

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.019

南美白对虾养殖尾水治理工程设计与应用

王雄^{1,2}, 王美¹, 郑泽鑫², 胡俊松¹, 贾鹏¹, 刘恒¹

(1. 南大环境规划设计研究院<江苏>有限公司, 江苏 南京 210008; 2. 南京大学环境规划设计研究院集团股份有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 南美白对虾养殖尾水具有盐度高、排放量大、硝态氮浓度高的特点。为满足江苏省《池塘养殖尾水排放标准》(DB 32/4043—2021)要求,某养殖园区采用“改良型三池两坝”工艺处理南美白对虾养殖尾水,即在传统“沉淀池-过滤坝-曝气池-过滤坝-生物净化池”组合工艺的基础上,优化沉淀池停留时间,利用生物毛刷的过滤拦截作用,强化沉淀效果;采用填装改性复配生物质炭滤料的过滤坝,进一步吸附和拦截尾水中的SS;投加优势耐盐芽孢杆菌,改良曝气池的生物菌剂活性,保证了对TN和有机物的去除效果。实际应用效果表明,“改良型三池两坝”工艺对南美白对虾养殖尾水中COD、TN、TP、SS的去除率分别为68.78%、87.35%、58.06%、78.85%,所有出水指标均达到排放标准且经济可行,可为对虾养殖行业尾水治理提供案例借鉴。

关键词: 南美白对虾; 养殖尾水; 三池两坝; 生物毛刷; 过滤坝; 芽孢杆菌

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0117-07

Design and Application of a *Penaeus vannamei* Aquaculture Wastewater Treatment Project

WANG Xiong^{1,2}, WANG Mei¹, ZHENG Ze-xin², HU Jun-song¹, JIA Peng¹,
LIU Heng¹

(1. Nanjing University Environmental Planning & Design Institute <Jiangsu> Co. Ltd., Nanjing 210008, China; 2. Academy of Environmental Planning & Design Co. Ltd., Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract: The *Penaeus vannamei* aquaculture wastewater has the characteristics of high salinity, large discharge amount, and high nitrate nitrogen. In response to the requirements of *Discharge Standard of Water from Aquaculture Ponds* (DB 32/4043-2021) in Jiangsu Province, an aquaculture park uses the improved three tanks and two dams process to treat aquaculture wastewater, which is based on the traditional combined process of sedimentation tank, filter dam, aeration tank, filter dam, and biological purification tank. The residence time of the sedimentation tank is optimized and the filtering and interception effect of biological brushes is utilized to enhance the sedimentation effect. A filter dam filled with modified composite biochar filter material is used to further adsorb and intercept SS in the wastewater. The addition of advantageous salt tolerant *Bacillus* improved the activity of biological agent in the aeration tank to ensure the removal of TN and organic matter. The application results show that the removal rates of COD, TN, TP and SS in the *Penaeus vannamei* aquaculture wastewater are 68.78%, 87.35%, 58.06% and 78.85%, respectively. All indicators meet the discharge standard requirements, providing a reference for the wastewater treatment of *Penaeus vannamei* aquaculture industry.

Key words: *Penaeus vannamei*; aquaculture wastewater; three tanks and two dams; biological brush; filter dam; *Bacillus*

1 项目背景

1.1 环境背景

南美白对虾因具有生长快、盐度适应广、抗病力强等特点,已成为我国对虾养殖的主要品种之一。江苏的南美白对虾养殖产量位列全国第5、苗种数量位列全国第6^[1]。盐城市南美白对虾养殖面积和产量均为江苏省第一,其中2021年养殖面积分别占苏北和全省的64.4%和62.4%,养殖产量分别占苏北和全省的74%和70.3%^[2]。有研究报道,1 t南美白对虾养殖产量可排放尾水5 345~7 157 m³,养殖尾水的排放对周边水环境造成严重的负面影响,使水体出现富营养化现象,造成生物多样性下降^[3]。因此,加强对南美白对虾养殖尾水的治理迫在眉睫。

