

淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价

徐嘉波, 刘永士, 施永海, 袁新程, 王建军, 刘建忠

Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system

XU Jiabo, LIU Yongshi, SHI Yonghai, YUAN Xincheng, WANG Jianjun, LIU Jianzhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200402987>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

暗纹东方立体种养模式和单养模式的水质变化及养殖能效比较

Comparative analysis of water quality changes and cultural efficiencies between multistory culture model and traditional monoculture model of obscure puffer (*Takifugu obscurus*)

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 789 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200603090>

基于氮磷负荷的淡水池塘河蟹养殖容量估算

Assessment of carrying capacity of crab culture in freshwater pond based on nitrogen and phosphorus load

上海海洋大学学报. 2021, 30(3): 492 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403014>

上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

添加芽孢杆菌对草鱼池塘中真核微生物的影响

Effect of *Bacillus* on eukaryotic microorganism in grass carp ponds

上海海洋大学学报. 2020, 29(2): 218 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190102525>

施肥对幼蟹池塘养殖水质影响的初步探究

Preliminary study on the effect of fertilization on the water quality of crab culture pond

上海海洋大学学报. 2018, 27(6): 884 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180302249>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0170-11

DOI:10.12024/jsou.20200402987

淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价

徐嘉波, 刘永士, 施永海, 袁新程, 王建军, 刘建忠

(上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要: 使用水质标识指数法, 以总固体悬浮物(TSS)、有机物(COD_{Mn})、氨氮(TAN)、总氮(TN)、总磷(TP)作为单因子参评指标和综合评价指标, 依据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007)对淡水养殖小区进水源、池塘养殖尾水和养殖尾水处理系统排放水进行综合水质的评价分析。研究表明: 在本集中连片池塘与养殖尾水处理系统构成的淡水养殖小区中, 进水源主要污染物为 TN; 养殖池塘主要污染物风险因子为 TP、TSS; 养殖尾水处理系统对养殖尾水综合水质净化发挥重要作用, 东区池塘养殖尾水经尾水处理系统(S1)处理后, 综合水质得到改善($I_{\Delta X1.X2} = 13\%$), 主要污染物 TN 得到显著改善($I_{\Delta X1.X2} = 23\%$), 西区池塘养殖尾水经尾水处理系统(S2)处理后, 综合水质略有改善($I_{\Delta X1.X2} = 9\%$); 利用养殖尾水处理系统对水产养殖尾水实施净化处理, 经处理后的排放水达到或优于养殖小区进水源综合水质的水平, 并符合《淡水池塘养殖水排放要求》一级排放标准, 且未对邻近自然水域环境造成负面影响, 还略有改善作用。

关键词: 集中连片池塘; 养殖尾水处理系统; 水质标识指数法; 水质评价; 达标排放

中图分类号: X 52 **文献标志码:** A

目前, 我国水产养殖水域环境面临外部与内在的巨大压力, 随着绿色发展理念不断深入人心, 从水产养殖业自身出发, 研究养殖尾水达标排放乃至重复利用^[1]的技术日渐紧迫。近年来, 学者们利用人工湿地^[2-4]、生态沟渠^[5]、水处理集成设备^[6]等方式开展养殖尾水净化处理研究, 对养殖尾水中主要污染物指标仅使用单因子的方式评价, 然而单一指标的去除效果受实验规模、环境指标本底值和处理系统运行参数等影响, 无法全面客观地反映综合水质状况^[7], 因此, 有必要引入反映多项参评因子综合水质状况, 既能定性又能定量的评价方法。现有的综合水质评价方法主要用于对河流水质的评价, 包括人工神经网络法^[8]、模糊综合指数法^[9]、灰色聚类法^[10]和水质标识指数法^[11-12]等。

综合考虑这些评价方式的优缺点^[13-14], 水质

标识指数法能较为全面地反映综合水质类别和综合水质污染程度, 故笔者将水质标识指数法依据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[15](以下简称国标)建立的地表水综合水质评价方式引入水产养殖小区综合水质评价中, 并依据《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007)^[16](以下简称行标)建立淡水养殖小区单因子和综合水质评价方式, 以池塘养殖并对水体环境造成较大影响的主要污染物, 包括总固体悬浮物(TSS)、有机物(COD_{Mn})、氨氮(TAN)、总氮(TN)、总磷(TP)为评价指标, 综合评价分析淡水养殖小区进水源、池塘养殖尾水和养殖尾水处理系统排放水的水质状况, 评估典型养殖池塘易产生的主要污染物风险指标并探明其发生规律, 评价养殖尾水处理系统对淡水养殖小区排放水主要污染物的去除特征和效果。

收稿日期: 2020-04-04 修回日期: 2021-01-22

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(2019-02-08-00-07-F01130); 上海长江口主要水生动物人工繁育工程技术研究中心项目(13DZ2251800); 上海市农业领军人才项目(沪委农办 2018-60 号)

作者简介: 徐嘉波(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为水产养殖和水环境监测及繁殖生物学。E-mail: shxujiabo@163.com

通信作者: 施永海, E-mail: yonghais@163.com

1 材料与方

1.1 养殖小区概况

养殖小区常年开展水产养殖生产,位于上海市奉贤区南部,占地面积约 13 hm²,主要组成包括总进水渠道、集中连片池塘、养殖尾水处理系统。总进水渠道为南北向,长 600 m,将养殖小区分为东区和西区。养殖池塘为东西向长方形,池塘的面积有 0.30 hm² 和 0.67 hm² 两种规格。东区池塘进排水方式为总进水渠道进水、东排水闸门排水。西区池塘进排水方式为总进水渠道进水,使用水泵借用总进水渠道排水。养殖尾水处

