

## 海水人工湿地对梭鱼室内越冬养殖废水的净化效果

徐嘉波, 施永海\*, 刘永士, 张海明, 陆根海, 刘建忠, 邓平平, 张宗锋

(上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站, 上海 200433)

**摘要:** 为开发海水低温环境下人工湿地在水产养殖上的应用, 研究人工湿地在海水环境下对梭鱼亲本室内越冬养殖废水的处理效果和净化效能。海水 (16.8%~19.6%) 人工湿地对室内越冬养殖废水的净化效果: 总凯氏氮去除率为 13.4%, 总氨氮为 32.1%, 亚硝氮为 33.1%, 浊度为 55.1%, COD 为 35.6%, 总磷为 34.6%。越冬期间养殖池水质稳定。低温对总凯氏氮和三态氮的去除率有一定影响, 并制约人工湿地脱氮过程; 对浊度、COD、总磷去除率影响并不明显。海水人工湿地能维持连续运转并保持越冬养殖池的水质稳定。养殖负载量、越冬期间水力负荷尚有提升空间。

**关键词:** 人工湿地; 养殖废水; 循环水越冬养殖系统; 净化效果; 去除率; 梭鱼

中图分类号: S959

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)03-0395-06

### Effects of purification of wastewater from indoor recirculating overwinter *Chelon haematocheilus* aquaculture system in seawater constructed wetland

XU Jiabo, SHI Yonghai, LIU Yongshi, ZHANG Haiming, LU Genhai,

LIU Jianzhong, DENG Pingping, ZHANG Zongfeng

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

**Abstract:** To develop constructed wetland in the application of aquaculture under condition of seawater and low temperature, the purification effects of *Chelon haematocheilus* parents in the indoor recirculating overwinter aquaculture system combined with seawater wastewater constructed wetland were investigated. The results showed that the removal rates of total Kjeldahl nitrogen, total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, turbidity, chemical oxygen demand and total phosphorous in system were 13.4%, 32.1%, 33.1%, 55.1%, 35.6%, and 34.6%, respectively. Various water quality parameters in the culture tanks were stable. Low temperature had a certain influence on the removal rate of total Kjeldahl nitrogen, total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, and nitrate nitrogen, which restricted denitrification process in the constructed wetland. Low temperature had unobvious influence on the removal rate of turbidity, chemical oxygen demand, and total phosphorus. Seawater constructed wetland can handle wastewater from the recirculating overwinter aquaculture system continuously, and keep water quality in the culture tanks stable. There is more potential to improve aquaculture load and hydraulic loading rate during overwinter aquaculture.

**Key words:** constructed wetland; wastewater; recirculating overwinter aquaculture system; purifying effect; removal percentage; *Chelon haematocheilus*

近年来,随着环境保护意识的加强以及受干旱、污染等自然条件的约束,集约化和生态化养殖技术不断发展<sup>[1]</sup>。人工湿地作为一种有效的水处理技术在水产养殖业已得到广泛的应用<sup>[2-3]</sup>,人工湿地的净

化方式包括过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物代谢等,通过物理、化学和生物的协同作用,有效去除污水中的悬浮固体、有机物、氮、磷等养殖水体产生的污染物<sup>[4-5]</sup>。与常规循环水处理

收稿日期: 2013-12-12

基金项目: 上海市科学技术委员会 (09ZR1429000, 沪农科攻字 (2012) 第 1-6 号) 和上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心 (ZF1206) 共同资助。

