

固液分离塔-垂直流人工湿地技术处理池塘圈养尾水的应用研究

周小荻 李金能 王洁 贾智明 何绪刚 侯杰

APPLICATION STUDY OF SOLID-LIQUID SEPARATION TOWER COUPLED VERTICAL FLOW  
CONSTRUCTED WETLAND IN POND-CULTIVATED TAILWATER

ZHOU Xiao-Di, LI Jin-Neng, WANG Jie, JIA Zhi-Ming, HE Xu-Gang, HOU Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响

THE IMPACT OF DIFFERENT AMOUNT BIOSTIMULANTS SUPPLEMENT ON THE PERFORMANCE OF WATER  
PURIFICATION IN VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND

水生生物学报. 2019, 43(2): 431-438 <https://doi.org/10.7541/2019.053>

毛枝藻对人工污水脱氮除磷能力的研究

STUDY ON THE REMOVAL ABILITY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS FROM *STIGEOCLONIUM* SPP.

水生生物学报. 2019, 43(1): 205-212 <https://doi.org/10.7541/2019.025>

大口黑鲈池塘工程化循环水养殖系统的溶解氧时空变化及菌群响应特征

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF DISSOLVED OXYGEN AND REACTION OF BACTERIAL COMMUNITY IN IN-  
POND RACEWAY SYSTEM (IPRS) OF LARGEMOUTH BASS (*MICROPTERUS SALMOIDES*)

水生生物学报. 2019, 43(6): 1290-1299 <https://doi.org/10.7541/2019.153>

人工湿地-微生物燃料电池耦合系统缓解生物堵塞试验研究

STUDY ON RELIEVING BIO-CLOGGING WITH THE HYBRID SYSTEM OF CONSTRUCTED WETLAND AND MICROBIAL  
FUEL CELL

水生生物学报. 2021, 45(1): 190-196 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.077>

淡水中型浮游动物群体与悬浮物碳氮磷比耦联研究

INVESTIGATING THE STOICHIOMETRIC COUPLING BETWEEN MESOZOOPLANKTON ASSEMBLAGE AND SESTON IN  
FRESHWATERS

水生生物学报. 2018, 42(4): 865-870 <https://doi.org/10.7541/2018.106>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2023.0058

## 固液分离塔-垂直流人工湿地技术处理池塘圈养尾水的应用研究

周小荻<sup>1</sup> 李金能<sup>1</sup> 王洁<sup>1</sup> 贾智明<sup>1</sup> 何绪刚<sup>1,2,3</sup> 侯杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 教育部长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070; 3. 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 为有效减少池塘圈养尾水的污染负荷, 提升养殖水环境质量, 研究对调查了池塘圈养中期(8—10月)池塘圈养尾水污染物含量特征进行了检测, 评估了固液分离塔和垂直流人工湿地单元对池塘圈养尾水处理能力, 并分析了固液分离塔-垂直流人工湿地工艺净化养殖尾水水体的效果。研究结果表明, 池塘圈养尾水中总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别为12.65—15.12和4.74—6.89 mg/L, 铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)浓度分别为3.91—5.03和0.26—0.41 mg/L。固液分离塔沉降1h后, 池塘圈养尾水中TN和TP平均去除率分别为35.05%和62.85%, 沉降后联合垂直流人工湿地, 通过进水COD/N调节DO浓度改善间歇曝气人工湿地, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和可溶性磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)出水平均浓度分别为0.45、0.02和0.48 mg/L, TN和TP平均去除率可达到68.04%和81.49%, 可基本实现池塘圈养尾水的循环利用或达标排放。