理系统(S1)由东区池塘总排水沟、东区表面流湿地和东区 1 个养殖池塘改造的净化塘组成,对所有东区养殖池塘(17 个,计 5.27 hm²)尾水进行净化处理。养殖尾水处理系统(S2)由西区表面流湿地、西区 2 个养殖池塘改造的净化塘组成,对所有西区养殖池塘(13 个,计 5.00 hm²)尾水进行净化处理。东区养殖池塘与养殖尾水处理系统面积比为 9.4:1,西区为 9.8:1。养殖小区内池塘、湿地、尾水处理系统均保留原底质状态。所有养殖尾水须经 S1、S2 处理后方能排放至自然水域。养殖小区构建及养殖尾水处理工艺流程见图 1。S1、S2 构建详细参数见表 1、表 2。

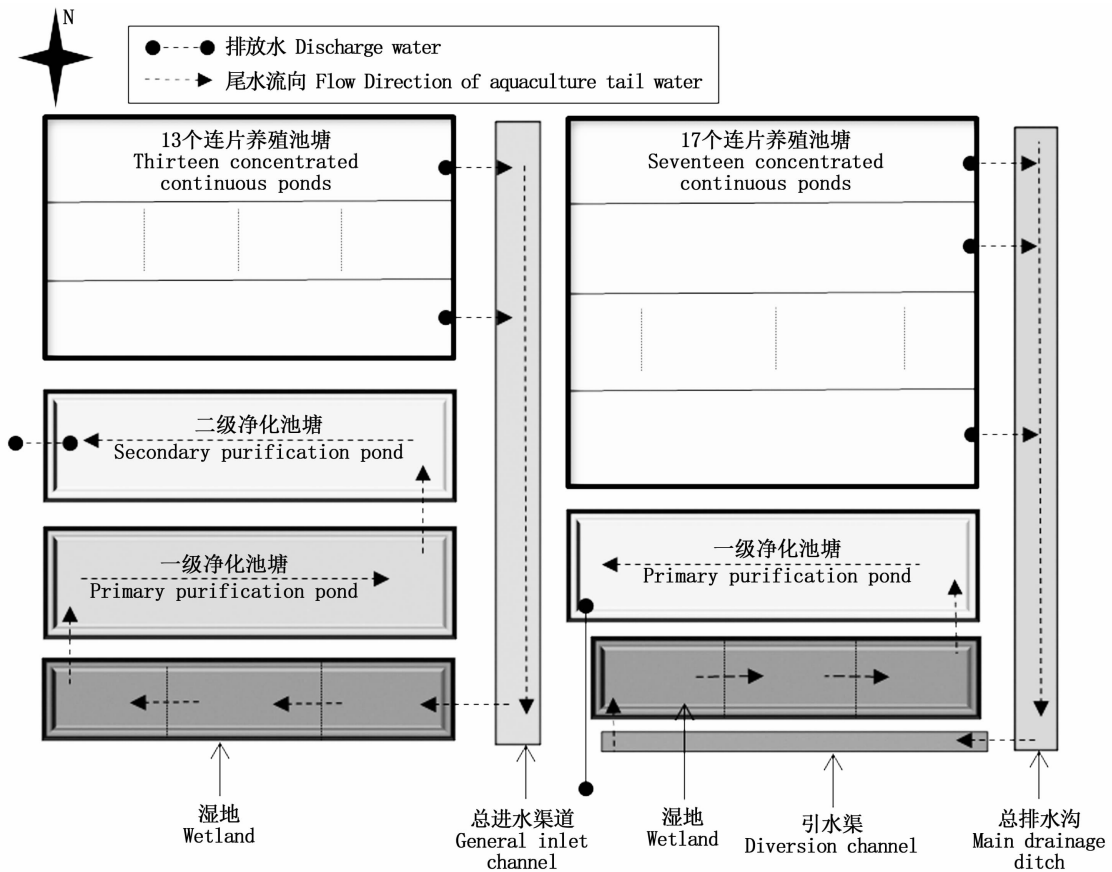


图 1 养殖小区构建及养殖尾水处理工艺流程

Fig. 1 Construction of aquafarm and the technological process of tail water treatment

表 1 养殖尾水处理系统 S1 构建详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of construction of aquaculture tail water treatment system S1

组成功能区 Functional zone	面积 Area/ m ²	规格长×宽 Length×Width/ m×m	深度/高度 Depth or Altitude/m	种投品种 Variety	种投初始数量 Initial number	种投初始规格 Initial specification	种投时间 Initial time m/d
总排水沟 Main drainage ditch	2 480	620 × 4	1.2	菱角 <i>Trapa bispinosa</i>	200 个		2/25
湿地东 Wetland East	226.20	29.0 × 7.8	0.7	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	15 株/m ²		上年
土坝 Dam	17.16	7.8 × 2.2	0.3				
湿地中 Wetland Middle	163.80	21.0 × 7.8	0.7	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	15 株/m ²		上年
土坝 Dam	17.16	7.8 × 2.2	0.3				
湿地西 Wetland West	218.40	28.0 × 7.8	0.7	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	15 株/m ²		上年
一级净化池塘 Primary purification pond	2 472	103 × 24	1.5	梭鱼 <i>Liza haematocheila</i>	1 030 尾	55 g/尾	3/27
				青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	10 尾	2.0 kg/尾	4/24 ~ 5/23
				空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	113 kg		6/11 ~ 7/14

表 2 养殖尾水处理系统 S2 构建详细参数

Tab. 2 Detailed parameters of construction of aquaculture tail water treatment system S2