作者简介: 徐嘉波, 工程师。E-mail: shxujiabo@gmail.com

\* 通信作者: 施永海, 高级工程师。E-mail: yonghais@163.com

系统中高能耗的设备运行以及高维护保养费用相比,人工湿地具有造价低、耗能低、维护方便的优势<sup>[6-7]</sup>。

研究证实人工湿地能够有效去除水产养殖系统中主要污染物,如:虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[8]</sup>、斑点叉尾鮰(*Ictalurus pilnctatilis*)<sup>[6]</sup>等。以上有关人工湿地在水产系统中的研究主要集中在气温较高的季节,对于冬及初春低温季节,湿地植物出现枯萎和休眠现象,根系微生物代谢减缓这些因素致使人工湿地对养殖废水处理效果的研究报道甚少,仅有施永海等<sup>[9]</sup>研究了半咸水人工湿地净化越冬养殖循环水的效果,陶玲等<sup>[10]</sup>研究了人工湿地冬季净化池塘养殖废水的效果。人工湿地应用于水产越冬养殖有利于提高人工湿地利用率,也是发展基于人工湿地集约化生态化水产养殖的必然趋势。此外,目前对人工湿地的研究主要是在淡水、半咸水环境下进行的,有关海水环境下的研究甚少,盐度会影响人工湿地对养殖废水的净化能效<sup>[11]</sup>。本文研究了盐度 16.8‰~19.6‰条件下,人工湿地在梭鱼越冬养殖过程中的处理效能,以期为基于海水环境下人工湿地低温条件下在水产养殖系统中的应用提供技术支持。

### 1 材料与方法

#### 1.1 海水人工湿地循环水室内越冬养殖系统

本循环水室内越冬养殖系统(图1)是由2个水泥养殖池(19.40 m×10.30 m×1.50 m, 199.8 m<sup>2</sup>·池<sup>-1</sup>)、1个复合垂直流人工湿地(IVF, W1; 19.40 m×1.10 m×1.68 m; 21.3 m<sup>2</sup>) (图2a)<sup>[9]</sup>、5个复合水平流人工湿地(IHF, W2-6; 19.40 m×2.06 m×0.90 m; 39.96 m<sup>2</sup>·池<sup>-1</sup>) (图2b)<sup>[9]</sup>以及一套供气设备组成,湿地和养殖池总面积分别为 221.0 m<sup>2</sup>和 399.6 m<sup>2</sup>,面积比为 1:1.81,湿地空隙率为 0.55。养殖池和人工湿地的主体为混砖结构,采用聚氯乙烯(PVC)管连接各组件。IHF 末端出水口建造一个集水池(1.00 m×2.06 m×0.90 m)。为避免植物生长产生绝对优势,W2和W4种植芦苇(*Phragmites australis*),W3和W5种植互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel),W6种植海三菱(*Scirpus mariqueter*),栽种方式见 Shi 等<sup>[12]</sup>,湿地植物栽种于 2010 年 3-4 月,至本研究开展已经历 2 年多,植物密度高峰时期超过 100 株·m<sup>-2</sup>,冬季基本枯萎,来年再发新芽,历次研究证明该湿地在高温季节表现为成熟湿地,具有良好的养殖废水处理效果<sup>[1,9]</sup>。湿地及养殖池上方覆盖透光尼龙薄膜。水泥养殖池

采用气泵充氧供气,气石密度为 0.5 个·m<sup>-2</sup>,IHF 出水口的集水池内(图1所示 d 处)增设气石曝气,以补偿养殖废水通过湿地损失的氧气,增加水体的溶解氧水平。循环水越冬养殖系统内水流方式为采用 2 寸水泵(750 W)抽提集水池经净化处理的海水泵入水泥养殖池(图1所示 a 处),水泥养殖池进水口架设在水面,并经水泥养殖池出水口设置的 PVC 限水位出水管(图1所示 b 处)利用水位差回流至 IVF 进水口(图1所示 c 处),循环水依次流经 IVF、IHF 的水流方向见图 2。为研究流量对养殖池水质的影响,中 2、西 2 分别设置不同进水流量,人工湿地运行状况见表 1。

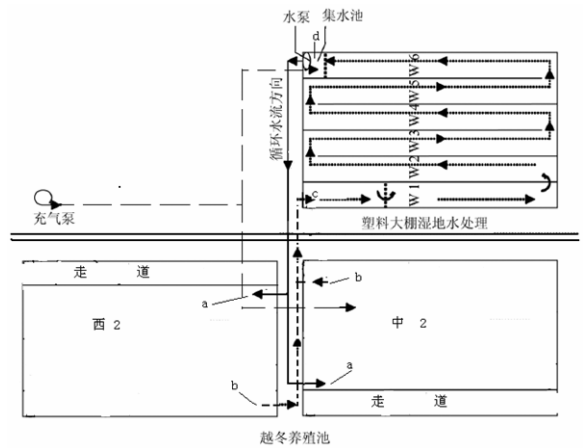


图 1 循环水越冬养殖系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of recirculating overwinter aquaculture system

