeus vannamei* based on ecological ditches [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2021,40(6):518-524.
- [18] Zhang Jian, Yan Min, Lu Xin, et al. Nutrient removal performance from agricultural drainage by strengthening ecological ditches in hilly areas [J]. *Agricultural Water Management*, 2024,291:108623.
- [19] 阳龙江,唐征县,韩璐璐,等.重庆地区淡水池塘养殖尾水处理系统净化效果[J].*渔业现代化*,2023,50(6):41-48.
Yang Longjiang, Tang Zhengxian, Han Lulu, et al. Study on purification effect of freshwater pond aquacul-

- ture wastewater treatment system in Chongqing [J]. *Fishery Modernization*, 2023,50(6):41-48.
- [20] 陈浩,朱敦学,蔡翰林,等.基于水产养殖废水净化的生态湿地修复工程:以江苏东台市沿海淡水养殖区为例[J].*湿地科学与管理*,2021,17(4):37-41.
Chen Hao, Zhu Dunxue, Cai Hanlin, et al. Ecological wetland restoration project based on aquaculture wastewater purification: A case study of coastal freshwater aquaculture area in Dongtai City, Jiangsu Province [J]. *Wetland Science & Management*, 2021,17(4):37-41.
- [21] 顾兆俊,刘兴国,程果锋,等.淡水池塘 4 种生态沟渠净化效果研究[J].*江苏农业科学*,2020,48(13):285-291.
Gu Zhaojun, Liu Xingguo, Cheng Guofeng, et al. Study on purification effect of four ecological ditches of freshwater ponds [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020,48(13):285-291.
- [22] 余景芝,王烜,蔡剑英,等.水动力条件对浅水湖泊沉积物氮磷释放的影响[J].*中国环境科学*,2023,43(8):4219-4228.
Yu Jingzhi, Wang Xuan, Cai Jianying, et al. Effects of hydrodynamic conditions on nitrogen and phosphorus release from sediments in shallow lakes [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(8):4219-4228.
- [23] Vymazal J, Brezinová T D. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch [J]. *Ecological Engineering*, 2018,118:97-103.
- [24] 向速林.赣江流域农田地表径流氮磷迁移与流失研究[J].*生态环境学报*,2013,22(7):1204-1207.
Xiang Sulin. Nitrogen and phosphorus migration and loss of surface runoff in Ganjiang River watershed [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013,22(7):1204-1207.
- [25] Guo Chenyao, Zhang Qisen, Hu Yawei, et al. Influence of sediment, plants, and microorganisms on nitrogen removal in farmland drainage ditches [J]. *Agronomy*, 2023,13(9):2211.
- [26] 李强坤,胡亚伟,苏欣.排水沟渠水—底泥—植物协同作用下非点源溶质氮运移模拟研究[J].*中国生态农业学报*,2017,25(3):460-466.
Li Qiangkun, Hu Yawei, Su Xin. Simulation of non-point source solute nitrogen transport in drainage ditches under water-sediment-aquatic plant synergy [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017,25(3):460-466.
- [27] Ma Lin, Yang Lingli, Liu Wei, et al. Environmental factors and microbial communities jointly regulate biological dephosphorization process in pond-ditch circulation systems (PDCSs) for rural wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,758:143629.
- [28] 岑璐瑶,陈滢,张进,等.种植不同植物的人工湿地深度处理城镇污水处理厂尾水的中试研究[J].*湖泊科学*,2019,31(2):365-374.
Cen Luyao, Chen Ying, Zhang Jin, et al. Pilot-scale study on advanced treatment of tail water of urban sewage treatment plant by constructed wetlands with different plants [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019,31(2):365-374.
- [29] 闵金亮,李奎,孙静好,等.复合生态沟渠对池塘养殖尾水和稻田退水的净化效果[J].*水土保持通报*,2022,42(6):206-213.
Guo Jinliang, Li Kui, Sun Jingyu, et al. Purification effect of aquaculture wastewater and paddy field drainage water using a compound ecological ditch [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(6):206-213.
- [30] 王华栋,唐浩,张卫.生态沟渠对农田径流污染物的去除效果[J].*环境污染与防治*,2021,43(9):1083-1088.
Wang Huadong, Tang Hao, Zhang Wei. Removal effects of ecological ditches on farmland runoff pollutants [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021,43(9):1083-1088.
- [31] Wu Hailu, Wang Xinze, He Xiaojuan, et al. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,598:697-703.
- [32] Nsenga Kumwimba M, Meng Fangang, Iseyemi O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): Design, mechanism, management strategies, and future directions [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,639:742-759.
- [33] 王磊,张哲,王文君,等.“三池两坝”多级池塘对凡纳滨对虾工厂化海水养殖尾水的处理效果研究[J].*海洋环境科学*,2023,42(5):720-728.
Wang Lei, Zhang Zhe, Wang Wenjun, et al. The treatment effects of “Three ponds and two dams” on the wastewater from *Litopenaeus vannamei* industrialized mariculture [J]. *Marine Environmental Science*, 2023,42(5):720-728.
- [34] 丁惠明,沈彩娟,陈雯,等.池塘养殖换水目的和水质状态对换水频率的影响[J].*生态与农村环境学报*,2019,35(6):781-786.
Ding Huiming, Shen Caijuan, Chen Wen, et al. Preliminary study on the effects of water exchange purpose and water quality status on the frequency of water exchange in pond aquaculture [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019,35(6):781-786.