

# 海水池塘养殖园区排放水综合生态净水技术研究<sup>\*</sup>

宋娴丽, 逢劲楠, 吴莹莹, 邱兆星, 吴海一<sup>\*\*</sup>

(山东省海洋生物研究院, 青岛市浅海底栖渔业增殖重点实验室, 山东青岛 266104)

**摘要:**本研究以海水池塘养殖园区排放水集中设施化处理为切入点, 集成泡沫分离、生物滤池及大型藻等多种生态修复技术, 构建了海水池塘养殖园区排放水综合生态净水系统。经过综合生态净水系统处理, 池塘养殖排放水中化学耗氧量(COD)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、亚硝氮(NO<sub>2</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub>-N)、溶解无机氮(DIN)及活性磷酸盐(DIP)综合去除率平均分别为 40.84%、89.37%、86.88%、93.75%、78.74% 和 59.73%。通过该技术可明显改善园区排放水质量, 基本可以实现各项指标的达标排放。

**关键词:**海水养殖 渔业园区 养殖尾水 生态净化 达标排放

中图分类号: X714 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2020)02-0131-06

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20200603.008



微信扫一扫, 与作者  
在线交流(OSID)

## 0 引言

近年来, 随着我国沿海养殖模式的转型升级, 集中、集约化海水养殖发展格局导致高度汇集的养殖废水点源式排放, 加剧了局部海区的富营养化和养殖区自身污染程度, 严重制约着海水池塘养殖产业的可持续发展<sup>[1-2]</sup>。2019年1月11日, 由农业农村部等10部委联合印发的《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》中明确提出, 推进养殖尾水治理和发挥水产养殖生态修复功能的相关要求。为满足国家“新旧动能转换”与“生态文明建设”的发展需求, 保证海水池塘养殖业绿色可持续发展, 深入开展海水养殖园区排放水生态化处理技术研究意义重大。早在20世纪80年代, 以色列和泰国等国家便开始颁布相关法

律, 强制养殖企业污水必须经过净化处理后才能排放入海, 这一点在我国已经受到足够的重视, 但仍未得到有效的控制<sup>[3]</sup>。随着技术的发展, 一系列针对工厂化循环水养殖水的处理工艺日趋成熟<sup>[4-6]</sup>, 相对而言, 针对高通量室外池塘养殖园区的排放水处理技术则起步较晚。范航清等<sup>[7]</sup>提出的复合人工湿地尾水处理模式可将25%—50%的养殖水面用于重建红树林和盐沼植被, 但由于该模式大幅降低养殖空间利用率, 且存在湿地植被生长环境限制及地域特点等限制, 在实际应用中存在较大的局限性。而基于多营养层次的生态养殖模式(IMAT), 如虾—贝—藻混养<sup>[8]</sup>及鱼菜共生循环系统(ARS)<sup>[9]</sup>等模式可显著提高系统的光能利用率和投入系统总能的转化效率, 并在一定程度上降低自身污染物的排放, 但在处理养殖排放

<sup>\*</sup> 山东省2016年度农业重大应用技术创新课题——渔业养殖园区排放水生态净化循环利用模式开发研究, 科技部“海洋环境安全保障”重点专项(2018YFC1407601), 山东省现代农业产业技术体系创新团队项目(SDAIT26)和国家贝类产业技术体系近海增养殖岗项目(CARS-49)资助。

### 【作者简介】

宋娴丽(1980—), 女, 博士, 主要从事养殖污染生态学研究, E-mail: songxianli2005@126.com。

### 【\*\*通信作者】

吴海一(1973—), 男, 研究员, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: wuhaiyi1997@163.com。

### 【引用本文】

宋娴丽, 逢劲楠, 吴莹莹, 等. 海水池塘养殖园区排放水综合生态净水技术研究[J]. 广西科学院学报, 2020, 36(2): 131-136.

SONG X L, PANG S N, WU Y Y, et al. Research on Comprehensive Ecological Water Purification Technology of Discharged Water from Aquaculture Pond in Fishery Park [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020, 36(2): 131-136.