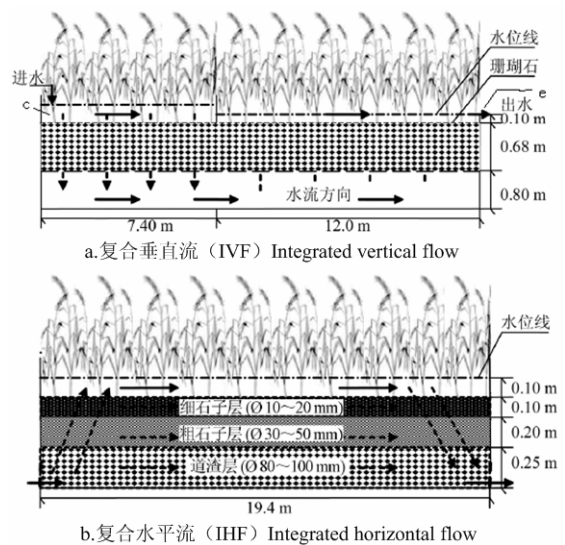


图 2 人工湿地结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of integrated vertical-flow (IVF) constructed wetland and integrated horizontal-flow (IHF) constructed wetland

## 1.2 梭鱼越冬养殖管理

试验用梭鱼来自上海市水产研究所苗种技术中心池塘养殖 2~3 龄梭鱼亲本, 中 2、西 2 各投放 100 kg, 分别为 31 尾、33 尾。放养日期为 12 月 24 日、25 日, 起捕日期为次年 4 月 22 日, 成活率 95%。试验用水为经盐卤调配的海水。梭鱼越冬期间, 饵料投喂总量为 50 kg·池<sup>-1</sup>, 不换水, 不吸污。

## 1.3 水质检测

每 2 周对以下检测点: 水泥养殖池、IVF 进水口 (图 2 所示 c 处) 和出水口 (图 2 所示 e 处) 以及 IHF 出水口 (图 1 所示 d 处) 进行水质检测, 每次取样时间上午 9:00。测定水样盐度、pH、DO、浊度、总氨氮 (TAN)、亚硝氮 (NO<sub>2</sub>-N)、硝态氮 (NO<sub>3</sub>-N)、总凯氏氮 (TKN)、总磷 (TP) 和 COD。

水温为每日上下午各测 1 次, 连续监测。pH 采用 YSI-100 (Yellow Spring, 美国); DO 和水温采用 YSI-58 (Yellow Spring, 美国); 盐度采用 YSI-30 (Yellow Spring, 美国); 浊度采用哈希 2100 浊度仪; TAN 采用水杨酸-次氯酸盐光度法; NO<sub>2</sub>-N 采用重氮偶氮比色法; NO<sub>3</sub>-N 采用铋镉还原-重氮偶氮法; TKN 采用凯氏定氮法; TP 采用过硫酸钾硝解法; COD 采用碱性高锰酸钾法。

## 1.4 数据处理

所有数据用 Mean±SD 表示, 采用 Excel 和 SPSS 19.0 处理数据及图表。用独立样本 *t* 检验来比较湿地的净化效能和不同流量下养殖池的水质, 以 *P*<0.05 为差异显著。

表 1 人工湿地和水泥养殖池运行的水力情况

Table 1 Hydraulic conditions for operating constructed wetland system and culture ponds