组成功能区 Functional zone	面积 Area/ m ²	规格长×宽 Length× Width/ m×m	深度或高度 Depth or Altitude/ m	种投品种 Variety	种投 初始数量 Initial number	种投 初始规格 Initial specification	种投时间 Initial time/ (m/d)
湿地东 Wetland East	195.00	37.5 × 5.2	0.5	芦苇 <i>Phragmites communis</i>	15 株/m ²		上年
土坝 Dam	11.96	5.2 × 2.3	0.3				
湿地中 Wetland Middle	156.00	30.0 × 5.2	0.5	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	15 株/m ²		上年
土坝 Dam	16.64	5.2 × 3.2	0.3				
湿地西 Wetland west	182.00	35.0 × 5.2	0.5	菱角 <i>Trapa bispinosa</i>	150 个		2/25
一级净化池塘 Primary purification pond	2 544	106 × 24	1.5	梭鱼 <i>Liza haematocheila</i>	1 000 尾	55 g/尾	3/27
				青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	8 尾	2.0 kg/尾	4/24 ~ 5/9
				花鲢 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	66 尾	0.6 kg/尾	6/27
				白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	17 尾	0.6 kg/尾	6/27
二级净化池塘 Secondary purification pond	2 014	106 × 19	1.5	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	14 尾	2.0 kg/尾	4/24 ~ 5/23
				花鲢 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	3 尾	1.8 kg/尾	4/24 ~ 5/9
				白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	8 尾	1.8 kg/尾	4/24 ~ 5/9
				水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	25 kg		5/6
				空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	165 kg		8/1 ~ 8/5

1.2 养殖小区运行

养殖小区主要开展暗纹东方鲀、罗氏沼虾、中华绒螯蟹的多品种养殖(表 3)。4—12 月,养殖池塘根据不同养殖品种的水质管理需要,主要为每 15~30 d 换水 1 次,以 15 d 为周期,每次池塘集中轮换水持续 7~10 d。池塘排水时段为

5:00 pm 至次日 8:00 am,加水时段为 8:00 am 至 3:00 pm。池塘排水期间,东区湿地、一级净化池塘水力停留时间分别为 0.12 d、1.29 d;西区湿地、一级净化池塘、二级净化池塘水力停留时间分别为 0.10~0.15 d、0.89~1.33 d 和 0.70~1.05 d。

表 3 典型养殖池塘放养情况

Tab. 3 Typical aquaculture pond culture situation

养殖种类 Aquaculture species	放养规格 Initial specification/ (g/ind.)	放养密度 Initial number/ (ind./hm ²)	饲料品牌/蛋白质量分数 Feed brand/Protein mass fraction	饲料投放量 Feed quantity/ kg/hm ²
罗氏沼虾 <i>Macrobrachium rosenbergii</i>	0.1	675 000	明辉牌罗氏沼虾配合饲料/38%	9 375
中华绒螯蟹(非水草型) <i>Eriocheir sinensis</i> (without aquatic plant)	7.5	11 250	明辉牌螃蟹配合饲料/40%	3 750
暗纹东方鲀当年鱼种 <i>Takifugu obscurus</i> fingerling	7.5	42 000	常兴牌鳗鲡配合饲料成鳗料/45%	6 750
暗纹东方鲀成鱼 <i>Takifugu obscurus</i> adult fish	150.0	12 000	常兴牌鳗鲡配合饲料成鳗料/45%	4 200

1.3 数据采集与整理

1.3.1 水样采集与指标测定

养殖小区进水源采样点位于总进水渠道初始端,各池塘养殖尾水采样点位于池塘排水闸口处,养殖尾水处理系统末端排水采样点位于系统末端闸口处。水样采集依据《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)^[17]实施。采集水样按照国标、行标中对水体主要污染物指标的测定方法检测^[15-16]。

1.3.2 数据整理

4~12月期间,汇总进水源水样8件;东区养殖池塘17个,共检测水样144件,其中暗纹东方鲀当年鱼种养殖塘4个,罗氏沼虾养殖池塘2个,暗纹东方鲀成鱼养殖池塘2个;系统S1水样34件;西区养殖池塘13个,共检测水样72件,其中暗纹东方鲀成鱼养殖池塘2个,非水草种养型中华绒螯蟹养殖池塘6个;系统S2水样19件。试验期间,各评价单元样本件数、水质指标见表4。

表 4 试验期间各水质指标的实测范围及均值浓度

Tab. 4 The measured range and mean concentration of each water quality index during the test mg/L

评价单元 Evaluation unit	范围 Average	COD _{Mn}	TSS	TAN	TN	TP
养殖小区进水源(n=8) Aquafarm inflow	最大值~最小值 平均值	208.4~17.6 98.6	7.87~4.67 6.29	0.421~0.061 0.211	3.392~1.404 2.135	0.639~0.136 0.266
东区池塘排水(n=144) Tail water of D1 ponds	最大值~最小值 平均值	518.2~12.6 102.5	12.29~3.84 7.01	0.829~0.016 0.267	6.790~0.266 2.170	2.825~0.014 0.397
东区尾水处理系统(S1)排水(n=34) Effluent of S1	最大值~最小值 平均值	231.6~17.8 92.9	8.42~4.29 6.60	0.562~0.024 0.192	2.148~0.533 1.341	0.846~0.187 0.330
罗氏沼虾池塘(n=19) <i>Macrobrachium rosenbergii</i> ponds	最大值~最小值 平均值	291.0~27.0 123.4	11.62~5.09 8.48	0.829~0.027 0.271	6.790~1.140 2.868	1.188~0.133 0.589
暗纹东方鲀当年鱼种池塘(n=28) <i>Takifugu obscurus</i> fingerling ponds	最大值~最小值 平均值	236.4~12.6 98.3	10.37~4.80 7.51	0.807~ 0.308	4.845~0.266 2.547	2.825~0.170 0.555
暗纹东方鲀成鱼池塘(n=34) <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	最大值~最小值 平均值	178.0~32.2 104.2	12.00~3.84 6.68	0.678~0.059 0.309	3.850~0.843 2.185	0.927~0.015 0.314
西区池塘排水(n=72) Tail water of D2 ponds	最大值~最小值 平均值	271.8~35.6 121.0	12.03~4.67 8.46	0.685~0.060 0.323	2.634~0.314 1.453	1.147~0.194 0.536
西区尾水处理系统(S2)排水(n=19) Effluent of S2	最大值~最小值 平均值	279.0~16.4 115.5	10.82~5.41 7.33	0.459~0.029 0.173	2.078~0.540 1.093	0.964~0.199 0.406
中华绒螯蟹池塘(非水草型)(n=30) <i>Eriocheir sinensis</i> (without aquatic plant) ponds	最大值~最小值 平均值	423.8~40.0 157.5	13.82~5.54 8.73	0.985~ 0.287	3.375~0.174 1.473	1.733~0.307 0.894
暗纹东方鲀成鱼池塘(n=30) <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	最大值~最小值 平均值	203.0~44.2 104.8	11.52~4.54 7.28	0.762~0.012 0.290	3.427~0.871 1.833	1.057~0.041 0.400