1.2 政策背景

2020年11月,《江苏省水污染防治条例》发布,其中第四十六条明确规定:利用池塘等进行水产养殖的,养殖尾水应当达标排放。2021年6月,江苏省《池塘养殖尾水排放标准》(DB 32/4043—2021)(以下简称《标准》)发布,其对养殖池塘的适用范围、尾水排放限值及要求、监测方法、结果判定、实施与监督等都做了明确规定^[4]。该《标准》是继湖南省后全国第二个池塘养殖尾水排放强制性标准,具有法律约束力,超过限值排放是违法行为,将受到法律惩处。目前,江苏省正大力引导推动池塘标准化改造工作,加强尾水治理,促进达标排放。

2 项目概况

江苏银宝东昇养殖园区位于盐城市响水县陈家港镇,与沿海滩涂直线距离约5 km,主要养殖品种为南美白对虾。养殖园区占地面积约300 hm²,现有养殖池塘约5 000口,每口池塘水深约0.9 m、长约30~40 m、宽约8~10 m、存水量约300 m³。池塘上方利用钢架搭建高度约1.5~2 m的塑料大棚,实施海水温棚养殖。园区每年养殖两季,第一季3月—4月投苗、6月—7月收获,第二季8月放苗、11月收获。

根据《标准》要求,现有池塘养殖尾水排放标准自2023年6月1日起执行,此外,由于园区毗邻入选

《世界遗产名录》的盐城黄海湿地,其生态地位十分重要,必须采取稳定有效的养殖尾水治理措施,确保养殖尾水达标排放,保护黄海湿地的生态环境。

3 设计水量、水质

3.1 尾水排放模式

根据现场实际调研结果,该养殖园养殖尾水的排放模式为:每口池塘底部约0.15 m处设有直径DN150的塑料管道接入连通沟渠,池塘内中上层的养殖尾水通过此管道自流进入连通沟渠,然后汇入尾水处理区域。园区每年每季养殖尾水排放量约1.5×10⁶ m³,排放周期约45 d,排放周期内排水量为3.33×10⁴ m³/d。池塘底层约0.15 m深的尾水主要含有养殖过程中产生的残饵和粪便,这部分底层尾水主要通过投加生石灰或漂白粉进行改底,改底后的底层沉积物松翻后进行清淤转运处置,不进入尾水处理系统。

3.2 设计进、出水水质

南美白对虾养殖尾水中的污染物主要来自养殖过程中的投饵、微生态制剂及对虾的生理代谢物,主要组成为残饵与粪便等构成的固体颗粒物、COD、无机氮和TP等。研究表明,南美白对虾养殖尾水中固体颗粒物浓度约20~150 mg/L、COD约8~20 mg/L、TP约0.03~0.08 mg/L、pH约6.8~8.7^[5]。

该养殖园尾水排放期内随机选取5口养殖池塘,各采集1份水样,水样采集时取中上层水,整个排放周期(11月初—12月中旬)内每周取样一次,共6次,测定pH、COD、氨氮、总氮(TN)、TP、悬浮物(SS)、盐度等指标,其中,氨氮测定采用《水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法》(HJ 536—2009),其余指标测定采用《标准》中表5海水水质测定方法。各水质指标的测定值和平均值见表1,通过与文献研究中典型南美白对虾水质指标对比发现,这些指标基本都在常规取值范围内,故可将指标平均值作为设计进水水质指标。

按照《标准》规定,该项目所在地养殖尾水排放接纳水域为海水一般水域或未明确环境功能水域,执行海水二级排放标准。设计排放限值指标见表2。

表1 养殖尾水主要水质指标

Tab.1 Main wastewater quality indexes of aquaculture wastewater

项目	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	盐度/ %
第一周	6.98	13.66	0.16	8.28	0.27	161.22	2.11
第二周	6.77	15.33	0.18	10.03	0.38	143.80	2.13
第三周	7.02	11.07	0.12	8.73	0.41	144.58	2.08
第四周	7.13	13.85	0.09	8.07	0.33	175.05	2.05
第五周	6.93	15.22	0.07	8.03	0.25	138.75	2.01
第六周	6.89	12.33	0.06	8.11	0.23	149.73	2.05
平均值	6.95	13.58	0.11	8.54	0.31	152.19	2.07