运行时段 Operation period	湿地流量/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> Flow wetland	湿地水力负荷/m·d <sup>-1</sup> Hydraulic loading rate of constructed wetland	中 2 流量/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> Flow of No.center 2	西 2 流量/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> Flow of No.west 2
12/27-01/08	52.8	0.239	36.0	16.8
01/09-01/23	52.6	0.238	35.8	16.8
01/24-02/15	52.6	0.238	35.8	16.8
02/16-03/05	52.6	0.238	35.8	16.8
03/06-03/20	50.6	0.229	35.0	15.6
03/21-04/07	47.8	0.216	33.6	14.2
04/08-04/22	47.8	0.216	33.6	14.2

## 2 结果与分析

### 2.1 人工湿地净化效果

盐度 16.8‰~19.6‰条件下, 冬季及初春人工湿地对梭鱼亲鱼养殖池废水处理效果良好。主要污

染物去除率分别为: 浊度, 55.1%; TAN, 32.1%; NO<sub>2</sub>-N, 33.1%; TKN, 13.4%; TP, 34.6%; COD, 35.6% (表 2)。TKN、TAN、NO<sub>2</sub>-N 的去除率低于夏季同一湿地, NO<sub>3</sub>-N 出现富集现象, TP、COD、浊度的去除率与夏季同一湿地接近<sup>[1,12-13]</sup>。

表 2 人工湿地处理室内越冬养殖废水的效果

Table 2 Removal rates during monitoring period (*n*=7)

参数 Parameter	IVF 进水口	IVF 出水口	IHF 出水口	百分去除率均值/% Average of removal percentage		
				IVF	IHF	整个湿地 The whole wetland
T/°C	11.6±2.7	11.8±2.6	12.0±2.9	-	-	-
pH	8.16±0.11	8.26±0.14	7.85±0.20	-	4.9	3.8
DO/mg·L <sup>-1</sup>	10.57± 1.57	11.36± 1.17	9.92± 1.81	-	12.6	6.1
S/‰	17.4±0.9	17.6±0.8	17.5±0.7	-	-	-
浊度/NTU	4.23±2.72	4.83±2.78	1.90±0.74	-	60.7	55.1
TAN/mg·L <sup>-1</sup>	0.023±0.021	0.020±0.009	0.016±0.009	15.1	20.0	32.1
NO <sub>2</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.006±0.003	0.007±0.004	0.004±0.001	-	46.3	33.1
NO <sub>3</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.065±0.079	0.060±0.081	0.089±0.083	7.1	-	-
TKN/mg·L <sup>-1</sup>	2.36±0.81	2.38±0.77	2.05±0.66	-	14.0	13.4
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.165±0.091	0.160±0.071	0.108±0.018	3.1	32.5	34.6
COD/mg·L <sup>-1</sup>	10.69±3.20	10.61±2.56	6.89±0.79	0.7	35.1	35.6

**2.1.1 水温** 越冬期间采用透光尼龙薄膜覆盖人工湿地和养殖池,对循环养殖水具有增温和保温作用<sup>[1,9]</sup>。人工湿地内水温变化范围为 8.4~18.5℃,这一温度条件下,可避免极寒影响人工湿地,保证人工湿地的运行效果。越冬期间,梭鱼活力良好,能少量摄食。

**2.1.2 pH** 循环水经过 IVF, pH 略有升高( $P>0.05$ ),经过 IHF 明显下降( $P<0.05$ ),经过整个湿地也表现为明显下降( $P<0.05$ )。目前,大多数研究结果表明,养殖废水经过人工湿地后 pH 表现为不同程度的下降<sup>[6-7,10]</sup>,亦有部分研究获得相反的结果<sup>[9,13]</sup>,主要

与硝化作用、湿地植物生长状况、反硝化作用与湿地基质化学性质等有关<sup>[9,13]</sup>,而温度又能影响上述因素的变化。本研究中, pH 下降具有显著的季节特征,低温条件下,水体藻类浓度较低,光合作用不明显,溶解在水中的二氧化碳转化不多,此外,温度对反硝化作用的影响比对其他废水生物处理过程的影响要大,低于 10℃ 时反硝化速率明显下降<sup>[14]</sup>,而在植物腐败产生的酸性物质以及硝化作用产生的氢离子作用下,循环水流经人工湿地后 pH 下降明显。