水过程中仍然存在基础设施薄弱、处理效率低下、水资源浪费严重、工程化水平低下等问题<sup>[10-12]</sup>。本研究以园区规划改造、尾水集中排放、设施工程化处理为基础,以海水池塘养殖园区排放水集中处理为切入点,通过对多种物理、生物修复技术的集成耦合,构建了海水池塘养殖园区排放水综合生态净水处理系统,拟为海水池塘养殖的无害化排放提供有力的实践经验和数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 系统设计

试验于 2017 年 5 月至 2017 年 10 月在日照开航水产技术公司养殖园区内开展,净化池塘位于园区集中排水渠下游的末端,面积 3 000 m<sup>2</sup>。净化处理系统包括泡沫分离装置、微生物滤池和大型藻修复区(图 1)。养殖园区排放水通过水泵抽提进入泡沫分离装置,流速为 600 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,有机泡沫分离后的水直接

进入大型藻修复区,而分离出的有机泡沫则随少量高浓度的有机质颗粒物水流通过装置的上排水口进入生物滤池中进行颗粒物的静置、有机质降解及水体修复,后溢入大型藻修复区进行吸收和转化(流速 20 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>),在大型藻修复区中央通过涌浪机作用充分混合后经排水口排放。系统中泡沫分离装置由杭州大贺水处理技术有限公司定制而成,罐体为玻璃钢材质,罐体直径 3.6 m,深 2 m,储水量 20 m<sup>3</sup>,罐底设置微孔气排装置。微生物滤池由 4 个宽 2 m,长 5 m,深 1 m 的水泥池进出水口上下交替串联而成,池中由竹排悬挂弹性填料作为固定化微生物附着基,竹排间距 20 cm,每根竹排上悬挂约 20—30 根弹性填料,池内微生物由池塘纳水时环境中土著微生物自然挂膜 30 d 形成。大型藻羊栖菜采购于浙江洞头海区,用浮筏吊养于涌浪机四周,面积为 30 m×40 m,局部吊养密度 400 g/m<sup>3</sup>,并通过涌浪机(0.75 kW)的作用使净化池中水体充分混合。

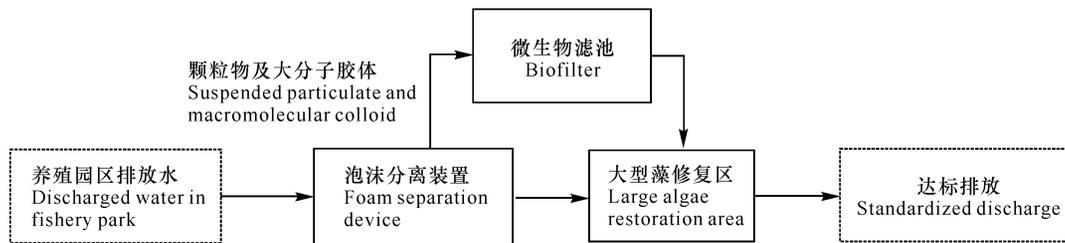


图 1 养殖园区排放水生态处理系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ecological treatment system in fishery park

### 1.2 取样及分析方法

对净化处理池中的各个修复模块的进出口水进行逐月采样。系统正常运行 2 h,待泡沫分离装置及微生物滤池中存水完全排出后,在流动状态下每隔 30 min 分别采集园区排放水、经泡沫装置分离后的泡沫水、经泡沫分离装置处理后的排放水、经微生物滤池处理后的水、大型藻处理后的水共 5 个水样,共采集 4 次,每个水样取 3 个平行样,分别测定 pH、COD、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、亚硝氮(NO<sub>2</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub>-N)、活性磷酸盐及溶解无机氮(DIN)等 6 个指标。其中,pH 使用雷磁( PHS-3C)现场测定,氨氮、亚硝氮、硝氮及活性磷酸盐使用紫外可见分光光度计(YQ-005)测定,无机氮待测水样均用经过盐酸浸泡后的醋酸纤维膜(Φ:0.45 μm)抽滤后测定,COD 采