1.4 水质评价方法

1.4.1 单因子水质标识指数

参照文献[7,11-12]对水质标识指数法的应

用,使用参评数据的单因子水质标识指数,表达式如下:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个参评因子的单因子水质标识指数; X_1 为该参评因子所处的水质类别; X_2 为该参评因子在 X_1 类水质标准下限与 X_2 类水质标准上限值变化区间内所处位置。

依据国标、行标建立的 X_1 、 X_2 计算公式如下:

$$X_1, X_2 = a + (C_i - C_{\text{标下}}) / (C_{\text{标上}} - C_{\text{标下}}) \quad (2)$$

$$X_1, X_2 = b + (C_i - C_{\text{标上}}) / C_{\text{标上}} \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 项因子的实测浓度 mg/L; $C_{\text{标上}}$ 为第 i 项因子在水质标准区间的上限, mg/L; $C_{\text{标下}}$ 为第 i 项因子在水质标准区间的下限, mg/L; 当参评因子实测浓度小于等于国标 V 类或行标二级时, 适用计算公式(2); a 为根据监测数据与国标或行标比较而确定的基准值, 当参评因子检测数据小于等于国标类水质标准值时 $a = 1$, 大于 I 类且小于等于 II 类时 $a = 2$, 以此类推 a 最大取值 5; 因行标排放标准分二级, 故对应 a 取值为 1 或 2。

当参评因子实测浓度大于国标 V 类或行标二级时, 适用计算公式(3), 其中国标 $b = 6$, 行标 $b = 3$ 。参照国标计算的 X_1 、 X_2 值, 四舍五入取至 0.1, 参照行标计算的 X_1 、 X_2 值, 因标准级数差少, 为便于分析, 四舍五入取至 0.01。

1.4.2 综合水质标识指数

参照文献[7, 11-12]对水质标识指数法的应用, 使用参评数据的综合水质标识指数 I_{WQ} , 表达式如下:

$$I_{\text{WQ}} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 (X_5) \quad (4)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 依据国标建立的 I_{WQ} 由整数与 3 位小数组成, 依据行标建立的 I_{WQ} 由整数与 4 位小数组成。区别在于国标对应的 X_2 为一位小数, 行标对应的 X_2 为两位小数。(X_5) 为检测水质中主要污染物, 即参评因子中 P_i 最大值对应的单项因子。基于综合水质标识指数分别建立国标、行标的综合水质级别判定标准, 如表 5 所示。

表 5 综合水质级别判定标准

Tab. 5 Comprehensive water quality grade criteria

国标判断标准 ^[15] Judgement standard according to GB3838—2002		行标判断标准 ^[16] Judgement standard according to SC/T9101—2007	
判断依据 Criterion	综合水质级别 Comprehensive water quality grade	判断依据 Criterion	综合水质级别 Comprehensive water quality grade
$1.0 \leq X_1, X_2 \leq 2.0$	I 类	$1.00 \leq X_1, X_2 \leq 2.00$	一级
$2.0 < X_1, X_2 \leq 3.0$	II 类	$2.00 < X_1, X_2 \leq 3.00$	二级
$3.0 < X_1, X_2 \leq 4.0$	III 类	$3.00 < X_1, X_2$	劣二级
$4.0 < X_1, X_2 \leq 5.0$	IV 类		
$5.0 < X_1, X_2 \leq 6.0$	V 类		
$6.0 < X_1, X_2$	劣 V 类		

徐祖信^[11]对 I_{WQ} 指数表达有详尽的解释, 本文依据行标的 I_{WQ} 指数表达解释如下: 如 2.013 0, 整数部分表示综合水质评价级别为行标二级, 第三位小数 3 表示有三项单因子参评指标未达行标二级, 第 4 位小数 0 表示综合水质级别达到行标排放要求级别, 即可推知该区域水质排放要求为行标二级; 如 2.013 1, 第四位小数 1 则表示综合水质级别劣于行标排放要求 1 个级别, 即可推知该区域水质排放要求为行标一级。

1.4.3 水质定性评价依据

水质定性评价包括单因子、综合水质的定性评价以及空间变化定性评价^[12]。依据国标获得的本文参评因子评价结果进行定性评价与空间变化评价, 对国标中未涉及单因子指标, 如 TSS, 则按照行标定性评价。此外, 目前养殖尾水排放

达标的重要参考依据为行标, 故依据行标对养殖排放水进行综合定性评价。

水质定性评价的方法, 参考文献[12]表达如下:

对照水体功能区类别, 对水质定性评价, 分为 4 级: 达标 ($X_4 = 0$)、轻度污染 ($X_4 = 1$)、中度污染 ($X_4 = 2$)、重度污染 ($X_4 \geq 3$)。

空间变化定性评价, 分为基本不变、轻微变化、显著变化, 计算公式如下:

$$I_{(\Delta X_1, X_2)} =$$

$$|(X_1, X_2)_{s1} - (X_1, X_2)_{s2}| / (X_1, X_2)_{s1} \quad (5)$$

式中: $s1$ 、 $s2$ 表示空间间隔的点位, $(X_1, X_2)_{s1}$ 、 $(X_1, X_2)_{s2}$ 为 $s1$ 、 $s2$ 点位的单因子或综合水质标识指数的公式计算部分。