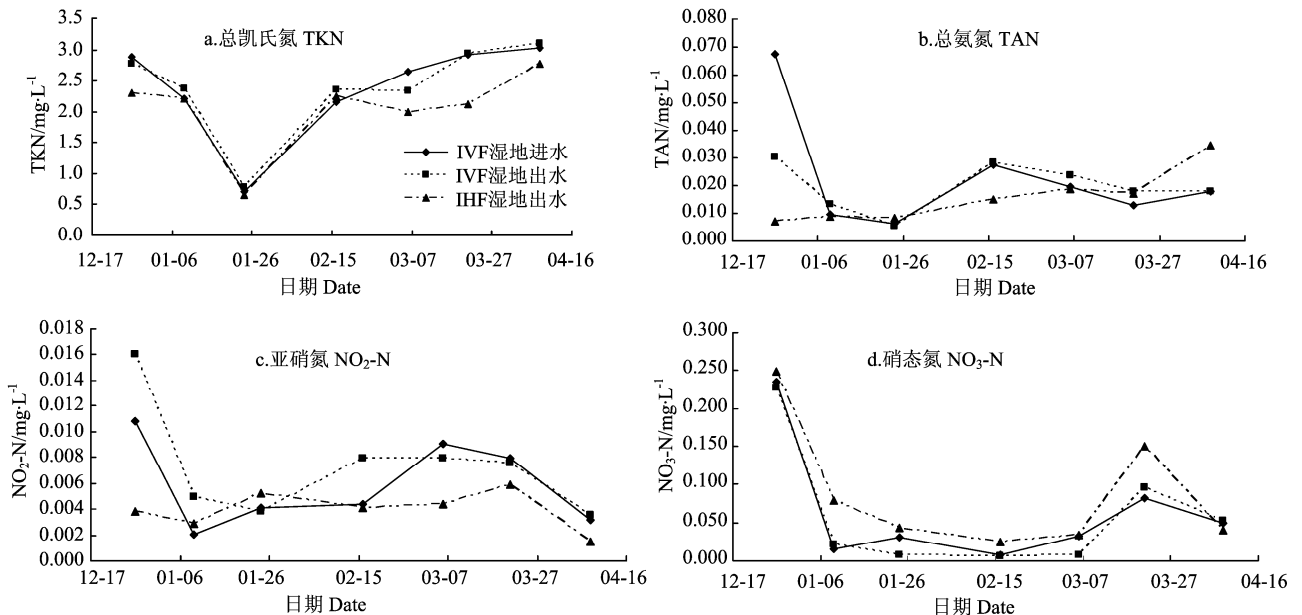


图 3 循环水室内越冬养殖系统中各检测点 TKN、TAN、NO<sub>2</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-N 随时间的变化过程

Figure 3 Time courses of total Kjeldahl nitrogen (TKN), total ammonia nitrogen (TAN), nitrite nitrogen (NO<sub>2</sub>-N), and nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub>-N) at various sampling positions in indoor recirculating overwinter aquaculture system

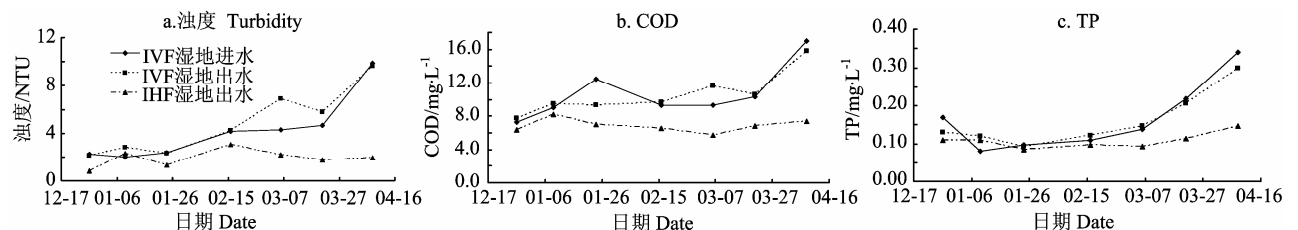


图 4 循环水室内越冬养殖系统中各检测点浊度、COD 和 TP 随时间的变化

Figure 4 Time courses of turbidity, COD, and TP at various sampling positions in recirculating overwinter aquaculture system