表2 养殖尾水设计排放限值

Tab.2 Design discharge limit of aquaculture wastewater

监测指标	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)
排放限值	6.5~9	≤20	≤5.0	≤1.0	≤100

4 总体设计思路

4.1 工艺分析

通过对南美白对虾养殖尾水的水质检测分析,对比《标准》要求的排放限值,其中超标指标主要为TN和SS,分别超标70.80%和52.19%,其他指标如pH、COD、TP均符合《标准》要求,因此,TN和SS是本次工艺选择和设计应重点关注的指标。此外,尾水中的盐度较高,接近海水盐度(约3.5%),而普通生化系统内的微生物属于淡水微生物,其自身不具备渗透压的调节机制,因此,尾水中的高盐度势必干扰微生物正常的新陈代谢,直接抑制微生物活性和对污染物的降解速率,其中,盐度对硝化菌群的抑制作用最为显著。

有研究表明,南美白对虾养殖尾水的SS组成中残饵约占35%、排泄物约占50%、其他污染物(微生物制剂、虾身脱落物)约占15%,这些颗粒物的80%以上直径为10~150 μm^[5]。上述颗粒物中含有大量有机物,是尾水污染的主要来源。该项目通过设置较长的沉淀池停留时间、较低的流速,配合沉淀池生物毛刷区对悬浮物的初步截留,以及内装填料、多层级配过滤坝的吸附和拦截作用,将悬浮颗粒物充分去除。

针对南美白对虾养殖尾水盐度和TN较高的问题,在曝气池中投加以芽孢杆菌为主导菌的微生物复合菌,旨在强化对高盐度养殖尾水中TN的去除

效果。研究表明,经筛选培养的芽孢杆菌具有耐酸、耐盐、耐高温、快速复活和可分泌多种能降解有机物的酶类等特点,可在有氧条件下同时进行硝化和反硝化反应,通过硝化作用将氨氮转化为亚硝态氮和硝态氮,通过好氧反硝化作用将亚硝态氮和硝态氮转化为NO、N₂O和N₂等气体,因此,芽孢杆菌能够有效去除高盐度养殖尾水中的TN^[6-11]。此外,在生物净化池中建立贝类-鱼类-水生植物生态系统,种植盐地草本等耐盐水生植物,投放文蛤、缢蛏等本地底栖贝类,进一步去除尾水中的TN、TP和有机物等。

4.2 工艺流程

根据以上工艺分析,结合养殖尾水相关技术规程和实际经验,因地制宜地采用“改良型三池两坝”工艺,即在“沉淀池+过滤坝+曝气池+过滤坝+生物净化池”组合工艺的基础上,强化沉淀池沉淀效果,改良曝气池生物菌剂,优化水生动植物配置,工艺流程见图1。该工艺集物理沉淀、填料过滤、曝气氧化、生物同化等为一体,通过对养殖区沟渠或边角池塘进行适当改造,在投入相对较低的前提下实现养殖尾水的达标排放或循环利用^[12]。

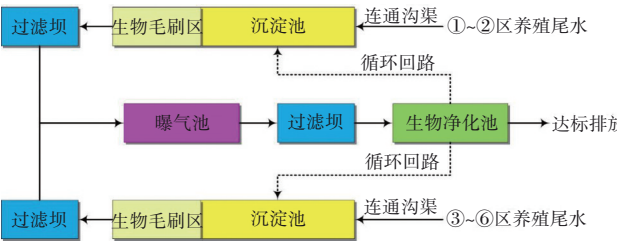


图1 养殖尾水处理工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of aquaculture wastewater treatment

4.3 工艺原理

每口养殖塘的养殖尾水通过底部连通管自流进入连通沟渠,汇集后首先进入沉淀池进行预处理,去除较大的悬浮颗粒物。为了强化预处理效果,在沉淀池后段设置生物毛刷区,强化沉淀区对悬浮颗粒物的截留效果。尾水透过沉淀池末端过滤坝,一定程度上拦截了尾水中的细微悬浮物。接着尾水进入曝气池,部分COD和氨氮等污染物被优势耐盐菌群氧化、分解,另在曝气池中投加以耐盐芽孢杆菌为主导菌的微生物复合菌,加强对TN的降解能力。曝气池处理过的尾水经过第二道过滤坝,进一步拦截悬浮物后进入生物净化池,通过在