当 $I_{\Delta X_1, X_2} \leq 10\%$ 时, 基本不变, 即水质没有发

生改善(恶化)或略有改善(恶化);当 $10\% < I_{\Delta X_1, X_2} \leq 20\%$ 时,轻微变化,即水质未发生显著改善(恶化);当 $I_{\Delta X_1, X_2} > 20\%$ 时,显著变化,即水质发生显著改善(恶化)。

2 结果

2.1 养殖小区依据国标和行标的水质标识指数

由养殖小区影响养殖效果和周边水域环境的主要单因子水质指标(TSS、 COD_{Mn} 、TAN、TN、TP),依国标和行标获得水质评价结果见表6、表7。

2.2 养殖小区水质定性评价

参照国标定性评价标准,本养殖小区开展的多种水产品养殖活动未对养殖水域环境造成进一步的污染。东区池塘养殖尾水经 S1 处理后,综合水质得到改善($I_{\Delta X_1, X_2} = 13\%$),主要污染物 TN 得到显著改善($I_{\Delta X_1, X_2} = 23\%$);西区池塘养

殖尾水经 S2 处理后,综合水质略有改善($I_{\Delta X_1, X_2} = 9\%$)。养殖小区经 S1、S2 处理后排放水达到或优于养殖小区进水源综合水质的水平。以暗纹东方鲢成鱼池塘与中华绒螯蟹(非水草型)池塘为主的西区养殖池塘对进水源中主要污染物 TN 有非显著改善($I_{\Delta X_1, X_2} = 20\%$)。池塘养殖对进水源中主要污染物 TP 有显著恶化(东区 $I_{\Delta X_1, X_2} = 28\%$,西区 $I_{\Delta X_1, X_2} = 34\%$),即使经 S1、S2 处理的排放水,较进水源 TP 的恶化仅略有改善。

参照行标定性评价标准,本养殖小区进水源与排放水综合水质均为一级排放标准,罗氏沼虾、暗纹东方鲢当年鱼种和中华绒螯蟹(非水草型)池塘的养殖对进水源造成轻度污染,但经尾水处理系统处理后排放水的综合水质级别仍可达一级排放标准。

表6 养殖小区依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的水质评价

Tab. 6 Water quality evaluation of aquafarm according to GB 3838—2002

评价单元 Evaluation unit	参评单因子水质标识指数 P_i value				综合水质标识指数 I_{WQ}
	COD_{Mn}	TAN	TN	TP	
养殖小区进水源 Aquafarm inflow	4.1	2.2	6.1	4.7	4.231(TN)
东区池塘排水 Tail water of D1 ponds	4.3	0.3	6.1	6.0	4.731(TN)
东区尾水处理系统(S1)排水 Effluent of S1	4.1	2.1	4.7	5.3	4.131(TP)
罗氏沼虾池塘 <i>Macrobrachium rosenbergii</i> ponds	4.6	2.3	6.4	6.5	5.031(TP)
暗纹东方鲢当年鱼种池塘 <i>Takifugu obscurus</i> fingerling ponds	4.4	2.5	6.3	6.4	4.931(TP)
暗纹东方鲢成鱼池塘 <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	4.2	2.5	6.1	5.1	4.531(TN)
西区池塘排水 Tail water of D2 ponds	4.6	2.5	4.9	6.3	4.631(TP)
西区尾水处理系统(S2)排水 Effluent of S2	4.3	2.1	4.2	6.0	4.231(TP)
中华绒螯蟹池塘(非水草型) <i>Eriocheir sinensis</i> (without aquatic plant) ponds	4.7	2.4	4.9	7.2	4.831(TP)
暗纹东方鲢成鱼池塘 <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	4.3	2.4	5.7	6.0	4.631(TP)

表7 养殖小区依据《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007)的水质评价

Tab. 7 Water quality evaluation of aquafarm according to SC/T 9101—2007

评价单元 Evaluation unit	参评单因子水质标识指数 P_i value				综合水质 标识指数 I_{WQ}	综合水质 级别 Level of I_{WQ}
	TSS	COD_{Mn}	TN	TP		
养殖小区进水源 Aquafarm inflow	2.97	1.42	1.71	1.53	1.9110(TSS)	I
东区池塘排水 Tail water of D1 ponds	3.03	1.47	1.72	1.79	2.0011(TSS)	I
东区尾水处理系统(S1)排水 Effluent of S1	2.86	1.44	1.45	1.66	1.8510(TSS)	I
罗氏沼虾池塘 <i>Macrobrachium rosenbergii</i> ponds	3.23	1.57	1.96	2.18	2.2321(TSS)	II
暗纹东方鲢当年鱼种池塘 <i>Takifugu obscurus</i> fingerling ponds	2.97	1.50	1.85	2.11	2.1121(TSS)	II
暗纹东方鲢成鱼池塘 <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	3.04	1.45	1.73	1.63	1.9610(TSS)	I
西区池塘排水 Tail water of D2 ponds	3.21	1.56	1.48	2.07	2.0821(TSS)	II
西区尾水处理系统(S2)排水 Effluent of S2	3.15	1.49	1.36	1.81	1.9610(TSS)	I
中华绒螯蟹池塘(非水草型) <i>Eriocheir sinensis</i> (without aquatic plant) ponds	3.57	1.58	1.49	2.79	2.3621(TSS)	II
暗纹东方鲢成鱼池塘 <i>Takifugu obscurus</i> adult fish ponds	3.05	1.49	1.61	1.80	1.9910(TSS)	I

3 讨论

3.1 养殖小区进水源水质污染特征

本养殖小区使用水源位于奉贤区星火农场境内, 国标综合水质评级为Ⅳ类, 劣于国标规定的功能区, 且 COD_{Mn} 、TN、TP 均不符合Ⅲ类标准, 行标综合水质评级为二级排放标准, 这是目前水域环境的现状, 也与取水点地理位置有关, 本取水点位于东西向支流河道最东端, 水交换状况差, 河道末端蓝绿藻聚集是 TSS(2.97), TN(6.1) 成为主要污染物的主要因素。尽管如此, 随着水环境保护意识与治理水平的提高, 郊区河道综合水质状况已得到显著改善。山鹰等^[18] 2012—2013 年采用水质标识指数法分析上海郊区中小河道氮磷指标, TAN 为 6.01, TN 为 6.11, TP 为 4.81, 综合水质标识指数为 5.613, 综合水质级别为Ⅴ类。段婷等^[19] 对 2009—2010 年上海郊区现代农业园水质采用模糊综合评价法调研表明, 水质均属Ⅴ类, 且 TN 为极富程度($\text{TSI}_m = 84.3$)。