**2.1.3 DO** 循环水经过 IVF, DO 略有升高 ( $P>0.05$ ), 经过 IHF 下降 ( $P>0.05$ ), 经过整个湿地也表现下降 ( $P>0.05$ )。Kickuth<sup>[15]</sup>和宋志文等<sup>[16]</sup>的研究表明,有机物降解和氨等物质的转化过程中需要消耗水中溶解氧,溶解氧对湿地的净化作用有重要的影响。本研究中,由于长期处于低温状态,参与

降解和转化过程的微生物活力下降,导致该过程溶解氧需求并不高。循环水利用水位差由 IVF 流入 IHF 过程中增加了空气与水接触面以及人工湿地集水池增设的气石曝气使得 DO 维持较高水平,接近饱和状态。

**2.1.4 总氮与三态氮的去除** 循环水经过整个湿地

NO<sub>2</sub>-N 明显下降, TAN、NO<sub>3</sub>-N、TKN 未有明显变化, 其中 TAN、TKN 略有下降, 而 NO<sub>3</sub>-N 略有升高(表 2 和图 3)。研究期间, 养殖水体三态氮与总凯氏氮维持在极低水平, 这与系统中负载量低有关, 其中: TAN 变化范围为 0.006~0.067 mg·L<sup>-1</sup>; NO<sub>2</sub>-N 变化范围为 0.001~0.018 mg·L<sup>-1</sup>; NO<sub>3</sub>-N 变化范围为 0.007~0.293 mg·L<sup>-1</sup>; TKN 变化范围为 0.066~3.347 mg·L<sup>-1</sup>。TKN 为有机氮与 TAN 的总和, 有机氮的去除对湿地的除氮性能起着关键作用<sup>[17]</sup>, 低温条件下微生物酶活性受抑制, 氨化作用将有机氮转化为氨氮的过程受影响<sup>[18]</sup>, 而湿地脱氮方式主要包括: 植物吸收、有机质的积累与降解和氮素在沉积物中的循环<sup>[19]</sup>。本研究中整个湿地有机氮的平均去除率仅为 13.2%, 综合冬季植物枯萎腐败、养殖池负载量等因素的分析, 低温条件(10~12℃)将制约人工湿地的脱氮过程。为避免氮素在系统中的富集导致碳氮比的降低进而影响反硝化作用等一系列负效应的发生, 较为有效的应对措施为合理控制养殖水体负载量, 增加水力停留时间。TAN 和 NO<sub>2</sub>-N 的去除主要是通过硝化作用<sup>[20]</sup>, 本研究中系统 TAN 和 NO<sub>2</sub>-N 维持低水平, 而整个湿地 TAN 平均去除率为 32.1%, NO<sub>2</sub>-N 平均去除率为 33.1%, 一方面表明人工湿地在 DO 接近饱和状态下(IVF 进水口 DO: 10.57 mg·L<sup>-1</sup>±1.57 mg·L<sup>-1</sup>; IHF 出水口 DO: 9.92 mg·L<sup>-1</sup>±1.81 mg·L<sup>-1</sup>)硝化作用相对比较完全, 另一方面也说明低温导致硝化作用减弱。次年开春后, 人工湿地中 TAN 出现 IHF 出水口高于 IVF 进水口的现象, 这可能与植物彻底腐败, 基质层理化环境变化导致的硝化细菌数量大幅较少有关。NO<sub>3</sub>-N 的去除通过反硝化作用完成, 温度、碳氮比对反硝化作用有影响<sup>[14, 21]</sup>, 低温条件下反硝化细菌活力下降, 仅依靠植物腐败提供的碳源导致碳氮比降低, 两者共同作用导致本研究中 NO<sub>3</sub>-N 出现富集现象, 这一现象与施永海等<sup>[9]</sup>和 Sindilariu 等<sup>[8]</sup>研究结果相似。至开春后, 随温度的升高, 反硝化作用不断增强, 系统逐渐恢复对 NO<sub>3</sub>-N 的去除(去除率 18.62%, 2013 年 4 月 8 日)。此外, 氮素在湿地流出水中的种类分析对于水环境质量具有重要意义, 以氧化态(如 NO<sub>3</sub>-N)形式排出有利于水质提高<sup>[17]</sup>, 本研究中 NO<sub>3</sub>-N 在 IHF 出水口与 IVF 进水口中所占百分比环比提高 34%, 而 TAN 在 IHF 出水口与 IVF 进水口中所占百分比环比下降 22%。综上所述, 低温(10~12℃)、海水(16.8‰~19.6‰)条件下, 人工湿地依然具有中等水平的脱氮能力, 系统中水环境质量得到一定程度的改善。