生物净化池和边坡中种植本地耐盐水生植物、放养水生动物等构建综合立体生态处理系统,可有效降低水体中氮、磷等污染物浓度,实现尾水达标排放。尾水治理系统末端设置循环水回路,在养殖池塘不排水、尾水处理系统无进水期间,内部水循环维持整个系统生物活性。养殖尾水处理系统工艺原理见图2。

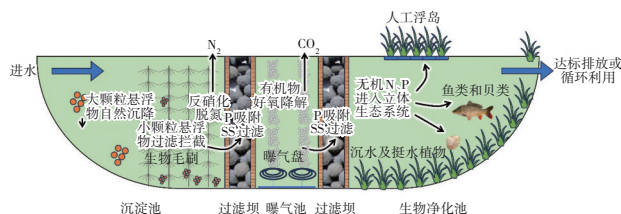


图2 养殖尾水处理系统工艺原理

Fig.2 Process principle of aquaculture wastewater treatment system

4.4 平面布置

养殖尾水处理系统平面布置见图3。



图3 养殖尾水处理系统平面布置

Fig.3 Plan layout of aquaculture wastewater treatment system

养殖园区占地面积约300 hm²,养殖塘口总水面面积约166.67 hm²。根据园区实际情况,养殖尾水处理系统充分利用园区现状排水沟渠,尽量减少对现有沟渠走向和标高的改动。根据现状条件,将整个养殖园区划为6个分区进行排水收集,①~②区位于北片区,面积共97.92 hm²,其排放的尾水通过排水沟渠往中间汇流到北片区沉淀池,③~⑥区位于南片区,面积共202.08 hm²,其排放的尾水通过排放

沟渠往南汇流入南片区沉淀池,南、北片区沉淀池尾水经过各自过滤坝后汇流入位于中间位置的曝气池、生物净化池,处理达标后的尾水最终通过位于园区东南侧的排口排入洪港河。

5 工艺单元设计

养殖园区单个养殖季排放尾水水量约 1.5×10^6 m³,设计排放周期为45 d,①~②区和③~⑥区的平均流量分别为 5.44×10^3 、 2.25×10^4 m³/d。尾水处理系统总停留时间为7.68 d,尾水处理区域总水面面积为16.72 hm²,占养殖水面面积的10.03%,其中:沉淀池占46.25%、曝气池占12.09%、生物净化池占41.66%。

5.1 连通沟渠

①~⑥区均利用养殖区域内现有汇水渠道,连通分散沟槽并汇合至沉淀池。养殖塘尾水中的虾壳、粪便、饵料等大颗粒物在沟渠内得到初步沉淀。连通沟渠平均水深1.5 m,宽3~4 m,无需拓宽改造。

5.2 溢流坝

溢流坝设置在连通沟渠末端,目的是保持连通沟渠内水位稳定,确保尾水有充分的初步沉淀时间,通过溢流防止大量颗粒物被夹带进入沉淀池。①~⑥区连通沟渠末端各设置1座溢流坝,钢筋混凝土结构,并配置镶铜铸铁闸门,宽11 m,高1.5 m,坝体厚0.4 m。溢流坝中间设置闸门用于养殖塘排水末期泄流。

5.3 沉淀池和过滤坝

沉淀池分两部分,①~②区尾水进入北片区沉淀池,③~⑥区尾水进入南片区沉淀池,沉淀池总面积7.73 hm²。沉淀池平均宽度23.5 m,平均水深2.5 m,平均流速0.002 7 m/s,坡比按现状坡比1:2不变。

两部分沉淀池末端各300 m长度区域内悬挂生物毛刷,其比表面积大,对悬浮物起到物理拦截过滤作用。生物毛刷采用316L不锈钢骨架,PP材质刷丝,刷毛直径100 mm,单根毛刷长度150 mm,比表面积280 m²/m³。生物毛刷安装密度不小于400根/hm²,垂直安装,毛刷底部用聚乙烯绳或不锈钢丝固定,确保毛刷挺直,不随水流漂动。在池内划分区域,区域两端分别固定若干个木桩,岸边木桩间隔50 cm,在木桩顶部和底部分别固定1根尼龙绳,然后将生物毛刷垂直悬挂在尼龙绳上,每15 cm悬