**关键词:** 溶解氧; 进水碳氮比; 脱氮除磷; 池塘圈养; 养殖尾水; 垂直流人工湿地

**中图分类号:** X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2023)11-1798-09



随着水产养殖业的快速发展, 集约化养殖带来的养殖问题日益突出。养殖中产生的残饵、粪便等养殖废弃物不断进入养殖环境<sup>[1, 2]</sup>, 导致水体中氮、磷不断积累, 养殖水质迅速恶化<sup>[3, 4]</sup>, 引发一系列养殖对象病害频发、养殖效益低下的养殖问题<sup>[5, 6]</sup>。针对此问题, 相关学者研发了一系列新型的清洁的养殖模式, 如跑道式循环水养殖、集装箱循环水养殖和圈养养殖等<sup>[7]</sup>。其中, 圈养养殖模式的固形废弃物排污效率可达90%以上, 且生态、经济和社会等综合效益好, 从而备受养殖者关注<sup>[8]</sup>。在池塘圈养模式中, 经集排污装置高效收集的养殖尾水, 即池塘圈养尾水的及时排出和处理, 是保障圈养养殖效益的关键<sup>[9]</sup>。然而, 目前针对池塘圈养尾水的有效处理工艺的研究鲜有报道, 因此, 需开发一种高效、低成本的池塘圈养尾水处理工艺, 促进人工养殖模式的可持续发展。

人工湿地(Constructed wetlands, CWs)是一种生态型污水处理技术, 因其成本低且处理效率稳定<sup>[10]</sup>, 十分适用于处理各类低污染废水, 目前已广泛用

于水产养殖尾水处理<sup>[11]</sup>。当前的人工湿地普遍采用曝气的方式以解决有害物质铵态氮, 但其出水含有大量硝态氮导致总氮去除率较差<sup>[12]</sup>。徐嘉波等<sup>[13]</sup>采用人工湿地技术处理养殖池塘尾水时, TN和TP去除率仅为34.67%和31.89%。因此, 为满足日益严格的尾水排放标准的迫切需求, 开发新型人工湿地处理工艺, 提高人工湿地尾水处理能力成为促进水产养殖业发展的迫切需求。

为保障圈养模式养殖的有效稳定性, 本研究拟通过调查池塘圈养尾水污染物含量特征, 分析研究固液分离塔和垂直潜流人工湿地分别对池塘圈养尾水处理效果, 并评估固液分离塔-人工湿地系统对圈养尾水的处理能力, 以期实现圈养尾水污染物的高效去除, 并为新型绿色养殖模式尾水处理单元提供技术参考, 从而促进水产养殖业进一步发展。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 集、排污装置中池塘圈养尾水的采集

采集地点为湖北省荆州市公安县崇湖渔场圈

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172977和31972797)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31972797 and 32172977)]

作者简介: 周小荻(1997—), 女, 硕士研究生; 研究方向为渔业水域环境保护与修复。E-mail: 851544650@qq.com

通信作者: 侯杰, 副教授; 研究方向为设施渔业、渔业水域环境保护与修复。E-mail: shengwuhj@mail.hzau.edu.cn

养试验基地, 以大口黑鲈为圈养养殖对象, 选择在晴天傍晚定时抽污, 于养殖中后期(2021年8—10月)取经圈养系统、集排污装置与间歇曝气人工湿地分别随机均匀收集水样各100 mL, 间歇曝气人工湿地连接方式为下端进水, 上端出水(图1)。出水口设在据罐顶5 cm处, 出水端通过三通连接器连接下一单元。每次于出水口的三通处采集A1反应后的水样进行检测。并低温保存至实验室进行下一步分析。

## 1.2 实验装置和材料

**固液分离塔** 如图1a所示, 固液分离塔为上圆柱下圆锥设计, 材质为LDPE的塑料桶, 直径1.8 m, 高3 m, 总有效容积为6 m<sup>3</sup>。池塘圈养尾水通过功率为4 kw的自吸泵吸排入固液分离塔, 池塘圈养尾水在固液分离塔中通过自然沉降而实现固液分离,

固形废物沉降到塔的锥底后集中排除, 进行资源化再利用, 上清液在圆锥接口处通过PVC出水管与人工湿地相连。每个固液分离塔连接4个圈养桶。

**垂直流人工湿地** 如图1b所示, 上清液处理装置为垂直潜流人工湿地系统, 曝气方式为持续曝气, 该系统主要由三部分组成, 即硝化反应系统A1, 反硝化反应系统A2, 二次硝化系统A3。其中, A1为要人工湿地去除污染物的核心单元, 而A2用于确保硝态氮的去除, A3用于确保铵态氮去除。A1、A2和A3由直径0.64 m、高1.22 m的圆柱形铁皮材质桶组成, 规格为1—2 cm火山石为基质填料。A1为间歇曝气处理, A3进行持续曝气处理, A2不曝气, 以保证厌氧状态。A1和A3底部布置增氧盘, 增氧盘由内径8 mm的纳米增氧管围成, 保证均匀曝气, 由旋涡式增氧机(型号: HG-370/220V)充分供氧。