**2.1.5 浊度、COD 和 TP 的去除** 浊度、COD 的去除具有相似性, 循环水经过 IVF, 浊度、COD 均略有升高( $P>0.05$ ), 经过 IHF 均明显下降( $P<0.05$ ), 经过整个湿地也表现为明显下降( $P<0.05$ ) (表 2, 图 4a、b)。浊度的去除主要包括基质的过滤、沉积和吸附等物理作用, COD 的去除包括基质的截留和微生物的分解<sup>[22]</sup>。研究阶段内, 整个湿地浊度、COD 去除率均表现为不断升高, 而湿地出水浊度、COD 变化较为稳定(浊度: 1~3 NTU; COD: 6~8 mg·L<sup>-1</sup>), 这说明浊度的去除与基质的过滤、沉积有关, 此外低温状态下也有利于有机颗粒物、胶体物质等的絮凝, 低负载量也有利于上述物质的分解和转化并从系统中脱去; 基质的截留对 COD 的去除起主要作用, 低温条件下微生物的分解作用并不活跃, 且不占主导。TP 的去除主要通过填料的物理化学作用<sup>[23]</sup>。本研究中, TP 的去除规律与浊度、COD 相似, 且后期去除率明显高于前期, 表明这三者的主要影响因素为基质, 基质在低温条件下对三者的去除发挥重要作用(表 2、图 4c)。此外, 与以往同期对 TP 去除率(18.4%, HLR: 0.676 m·d<sup>-1</sup>)的研究相比<sup>[9]</sup>, 低水力负荷(0.216~0.239 m·d<sup>-1</sup>)条件下, 能提高人工湿地对 TP 的去除效果。

表 3 室内越冬养殖池水质

Table 3 Water quality during monitoring period ( $n=7$ )

参数 Parameter	中 2 No.center 2	西 2 No.west 2
T/℃	11.9±2.6	11.7±2.8
pH	8.28±0.18	8.34±0.17
DO/mg·L <sup>-1</sup>	12.07±1.38	12.06±1.21
S/‰	17.5±1.0	17.7±0.5
浊度/NTU	4.06±1.35	5.62±3.47
TAN/mg·L <sup>-1</sup>	0.024±0.011	0.016±0.009
NO <sub>2</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.008±0.004	0.007±0.006
NO <sub>3</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.071±0.055	0.066±0.102
TKN/mg·L <sup>-1</sup>	2.39±0.77	2.54±0.89
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.147±0.052	0.168±0.097
COD/mg·L <sup>-1</sup>	8.69±2.07	11.03±2.71

## 2.2 养殖池水质

研究期间, 因低温以及系统负载量较低, 养殖池水质表现稳定, 且均维持在较低范围内(表 3), 良好的水质表现与本研究中低养殖负载量相关。不同流量循环处理下的中 2、西 2 主要污染物水质指标(TAN、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TKN、TP、COD、浊度)均无显著差异( $P>0.05$ ), 高流量循环处理的

中 2 水质略优于低流量循环处理的西 2, 说明在适宜的负载范围内, 适当提高水力负荷并不会对室内越冬过程中养殖池水质产生较大影响, 室内越冬期间适宜的水力负荷有待今后进一步研究。