用高锰酸钾法测定,具体分析方法参见《海洋监测规范》(GB 17378—2007)。

### 1.3 计算方法

$$RR_i(\%) = (C_{\text{Inlet}} - C_{\text{Outlet}}) / C_{\text{Inlet}} \times 100\%$$

式中: $i$  为相应水质指标;RR 为系统对  $i$  指标的去除率,%; $C_{\text{Inlet}}$  为系统进水口  $i$  指标浓度,mg/L; $C_{\text{Outlet}}$  为系统出水口  $i$  指标浓度,mg/L。计算结果用 Excel 2007 和 Origin 8.0 进行数据处理。

## 2 结果与分析

试验期间净化池塘水深 1.2—1.5 m,水温变化为 23.2—35.3℃。养殖排放水盐度变化为 16‰—29‰,pH 值变化为 7.89—8.33,其他各指标变化范围及平均值见表 1。

表 1 养殖园区排放水各指标含量(mg/L)

Table 1 Various indicators of water discharged from fishery park (mg/L)

项目 Item	指标 Indicator						
	COD	NH <sub>4</sub> -N	NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	DIN	DIP
变化范围 Range of variation	1.98—2.34	0.06—0.28	0.002—0.053	0.01—0.14	0.19—0.65	0.26—0.93	0.03—0.24
平均值 Average value	2.60	0.11	0.011	0.07	0.43	0.61	0.17

## 2.1 泡沫分离技术对水体的净化效果

泡沫分离技术对养殖排放水中 COD、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、DIN 及 DIP 均有较明显的去除效果(图 2), 其对各项指标的去除率平均值分别为 41.95%、55.68%、51.97%、58.08%、57.05% 和 44.33%, 且去除率均随着温度的升高而降低。在 29℃ 以上, 泡沫分离技术对水体各指标的去除能力有一个明显的降低过程, 这可能是由于持续降雨、盐度骤降以及泡沫表面张力减弱、浓缩效率降低所致。

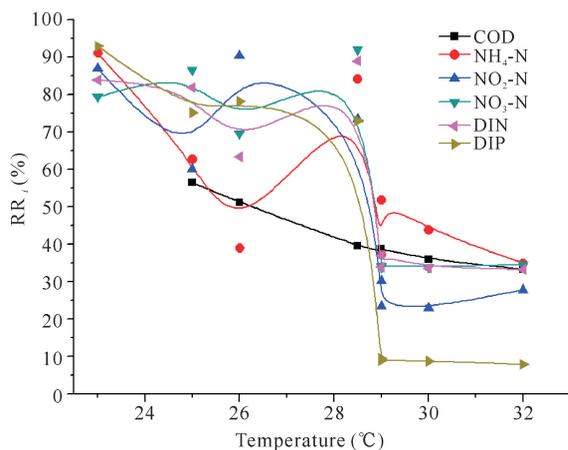


图 2 泡沫分离技术对养殖排放水的净化效果

Fig. 2 Purification effect of foam separation technology on discharged water

## 2.2 微生物滤池对水质的净化效果

微生物滤池对水体中 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、DIN 有较明显且稳定的去除效果(图 3), 对各项指标的去除率平均值分别为 60.34%、57.37%、38.79% 和 44.13%, 但其对 COD 去除效率较低, 且对活性磷酸盐 DIP 的去除效果不稳定, 该结果与傅雪军等<sup>[13]</sup> 研究结果一致。

## 2.3 大型藻对水质的净化效果

本研究结果显示, 水温在 23—26℃ 时羊栖菜对水体中 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、DIN 及 DIP 均有较明显的去除效果(图 4), 对各项指标的去除率平均值分别为 60.60%、47.00%、50.66%、53.37% 和