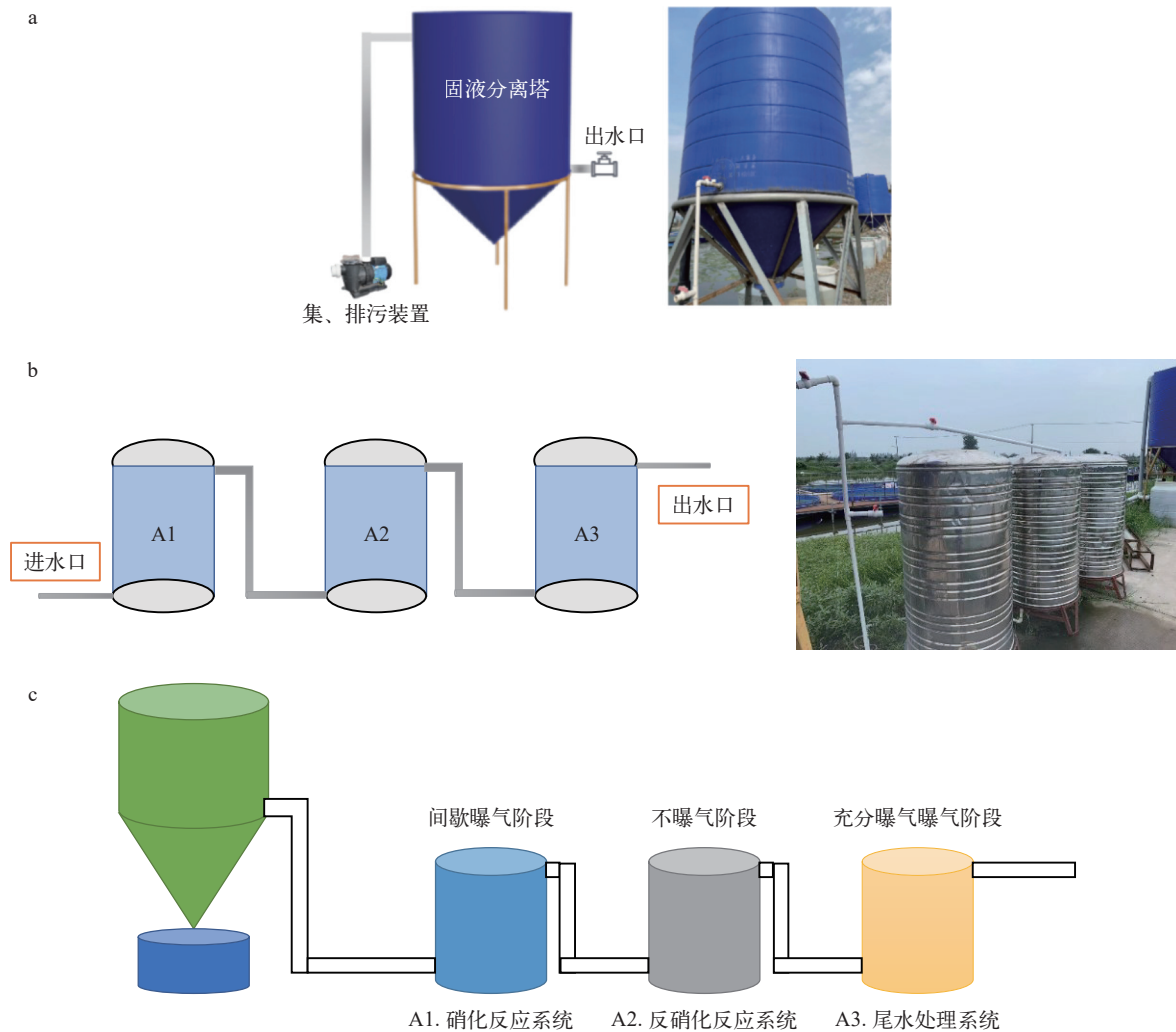


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental devices

a. 固液分离塔装置示意图; b. 人工湿地装置示意图; c. 固液分离塔-人工湿地装置示意图

a. schematic diagram of solid-liquid separation tower device; b. schematic diagram of constructed wetland installation; c. schematic diagram of solid-liquid separation tower-constructed wetland device

3个处理桶以下进水、上出水的连接方式由PVC管连接,连接管道之间设置阀门,处理桶内预埋两个穿孔的PVC管(内径3.0 cm),用于监测DO、pH和温度等参数。

### 1.3 运行方式

**固液分离塔** 每天早上7:00将圈养桶养殖尾水经自吸泵进入固液分离塔中,每个圈养桶各进行3min左右的排污,总计约5 m<sup>3</sup>池塘圈养尾水。经过连续监测探究池塘圈养尾水沉降前后效果及最佳沉降时间。经沉降处理后上清液进入人工湿地系统进行后续处理。沉降在锥底的固体废弃物7d清理1次。

**间歇曝气人工湿地** 如图1c所示,经过固液分离塔沉降处理的上清液进入间歇曝气人工湿地A1,自下而上地充分与系统中基质填料接触(该过程间歇曝气,即曝气20min,不曝气100 min);之后再进入A2,经过自下而上处理(该过程不曝气);之后排入A3(该过程曝气,溶氧控制在6 mg/L以上),经处理后重新回流养殖池塘。为保证每24h处理1次池塘圈养尾水,同时结合处理效果,水力停留时间设计为6.3h,流量控制为3.96 L/min左右。

### 1.4 理化指标检测

检测采集的水样中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TN及TP浓度。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏试剂分光光度法测定,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用酚二磺酸分光光度法测定、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P采用钼酸铵分光光度法测定、TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定、TP采用钼酸铵分光光度法测定,具体参考《水和废水监测分析方法》(第四版)。DO在整个运行过程中使用溶氧仪(YSI, Pro Professional Plus, USA)现场测定。