本养殖小区综合水质评级虽然为Ⅳ类, 但不能全面反映该区域水质的状况, 该综合水质评级以 4 项水产养殖主要污染物指标为参评指标, 实际国标中对水质评价的指标多达 20 余项, 涉及营养盐、重金属、菌群等多个类别, 因此更准确地对自然水域综合水质评级须由全面的参评指标来完成, 本文仅以影响水产养殖的主要污染物指标综合评价水产养殖对水质的影响。

3.2 养殖小区典型池塘水质污染特征

典型养殖池塘分别包括主养暗纹东方鲀, 罗氏沼虾和非水草种养型中华绒螯蟹池塘, 对各类池塘的主要污染物风险因子评估和发生特征分析, 可为养殖小区调控水质环境提供基础依据。

罗氏沼虾养殖周期内, 与进水源相比, 综合水质未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 19\%$), TAN 和 TN 基本不变($I_{\Delta x_1, x_2} < 10\%$), COD_{Mn} 未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 12\%$), TP 显著恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 38\%$), TSS 水质标识指数由 2.97 升至 3.23, 这说明罗氏沼虾养殖会导致水体 TSS、 COD_{Mn} 、TP 风险性增加, 且 TSS、TP 为潜在主要污染物风险因子。罗氏沼虾密度较大, 底栖爬行使得底泥被搅动, 导致 TSS 增加, 同时底泥中磷大量释放至水体^[20]。因行标排放限值高于国标, TP 仍可处于二级排放标准内, 但当进水本底值较大时, TSS 极易突破行

标二级限值, 造成劣二级排放。

非水草种养型中华绒螯蟹池塘与进水源相比, 综合水质未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 14\%$), TN 有非显著改善($I_{\Delta x_1, x_2} = 20\%$), TAN 基本不变($I_{\Delta x_1, x_2} < 10\%$), COD_{Mn} 未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 15\%$), TP 显著恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 53\%$), TSS 水质标识指数由 2.97 升至 3.57, 说明非水草种养型中华绒螯蟹养殖与罗氏沼虾养殖风险性因子相同, 且 TSS、TP 成为主要污染物的风险等级更高。两种因子的风险特征与罗氏沼虾池塘相似, TSS 恶化程度更大与中华绒螯蟹池塘水位较浅, 影响悬浮物沉降有关^[21], TP 恶化程度更大与中华绒螯蟹钻洞导致更深层次土壤的磷释放有关。非水草种养型中华绒螯蟹池塘养殖, TN 由进水源劣Ⅴ类改善至Ⅳ类, 这与全程使用配合饲料养殖有关。相比鲜活饵料, 配合饲料氮投入少, 支撑中华绒螯蟹生长的氮源, 不仅要从饲料中获得, 当不足时, 还需通过摄食底泥中的有机碎屑获得, 从而使得养殖池塘 TN 减少, 研究^[22] 表明河蟹养殖使用配合饲料可进一步降低污染源。

与进水源相比, 暗纹东方鲀当年鱼种养殖池塘, 综合水质未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 17\%$), COD_{Mn} 、TN 基本不变($I_{\Delta x_1, x_2} < 10\%$), TAN 未显著性恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 14\%$), TP 显著恶化($I_{\Delta x_1, x_2} = 36\%$), TSS 水质标识指数不变, 说明暗纹东方鲀当年鱼种养殖会导致水体 TAN、TP 风险性增加, 由于 TAN 水质标识指数优于Ⅲ类, 且恶化程度小, 在 TN 基本不变的前提下: TAN 的变化可视为正常的微生物作用平衡, 因此, 判断 TP 为潜在主要污染物风险因子。其特征如下: 一是当年鱼种养殖相对密度较高, 暗纹东方鲀为中下层鱼类, 大鱼群游动可能导致池底波浪扰动, 造成底泥磷释放^[23]; 二是鱼类对磷的吸收率低, 饲料中磷利用率低, 进入池塘富集。

综合两区与进水源相比, 暗纹东方鲀成鱼养殖池塘, 综合水质略有恶化, COD_{Mn} 、TN 基本不变, TAN 略有恶化, TP 较当年鱼种养殖恶化程度降低, TSS 水质标识指数略有升高, 至劣二级排放标准, 说明暗纹东方鲀成鱼养殖会导致水体 TSS、TAN、TP 风险性增加, 其中 TAN 风险性评估与当年鱼种相似, TSS 因进水本底值较高, 极易突破行标二级限值, 造成劣二级排放, 故主要污染物风险因子为 TSS、TP。TP 较当年鱼种恶化程度降

低,与养殖密度降低有关,密度降低 70%,个体减少,鱼群活动对底泥扰动作用减少。

综上所述,4 种典型养殖池塘的综合水质恶化程度从低到高依次为:暗纹东方鲀成鱼池塘,非水草种养型中华绒螯蟹池塘,暗纹东方鲀当年鱼种池塘,罗氏沼虾池塘。TP 为 4 类典型养殖池塘共有的主要污染物风险因子,依据国标评价,经养殖活动,可致 1~2 类的水质类别的降级。TSS 为罗氏沼虾、非水草种养型中华绒螯蟹和暗纹东方鲀成鱼池塘的主要污染物风险因子,依据行标评价,经养殖活动,可致排放水劣于二级排放标准。非水草种养型中华绒螯蟹养殖对 TN 有非显著性改善作用。鉴于养殖水环境主要污染物综合水质级别 IV 类,并未达到功能区标准,且行标下限较国标下限宽,因此,从严控制养殖池塘主要污染物风险因子是养殖小区终端排放水实现高于行标一级排放标准、尽可能对地表水减少污染或略改善污染状况的重要前置措施。