挂 1 束。沉淀池生物毛刷区面积 1.40 hm^2 , 占沉淀池面积的 18.05%。

沉淀池末端设置过滤坝, 采用砖砌结构, 在坝体中填充大小不一的滤料。滤料可选择陶粒、火山石、碎石、棕片、活性炭等, 该项目选用改性复配生物炭, 其具有发达的孔隙结构、较大的比表面积、稳定的物理和化学性质, 能耐盐耐酸碱, 是优良的养殖尾水吸附过滤材料。生物炭比表面积约 $1\,000 \text{ m}^2/\text{g}$, 碘值 900 mg/g , 亚甲基蓝值 150 mg/g , 强度 $>95\%$ 。过滤坝由下而上滤料粒径逐渐减小, $0\sim 60 \text{ cm}$ 高度层的滤料直径为 $3\sim 5 \text{ cm}$, $60\sim 120 \text{ cm}$ 高度层的滤料直径为 $5\sim 8 \text{ cm}$, 120 cm 以上高度层的滤料直径为 $8\sim 10 \text{ cm}$ 。过滤坝内径宽 2 m , 坝长根据河道宽度而定, 坝高与塘埂持平, 坝表面铺设板块或碎石, 两端种植低矮景观植物。过滤坝上向流过滤, 滤速 $10\sim 15 \text{ m/h}$, 停留时间 $8\sim 12 \text{ min}$ 。坝前设置一道细网材质的挡网, 高度与过滤坝持平, 用以拦截落叶等漂浮物, 每个养殖尾水排水周期结束后, 对过滤坝迎水面进行反冲洗清理, 反冲洗强度 $8\sim 10 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

曝气池末端同样设置过滤坝, 进一步拦截尾水中的悬浮物, 设计参数同沉淀池末端过滤坝。由于曝气池中会生长微生物菌胶团, 出水颗粒物会有所增加, 因此曝气池末端过滤坝维护冲洗次数应适当增加, 以保持过水效果。

5.4 曝气池

曝气池为现状河沟, 面积为 2.02 hm^2 , 占尾水治理区总面积的 12.09%, 有效水深 2 m , 平均宽度 21.3 m , 长度 950 m , 坡比 $1:2$ 。池内平均每 3 m^2 配备微孔曝气盘 1 个, 共设置微孔曝气盘 $7\,500$ 个, 曝气盘直径 215 mm , 通气量 $2\sim 4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{个})$, 安装时距离池底 30 cm 。曝气池底部曝气头附近区域铺设土工布, 以防止底泥堵塞曝气头。配备 3 台罗茨风机, 分段曝气, 确保曝气池水体溶解氧浓度在夏季不低于 4 mg/L , 秋季不低于 3 mg/L , 冬季不低于 2 mg/L 。

在曝气池中定期添加耐盐芽孢杆菌、光合细菌等微生物复合菌剂, 其中耐盐芽孢杆菌制剂有效菌含量为 1.0×10^9 个/g, 投加量为 $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 养殖尾水排放周期内每周投加一次。投放鲮、梭鱼, 投放量不少于 $4\,500 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 吊养牡蛎或投放文蛤、缢蛏、杂色蛤、美洲帘蛤等底栖贝类, 投放量不少于 $4\,500 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。曝气池岸坡种植盐地草本(碱蓬、盐角草、中

华补血草)、挺水植物(芦苇、海三棱藨草)、沉水植物(川蔓藻、大叶藻)等耐盐水生植物, 水生植物种植面积约占水面面积的 40%。

5.5 生物净化池

生物净化池中建立贝类-鱼类-水生植物生态系统, 在不投加外源饵料情况下生长, 实现有机物、氮、磷的充分去除。生物净化池平均有效水深为 1.5 m , 平均宽度 33.7 m , 坡比 $1:3$, 总面积为 6.97 hm^2 , 占尾水治理区域总面积的 41.66%。