53.57%。当水温超过 26℃ 持续 1 周左右, 羊栖菜的生长停滞, 对水体会产生较大的负面影响。

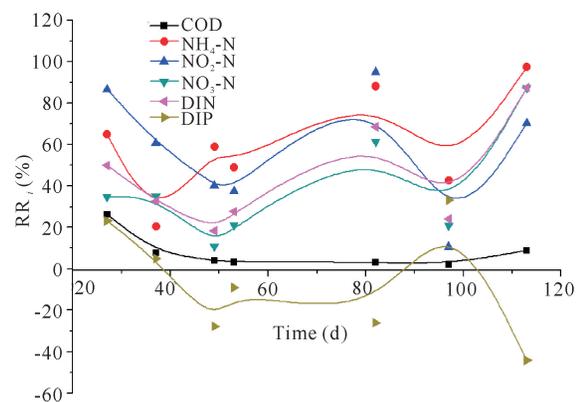


图 3 微生物滤池对养殖排放水的净化效果

Fig. 3 Purification effect of biofilter on discharged water

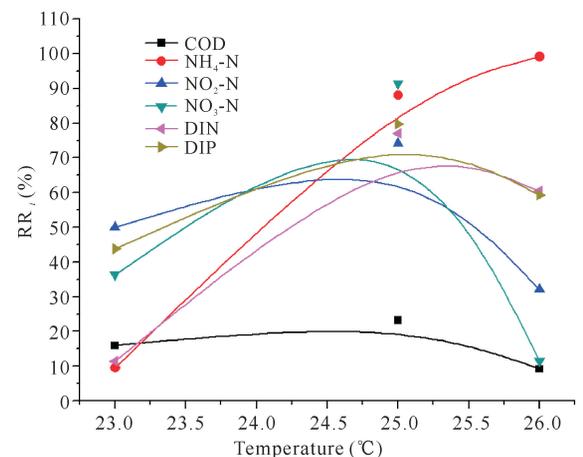


图 4 大型藻(羊栖菜)对水质各指标的去除率

Fig. 4 Removal rate of large algae (*Sargassum fusiforme*) on discharged water

## 2.4 综合生态净化技术对园区养殖排放水的综合处理效果评价

养殖园区排放水分别经过泡沫分离、微生物滤池及大型藻处理后, 各检测指标明显降低, 系统对 COD、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、DIN 及 DIP 综合去除率平均分别为 40.84%、89.37%、86.88%、93.75%、78.74% 和 59.73%, 各处理技术对各项指

标的综合去除率见图5。泡沫分离技术对各指标的去污作用最为显著,修复作用的贡献率为58.30%—77.33%;微生物滤池除对活性磷酸盐作用不明显之外,对其他指标也具有一定的修复作用,贡献率为8.49%—30.91%;大型藻对磷酸盐的修复作用仅次