3.3 养殖小区水质空间变化评价

东区进水源经池塘养殖发生未显著性恶化 ($I_{\Delta x_1, x_2} = 12\%$),池塘养殖尾水经 S1 净化处理后,获得非显著性改善 ($I_{\Delta x_1, x_2} = 13\%$),排放至自然水域综合水质略好于进水源,表明东区养殖尾水处理系统对养殖尾水综合水质净化发挥重要作用。东区池塘养殖尾水 TP 指数较进水源升高主要由罗氏沼虾与暗纹东方鲀当年鱼种养殖池塘造成,东区池塘养殖尾水经养殖尾水系统处理, TN 显著改善 ($I_{\Delta x_1, x_2} = 23\%$), TSS 劣二级改善为二级,表明养殖尾水处理系统对 TN 去除效果显著,对 TSS 去除效果明显,这与 S1 各净化功能单元内水生植物吸收,附着微生物的硝化、反硝化作用,悬浮颗粒物沉降和梭鱼对有机碎屑(含有机氮)的摄取有关。

西区主要评价单元的综合水质标识指数表现规律与东区相同,西区池塘养殖尾水综合水质较东区略好,这与两区的养殖载荷有关,也与西区非水草种养型中华绒螯蟹池塘对 TN 显著改善有关,虽然西区池塘养殖尾水经 S2 净化后 TN 指数改善度不及东区,但与进水源相比改善更显著,说明养殖池塘对 TN 的控制更有利于排放水体脱氮。在养殖小区中筛选对水体脱氮能力强的经济型水生动物进行混养、套养,或设计合理的层级尾水排放利用方式,如 TN 较高池塘的尾

水排入水体脱氮能力强水生动物养殖塘等,这是今后养殖小区水质调控研究的方向。

西区池塘养殖尾水依据行标,综合水质为二级排放标准,其主要污染物为 TSS(劣二级),因非水草种养型中华绒螯蟹池塘高 TSS 指数(3.57)造成,尽管如此,经西区 S2 净化后,综合水质仍可达一级排放标准,各单因子指标均得到改善。然而,无论东、西两区,对 TSS 都未有改善,主要与养殖小区内大量存在的蓝绿藻有关。物理沉降去除 TSS 的方式^[24]在大型养殖小区中对 TSS 的去除具有局限性,养殖小区的尾水处理系统在对 TSS 的去除工艺上还需进一步改进。

3.4 养殖尾水处理系统工艺流程的特点及优势

本研究构建的 2 个养殖尾水处理系统是在原《上海市标准化水产养殖场建设规范》基础上对原标准化养殖场尾水处理方式进行的一种因地制宜的改造。2 个系统工艺流程的突出特点是在对尾水主要采用湿地、水生植物净化外,增加了水生动植物组合生态净化的核心技术。在运行维护方面,湿地中多年生水生植物需定期收割,净化池塘中一年生水生植物与水生动物每年随池塘养殖周期,一般在 1 月左右干塘清理。

2 个养殖尾水处理系统主要优势表现为:(1)除水生植物种植外,不涉及尾水处理设备技术、生物制剂使用技术等水产从业者非专业领域技术,技术门槛低;(2)利用养殖小区空地构建湿地功能单元,利用已有养殖池塘作为净化池塘,改造基建成本低,基建改造完成后没有基建维修后续费用;无需引进尾水处理设备,省去设备采购、使用、维护成本;(3)以水生动植物作为尾水净化功能体,在尾水净化处理同时,两级净化池塘产出经济水生动植物,实现经济价值产出,摊薄改造和占用养殖小区资源的成本。

4 结论

本淡水养殖小区中,进水源主要污染物为 TN,养殖池塘主要污染物风险因子为 TP、TSS。

池塘养殖尾水经养殖尾水处理系统净化,综合水质得到改善,可达到或优于养殖小区进水源综合水质的水平,排放水综合水质符合《淡水池塘养殖水排放要求》一级排放标准。

以 COD_{Mn} 、TN、TP 为参评因子,对本淡水养殖小区综合水质评价表明,利用养殖尾水处

理系统对水产养殖尾水实施净化处理,经处理后的排放水未对临近自然水域环境造成负面影响,还略有改善作用。

参考文献:

- [1] 罗国芝. 水产养殖用水可重复利用性评估指标及相关标准分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 748-755.
LUO G Z. The evaluation parameters and criteria of the reuse possibilities of aquaculture water[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 748-755.
- [2] 张饮江, 张筱, 程梦雨, 等. 人工湿地处理滨海养殖水效果及机理[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 643-650.
ZHANG Y J, ZHANG X, CHENG M Y, et al. Improving performance and removal mechanism of coastal aquaculture water by constructed wetlands [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(5): 643-650.
- [3] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. Aquaculture, 2002, 209(1/4): 169-184.
- [4] 黄翔峰, 王坤, 陈国鑫, 等. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 12-20.
HUANG X F, WANG K, CHEN G X, et al. Typical pollutants removal efficiency from aquaculture wastewater by using constructed wetlands [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 12-20.
- [5] 顾兆俊, 刘兴国, 程果锋, 等. 生态沟渠在淡水池塘养殖废水治理中的作用及构建技术[J]. 科技创新与应用, 2019(26): 127-132.
GUN Z J, LIU X G, CHENG G F, et al. Functions and construction techniques of ecological ditch in waste water treatment of freshwater pond culture [J]. Technology Innovation and Application, 2019(26): 127-132.
- [6] 臧维玲, 侯文杰, 戴习林, 等. 室内集约化养虾池以低频率运转水处理系统调控水质效果及氮磷收支[J]. 水产学报, 2013, 37(11): 1670-1678.
ZANG W L, HOU W J, DAI X L, et al. Effect of regulating-controlling water quality by water recycling-treating system at low frequency and nutrient budgets for indoor intensive shrimp aquaculture[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(11): 1670-1678.
- [7] 杨柳, 宋健飞, 宋波, 等. 主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(11): 239-245.
YANG L, SONG J F, SONG B, et al. Primary pollutant water quality identification index method and its application to comprehensive evaluation of river water quality [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(11): 239-245.
- [8] 周梅, 李政, 凌海波, 等. 基于BP神经网络的义水河水环境质量评价研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S1): 385-388, 435.
ZHOU M, LI Z, LING H B, et al. Research on water quality evaluation in Yishui River based on BP neural networks[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(S1): 385-388, 435.
- [9] LERMONTOV A, YOKOYAMA L, LERMONTOV M, et al. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1188-1197.
- [10] IP W C, HU B Q, WONG H, et al. Applications of rough set theory to river environment quality evaluation in China[J]. Water Resources, 2007, 34(4): 459-470.
- [11] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 482-488.
XU Z X. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4): 482-488.
- [12] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 186-192.
HU C, SU D. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 186-192.
- [13] 郭劲松, 龙腾锐, 霍国友, 等. 四种水质综合评价方法的比较[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(4): 6-12.
GUO J S, LONG T R, HUO G Y, et al. A comparison of four methods of water quality assessment [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(4): 6-12.
- [14] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733.
YIN H L, XU Z X. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733.
- [15] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] 中华人民共和国农业部. SC/T 9101—2007 淡水池塘养殖水排放要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9101 - 2007 Requirement for water discharge from freshwater aquaculture pond [S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. HJ 494—2009 水质采样技术指导[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 494 - 2009 Water quality-Guidance on sampling techniques[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [18] 山鹰, 张玮, 李典宝, 等. 上海市不同区县中小河道氮磷污染特征[J]. 生态学报, 2013, 35(15): 5239-5247.
SHAN Y, ZHANG W, LI D B, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in medium and small rivers of Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 35(15): 5239-5247.
- [19] 段婷, 张饮江, 文晓峰, 等. 上海郊区现代农业园区水质污染现状评价与分析[C]//2013 中国环境科学学会学术年会. 昆明, 2013: 3040-3045.
DUAN T, ZHANG Y J, WEN X F, et al. Evaluation and analysis of water pollution in modern agricultural parks in Shanghai suburb [C]//Chinese Society for Environmental Science Annual Conference 2013 Excellent Papers Collection. Kunming, 2013: 3040-3045.
- [20] 彭剑峰, 王宝贞, 南军, 等. 多级生态塘/湿地系统底泥中磷的归趋模式[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 712-716.
PENG J F, WANG B Z, NAN J, et al. Transferring and attribution model of phosphorus in the multi-stage eco-ponds/wetlands system sediment[J]. China Environmental Science, 2004, 24(6): 712-716.
- [21] 顾杰, 冒小丹, 匡翠萍, 等. 间歇性波浪扰动下河口底泥中磷释放特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(6): 751-759.
GU J, MAO X D, KUANG C P, et al. Study on characteristics of phosphorus release from estuarine bed sediments under intermittent wave disturbance[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(6): 751-759.
- [22] 戴修赢, 蔡春芳, 徐升宝, 等. 饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷收支和污染强度的影响[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(3): 52-56.
DAI X Y, CAI C F, XU S B, et al. Effects of food composition on nitrogen and phosphorus budgets and pollution intensity in Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) culture pond[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(3): 52-56.
- [23] 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.
YUAN X C, SHI Y H, LIU Y S. Study on the pattern of free sedimentation of pond wastewater and the change of three-state nitrogen, total nitrogen and total phosphorus [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(4): 56-62.
- [24] 严峻, 章霞, 李伟业, 等. 对虾大棚养殖废水悬浮物静沉降效果初步研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2017, 36(2): 186-189.
YAN J, ZHANG X, LI W Y, et al. A preliminary study of the static settling effect on suspended solids of prawn greenhouse aquaculture waste water[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2017, 36(2): 186-189.

Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system

XU Jiabo, LIU Yongshi, SHI Yonghai, YUAN Xincheng, WANG Jianjun, LIU Jianzhong

(Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai 200433, China)

Abstract: The water quality identification index method was used to evaluate and analyze the comprehensive water quality of the inflow, aquaculture tail water and the discharge water from aquaculture tail water treatment system in the freshwater aquafarm. Total solid suspended matter (TSS), organic matter (COD_{Mn}), total ammonia nitrogen (TAN), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were taken as single factor evaluation indexes and comprehensive evaluation indexes. The comprehensive water quality was evaluated and analyzed according to Environmental Quality Standard for Surface water (GB 3838 – 2002) or Requirement for Water Discharge from Freshwater Aquaculture Pond (SC/T 9101 – 2007). Research indicated that: TN was the main pollutant in the inflow of the aquafarm. TP and TSS were the key risk factors of pollutants in the ponds. Aquaculture tail water treatment system played an important role in the integrated water quality purification of aquaculture tail water. After the eastern pond tail water was treated by the aquaculture tail water treatment system (S1), the comprehensive water quality was improved ($I_{\Delta x_1, x_2} = 13\%$), and the main pollutant TN was significantly improved ($I_{\Delta x_1, x_2} = 23\%$). After the western pond tail water was treated by the aquaculture tail water treatment system (S2), the comprehensive water quality was slightly improved ($I_{\Delta x_1, x_2} = 9\%$). The comprehensive water quality of the discharge water was equal to or better than that of the inflow in the aquafarm by aquaculture tail water treatment system to purify aquaculture tail water, and it met the first-level discharge standard of SC/T 9101 – 2007, and had no negative impact on the environment of adjacent natural waters, but also had a slight improvement effect.

Key words: concentrated continuous pond; aquaculture tail water treatment system; water quality identification index method; water quality evaluation; standardized discharge