生物净化池岸坡及坡底种植盐地草本(碱蓬、盐角草、中华补血草)、挺水植物(芦苇、海三棱藨草)、沉水植物(川蔓藻、大叶藻)等耐盐水生植物, 种植面积占生物净化池面积的 40%; 同时在生物净化池中设置生态浮岛, 浮岛面积约占生物净化池水面面积的 10%。在生物净化池中投放牡蛎或文蛤、缢蛏等底栖贝类, 投放量为曝气池投放量的 50%。

5.6 其他排水设施

生物净化池末端设置排水泵站, 通过泵站将处理达标的尾水排入洪港河。此外, 尾水治理系统末端设置循环回路, 在生物净化池出水外排前, 若水质检测不达标, 则生物净化池尾水经过带闸门暗管回流至南区沉淀池循环处理, 或在养殖池塘无尾水外排期间形成尾水净化区内循环回路, 确保系统内微生物活性。

6 治理效果及经济分析

6.1 治理效果

该工程实施后, 在连通沟渠、沉淀池、曝气池、生物净化池末端设置采样监测点, 整个养殖尾水排放周期(11月初—12月中旬)内每周取样一次, 共 6 次, 监测指标为 pH、COD、TN、TP、SS 和 DO。通过系统运行调试, 经地方生态环境监测站和第三方检测机构现场采样和检测, 各监测点各项监测指标平均值如表 3 所示。

表 3 养殖尾水处理系统各单元水质检测结果

Tab.2 Water quality test results of aquaculture wastewater treatment system

项目	pH	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
养殖尾水	6.95	13.58	8.54	0.31	152.19	8.35
沉淀池	7.09	12.43	6.47	0.21	46.75	6.73
曝气池	6.87	5.69	1.36	0.18	53.60	11.52
生物净化池	7.08	4.24	1.08	0.13	32.19	8.20

监测结果显示:养殖尾水处理系统对COD、TN、TP、SS的去除率分别为68.78%、87.35%、58.06%、78.85%,系统出水所检指标均达到《标准》要求。其中,沉淀池(含末端过滤坝)去除率最高的指标为SS,表明较长的沉淀时间、优化设置的生物毛刷和填装改性滤料的过滤坝共同作用,取得了较好的SS去除效果;曝气池去除率较高的指标为COD和TN,表明在曝气条件下,耐盐芽孢杆菌和其他土著微生物协同作用,对盐分较高的养殖尾水同样有理想的去除效果。生物净化池继续利用水生动植物的同化吸收作用,对几项主要指标均有良好的去除效果。

6.2 经济分析

该项目总投资约1140万元,其中:河道改造、坝体、泵站等土建工程费用约600万元,风机、水泵、曝气系统、滤料和闸门等设备费用约330万元,水生动植物和生物菌剂等费用约80万元,其他配套工程和咨询设计等费用约130万元。

养殖尾水处理系统建成后,运行费用约25万元/a,按照园区每年养殖两季,每季处理养殖尾水 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 计算,养殖尾水处理费用平均为0.083元/ m^3 ,主要包含人工费、电费、菌剂费和水动植物采购费。值得一提的是,生物净化池中投加的鱼类、贝类具有一定的经济价值,可实现尾水达标排放和经济效益双赢。

7 结论

采用“改良型三池两坝”工艺处理南美白对虾养殖尾水,通过优化沉淀池停留时间,利用生物毛刷的过滤拦截作用,强化沉淀池预处理效果;过滤坝填装改性复配生物炭滤料,进一步吸附和拦截尾水中的SS;向曝气池投加优势耐盐芽孢杆菌,改良生物菌剂活性,保证了对TN和有机物的去除效果。实际工程运行效果表明,该工艺对南美白对虾养殖尾水具有较好的处理效果,出水水质能稳定达到《标准》中海水二级排放标准。