于泡沫分离技术,贡献率为10.79%—40.22%。

## 2.5 养殖园区排放水质改善状况评价

基于4种海水水质标准,对经处理前后池塘养殖园区排放水质改善情况进行综合评价(图6)。在经系统处理前,养殖排放水中COD全部达标;DIN

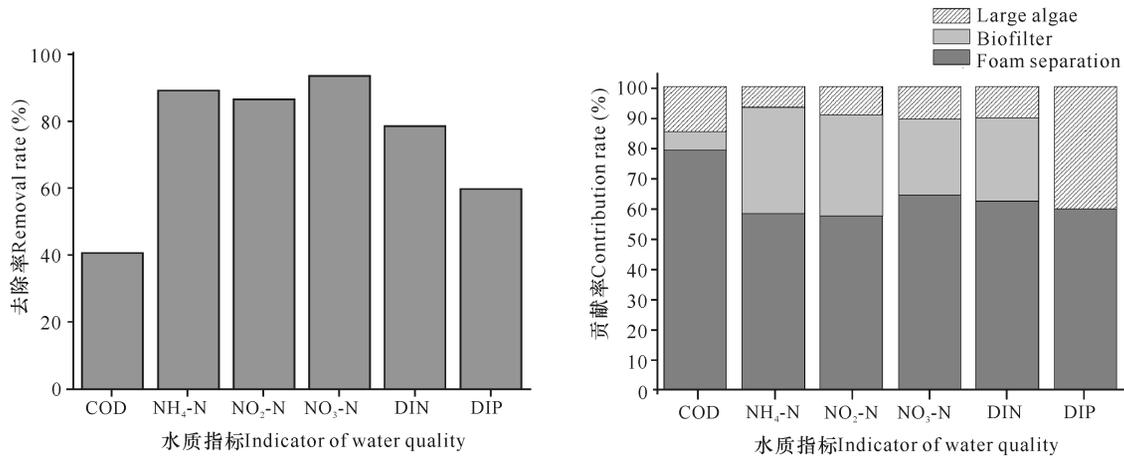
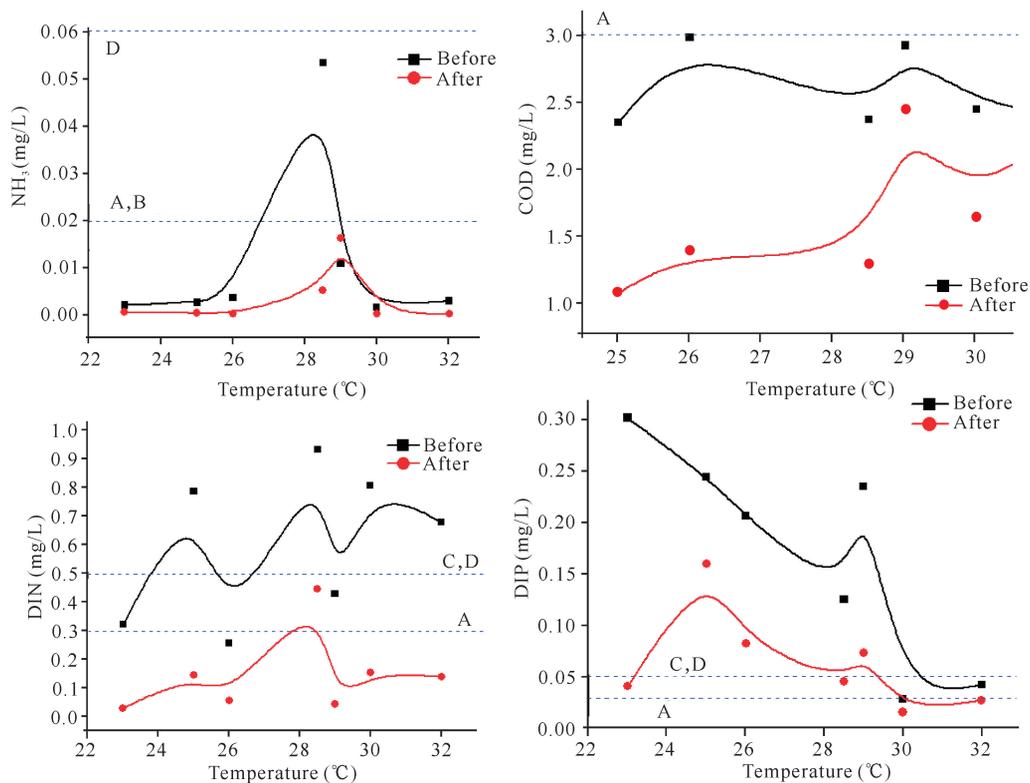


图5 各净水技术对水质各指标综合修复作用

Fig. 5 Comprehensive remediation effect of various water purification technologies on various indicators of water quality



A:《海水水质二类标准》,B:《渔业水质标准》,C:《海水养殖水排放要求》,D:《水产养殖废水排放要求》

A:Sea water quality standard (II),B:Water quality standard for fisheries,C:Water drainage standard for sea water mariculture,D:Discharge requirement for aquaculture waste water

图6 水质改善状况评价

Fig. 6 Evaluation of water quality improvement

除单次取样达标之外,其余样品均超标,尤其是6月下旬水温至26℃以上时, $\text{NH}_3$ 浓度高达0.05 mg/L,严重超出《海水水质二类标准》和《渔业水质标准》;DIP平均值为0.17 mg/L,超标情况较为严重。而采用生态净化处理技术可以明显改善养殖排放水水质状况,基本可以实现各项指标的达标排放。