### 3 结论

海水 (16.8‰~19.6‰) 条件下, 人工湿地对室内越冬养殖废水主要污染物去除率分别为: 浊度, 55.1%; TAN, 32.1%; NO<sub>2</sub>-N, 33.1%; TKN, 13.4%; TP, 34.6%; COD, 35.6%。海水人工湿地能维持连续运转并保持室内越冬养殖池的水质稳定。养殖负载量、越冬期间水力负荷尚有提升空间。

湿地对总凯氏氮和三态氮的去除率受到低温的影响, 低温制约人工湿地对水体的脱氮作用; 反硝化作用减弱致使硝态氮富集; 低温的影响对人工湿地中浊度、COD、总磷的去除不明显。

### 参考文献:

- [1] 徐嘉波, 施永海, 张根玉, 等. 复合水平流人工湿地对氮和有机污染物的去除效果和动态变化[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 875-880.
- [2] Sindilariu P D, Wolter C, Reiter R. Constructed wetlands as a treatment method for effluents from intensive trout farms[J]. Aquaculture, 2008, 277: 179-184.
- [3] Lin Y F, Jing, S R, Lee D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate[J]. Environmental Pollution, 2005, 134: 411-421.
- [4] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries-A review[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 545-560.
- [5] Volodymyr T, Sirajuddin A, Viktor P. Modelling constructed wetland treatment system performance[J]. Ecological Modelling, 2007, 05(3/4): 355-364.
- [6] 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 129-133.
- [7] 于涛, 成水平, 贺锋, 等. 基于复合垂直流人工湿地的循环水产养殖系统净化养殖效能与参数优化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 188-193.
- [8] Sindilariu P D, Schulz C, Reiter R. Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland[J]. Aquaculture, 2007, 270(1/2/3/4): 92-104.
- [9] 施永海, 张根玉, 刘建忠, 等. 半咸水人工湿地净化越冬养殖循环水的效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 179-187.
- [10] 陶玲, 李谷, 袁龙义, 等. 人工湿地冬季净化减排水产养殖废水效果[J]. 淡水渔业, 2009, 39(4): 59-62.
- [11] Lymbery A J, Doupe R G, Thomas B, et al. Efficacy of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(1): 1-7.
- [12] Shi Y H, Zhang G Y, Liu J Z, et al. Performance of a constructed wetland in treating brackish wastewater from commercial recirculating and super-intensive shrimp growout systems[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20): 9416-9424.
- [13] XU J B, Shi Y H, Zhang G Y, et al. Effect of hydraulic loading rate on the efficiency of effluent treatment in a recirculating puffer aquaculture system coupled with constructed Wetlands[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(2): 1-7.
- [14] 徐亚同. pH 值、温度对反硝化作用的影响[J]. 中国环境科学, 1994, 14(4): 308-313.
- [15] Kickuth R. Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewater by plant rhizosphere under limnic conditions[C]// Utilization of manure by land spreading. London: Commission of the European Communities, 1977: 335-343.
- [16] 宋志文, 王仁卿, 席俊秀, 等. 人工湿地对氮、磷的去除效率与动态特征[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 648-651.
- [17] 于海霞, 于江华, 徐礼强, 等. 复合型人工湿地脱氮效能及其水力负荷影响规律[J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3357-3362.
- [18] 杨旭, 于水利, 张洪洋, 等. 潜流人工湿地低温下黄河原水预处理效果研究[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 70-73.
- [19] Romeroj A, Comin F A, Garcia C. Restored wetlands as filters to remove nitrogen[J]. Chemosphere, 1999, 39(2): 323-332.
- [20] 雒维国, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 37-40.
- [21] 王丽丽, 赵林, 谭欣, 等. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. 环境保护科学, 2004, 30(1): 15-18.
- [22] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正. 垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2166-2171.
- [23] 杜刚, 黄磊, 鲁言言, 等. 处理微污染河水的人工湿地中磷的去除特征及吸附形态分布[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 511-517.