需要注意的是,过滤坝的日常冲洗维护和冬季水生植物的管理维护是尾水治理系统维护的重要内容,应保障整个系统得到有效维护管理。此外,按照江苏省的相关规定要求,在尾水排放及池塘清淤前,养殖主体应严格执行养殖尾水排放备案制度,确保养殖尾水排放行为合法合规。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2022中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2022:103-104.
Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2022 China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 103-104 (in Chinese).
- [2] 江苏省统计局. 江苏省农村统计年鉴2021[M]. 南京:江苏省统计局,2021:75-78.
Jiangsu Provincial Bureau of Statistics. Jiangsu Rural Statistical Yearbook 2021 [M]. Nanjing: Jiangsu Provincial Bureau of Statistics, 2021: 75-78 (in Chinese).
- [3] 王海航,王扬才,刘又毓,等. 南美白对虾集约化养殖尾水处理系统在生产中的应用[J]. 环境污染与防治, 2023,45(4):511-515.
WANG Haihang, WANG Yangcai, LIU Youyu, et al. Application of the aquaculture wastewater treatment system in intensive whiteleg shrimp culture [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(4): 511-515(in Chinese).
- [4] 江苏省生态环境厅,江苏省市场监督管理局. 池塘养殖尾水排放标准:DB 32/4043—2021[S]. 北京:中国质检出版社,2021:1-4.
Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province, Jiangsu Provincial Market Supervision and Administration Bureau. Discharge Standard of Water from Aquaculture Ponds: DB 32/4043-2021 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2021: 1-4 (in Chinese).
- [5] 王华,苏鹏,徐永超. 南美白对虾工厂化循环水养殖尾水治理方式及效益分析[J]. 科学养鱼, 2021(7): 17-19.
WANG Hua, SU Peng, XU Yongchao. Analysis on the treatment and benefits of wastewater from industrialized circulating water aquaculture of whiteshrimp [J]. Scientific Fish Farming, 2021(7):17-19 (in Chinese).
- [6] 赵坤,田相利,李咏梅,等. 凡纳滨对虾养殖池塘高效脱氮芽孢杆菌的分离筛选及特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(S1):17-29.
ZHAO Kun, TIAN Xiangli, LI Yongmei, et al. Isolation and screening of highly efficient nitrogen

- removing *Bacillus* from shrimp culture ponds and their characterization [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(S1): 17-29(in Chinese).
- [7] 宣元元. 好氧反硝化细菌的筛选鉴定及水质调控效果研究[D]. 泰安:山东农业大学,2024.
- XUAN Yuanyuan. Screening and Identification of Aerobic Denitrifying Bacteria and Study of Water Quality Control Effects [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024(in Chinese).
- [8] 齐睿洁,王健鑫. 海洋环境异养硝化-好氧反硝化菌的研究进展[J]. 微生物学通报,2024,51(1):66-76.
- QI Ruijie, WANG Jianxin. Advances in heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria in marine environment[J]. Microbiology China, 2024, 51(1): 66-76(in Chinese).
- [9] 刘堂凤. 海水养殖中异养硝化-好氧反硝化菌株的筛选及其脱氮机制研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2023.
- LIU Tangfeng. Strains and Their Nitrogen Removal Mechanism in Mariculture Screening of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2023 (in Chinese).
- [10] 黄海洪,陈倩,类延菊,等. 低营养水体中芽孢杆菌降解有机氮的研究[J]. 环境科学学报,2019,39(2): 325-335.
- HUANG Haihong, CHEN Qian, LEI Yanju, *et al.* Organic nitrogen removal by *Bacillus* strains in water body under low nutrition level [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(2): 325-335(in Chinese).
- [11] 李可. 对虾养殖环境微生物多样性分析和微生态制剂的研究与应用[D]. 厦门:厦门大学,2008:12-19.
- LI Ke. Molecular analysis of Microbial Diversity in Shrimp Culture Environment and Study and Application of Probiotics for Shrimp Aquaculture [D]. Xiamen: Xiamen University,2008:12-19(in Chinese).
- [12] 刘梅,原居林,倪蒙,等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报,2021,11(1):97-106.
- LIU Mei, YUAN Julin, NI Meng, *et al.* Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “three ponds and two dams” [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(1): 97-106(in Chinese).
-
- 作者简介:王雄(1986-),男,湖北鄂州人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,主要研究方向为水污染治理。
- E-mail:astro8023@qq.com
- 收稿日期:2024-01-31
- 修回日期:2024-04-29

(编辑:衣春敏)

综合运用自然恢复和人工修复,
持之以恒推进生态建设