### 3 讨论

#### 3.1 各生态净水技术之间的性能互补

本研究采用泡沫分离装置将从养殖排放水中分离出的有机物作为下一个处理环节——微生物滤池中土著微生物繁殖生长所需的氮源、碳源,大幅提高营养物质在系统内的流动、转化效率,并减少外源微生物制剂使用所引起的二次污染。笔者在2016年对虾养殖池塘现场修复试验中发现,通过自然挂膜培养的微生物只能维持60 d左右的生物活性<sup>[5]</sup>;而本次试验中采用泡沫分离物作为持续营养源的微生物滤池在试验开展120 d后(图3),仍然能维持较高的修复效率。本系统中微生物滤池还兼具静置去除颗粒态污染物的功能,而养殖中后期排放水中氨氮浓度的升高也有利于自然挂膜微生物的扩繁生长<sup>[14]</sup>。另一方面,系统中大型藻修复技术对活性磷酸盐出色的修复能力将有效弥补微生物滤池对其修复能力不足的问题。因此,在池塘养殖园区排放水净化处理过程中,将以上多种净水技术联合使用可取得更佳的净化效果。

#### 3.2 高通量园区排放水处理技术中的性能局限

于向阳等<sup>[15]</sup>在室内受控实验中发现当水体中COD浓度低于4.32 g/L时,泡沫分离技术对COD最大去除率约为40%,而在本研究中该技术对COD的去除率要明显低于该值,综合去除率仅为32.23%。这主要是由于系统在处理较大通量的养殖排放水时,流速的增加会导致系统对有机泡沫浓缩效率降低,这种为满足处理速度而牺牲处理效率的情况,在大规模养殖水体修复过程中在所难免。

#### 3.3 养殖中后期影响生态化净水技术处理性能的关键因素

研究中发现在对虾池塘养殖中后期,无机氮会出现逐渐升高的趋势,而活性磷酸盐含量出现逐渐降低的趋势,该评价结果与True等<sup>[16]</sup>及盖春蕾等<sup>[17]</sup>研究结果一致。无机氮的积累主要来源于饵料的投喂、对虾的排泄以及沉积物中营养盐的溶出<sup>[18]</sup>,活性磷酸盐在养殖前期超标主要是由于池塘前期所投入的

复合肥在养殖环境中缓慢释放所致。本系统对无机氮和活性磷酸盐的综合去除率分别为78.74%和59.73%,通过整套修复系统,前者基本达标,而磷酸盐由于底物浓度过高超出处理系统修复能力,如将其浓度降至0.0429 mg/L时则可实现达标。因而可以从控制前期投入品用量及提升系统对磷酸盐的去除能力两方面来提升修复系统对磷酸盐的处理效率。

#### 3.4 综合生态净水技术的水处理负荷

较过去对虾池塘养殖使用大排大灌的养殖方式<sup>[19]</sup>,随着虾—蟹—贝混养等池塘生态养殖模式的日益推广,养殖环境营养物质的循环利用趋向最大化,池塘养殖的排水量日益减少。20世纪90年代,烟台地区对虾养殖池塘每公顷的年换水量为2400 m<sup>3</sup>(注:水深按1.5 m估算)<sup>[20]</sup>,经估算本研究所处的对虾池塘养殖园区每公顷的年换水量约为1200 m<sup>3</sup>。在我国北方,对虾池塘养殖周期一般为180 d,平均每天每公顷池塘养殖排水量约为6.67 m<sup>3</sup>。由此可以看出生态养殖模式的不断推广大幅降低池塘养殖换水量,使得通过综合生态净水技术在户外对池塘养殖排放水集中处理成为可能。

### 4 结论

以园区规划改造、尾水集中排放、设施工程化处理为基础,集成泡沫分离、生物滤池及大型藻等多种修复技术对养殖园区排放水进行集中处理,可有效改善养殖排放水水质状况,基本实现各项指标的达标排放,为全国渔业产业示范园区建设提供良好示范。海水池塘养殖区换水量的持续减少,降低待处理水体总量负荷,对于满足生态化处理系统的负载能力具有十分积极的作用。在研究过程中,如何维持并提高各生态化处理技术的修复效率及系统对高通量园区排放水的处理能力,对实现规模化海水养殖园区尾水的有序排放和高效处理是至关重要的。

#### 参考文献

- [1] 曹伏龙,夏丽华,郭治兴,等. 海水养殖污染研究进展[J]. 广东农业科学, 2015, 42(22): 97-105.
- [2] 陈祖峰,郑爱榕. 海水养殖自身污染及污染负荷估算[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(Sup): 258-262.
- [3] 杨逸萍,王增焕,孙建,等. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支[J]. 海洋科学, 1999(1): 15-17.
- [4] FUNGE-SMITH S J, BRIGGS M R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds implications of sustainability[J]. Aquaculture, 1998, 164(18): 117-133.

- [5] 宋娴丽. 对虾池塘养殖环境综合生态修复技术及效果评估模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
- [6] BOOPATHY R, BONVILLAIN C, FONTENOT Q, et al. Biological treatment of low-salinity shrimp aquaculture wastewater using sequencing batch reactor [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, 59(1): 16-19.
- [7] 范航清, 阎冰, 吴斌, 等. 虾塘还林及其海洋农牧化构想[J]. *广西科学*, 2017, 24(2): 127-134.
- [8] ALI N, MOHAMMAD A W, JUSOH A, et al. Treatment of aquaculture wastewater using ultra-low pressure asymmetric polyethersulfone (PES) membrane [J]. *Desalination*, 2005, 185(1/2/3): 317-326.
- [9] 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[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
- [10] 包杰, 田相利, 董双林, 等. 对虾、青蛤和江蓠混养的能量收支及转化效率研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36 (Sup): 27-32.
- [11] ENDUTA A, JUSOH A, ALI N, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 32(1/2/3): 422-430.
- [12] 王一笑. 规模化海水养殖废水处理技术探讨[J]. *农业与技术*, 2017, 37(10): 245-246.
- [13] 傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 等. 循环水养殖系统中自然微生物生物膜形成过程实验[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(5): 713-717.
- [14] 刘盼盼, 邱立平. 规模化海水养殖废水处理技术研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2016, 47(2): 1-4.
- [15] 于向阳, 刘鹰, 张延青. 影响海水养殖系统中泡沫分离器效果的因素[J]. *水产科学*, 2005, 24(9): 24-26.
- [16] TRUE B, JOHNSON W, CHEN S. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture III: Assessing high-rate filtration media for effluent solids and phosphorus removal [J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 32(1): 161-170.
- [17] 盖春蕾, 于晓清, 许拉, 等. 不同养殖密度下凡纳滨对虾工厂化养殖排放水研究[J]. *水产科技情报*, 2019, 46(2): 118-120.
- [18] 谢东海, 韩奇, 唐文浩. 海水养殖对生态环境影响的国内外研究动态[J]. *江苏环境科技*, 2005, 18(Sup): 10-12.
- [19] PORRELLO S, LENZI M, PERSIA E, et al. Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system I. Dissolved and particulate nitrogen and phosphorus [J]. *Aquaculture*, 2003, 219: 515-529.
- [20] 翟美华. 烟台市养虾废水排放及控制[J]. *海洋环境科学*, 1996(4): 58-61.

## Research on Comprehensive Ecological Water Purification Technology of Discharged Water from Aquaculture Pond in Fishery Park

SONG Xianli, PANG Shaonan, WU Yingying, QIU Zhaoxing, WU Haiyi

(Key Laboratory of Benthic Fisheries Aquaculture and Enhancement, Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao, Shandong, 266104, China)

**Abstract:** The centralized facility treatment of discharged water in aquaculture pond of the fishery park was taken as an entry point, various environmental engineering ecological restoration technologies such as foam separation, biological filter and large-scale algae were integrated to construct an ecological water purification treatment system of the discharge water in the marine-pond aquaculture park. After treated by the integrated ecological water purification system, the average removal rate of the chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), nitrous nitrogen ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), dissolved inorganic nitrogen (DIN) and active phosphate (DIP) in the pond culture discharge water was 40.84%, 89.37%, 86.88%, 93.75%, 78.74% and 59.73%, respectively. This technology can significantly improve the quality of the water discharged from aquaculture pond and various emission indicators can basically achieve the standard.

**Key words:** marine culture, fishery park, discharge water, ecological treatment, standardized discharge

责任编辑: 米慧芝