### 1.5 数据分析

实验数据通过Microsoft Excel 2019和Origin 2020进行分析处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 池塘圈养尾水中污染物含量

池塘圈养尾水是集约化养殖过程中产生的废水,含有高浓度N、P污染物的养殖废水。2019—

2020年,传统池塘养殖尾水处理系统进水中TN和TP质量浓度分别为(2.025±1.031)和(0.627±0.734) mg/L<sup>[13]</sup>,池塘圈养尾水与传统的池塘养殖尾水中污染物的含量特征不同。如表1所示,在养殖中期(8—10月),通过收集和排污装置收集的养殖池尾水样品进行分析,发现养殖池尾水TN浓度为12.65—15.12 mg/L,TP的浓度为4.74—6.89 mg/L。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度为3.91—5.03 mg/L,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度为0.26—0.41 mg/L,与圈养桶中的污染物含量接近<sup>[14]</sup>,说明圈养系统设置集、排污装置能够有效收集圈养过程中产生的氮、磷等污染物。特别是能够收集有害氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)。研究表明,随着养殖时间的推移,水体理化指标在圈养大口黑鲈过程中呈上升趋势,其中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度可达到5.54、0.60和2.73 mg/L<sup>[14]</sup>,污染物浓度均显著高于传统池塘养殖尾水的浓度<sup>[15,16]</sup>,说明池塘圈养可以集中养殖过程中产生的氮、磷等污染物。可见,与传统池塘养殖相比,池塘圈养产生的高浓度养殖污染物可以实现较大程度的集中收集,这为池塘圈养尾水的最大限度处理及循环利用提供了稳固的基础。

### 2.2 固液分离塔对池塘圈养尾水处理效果

为确定固液分离塔中池塘圈养尾水的最优沉降时间,连续监测了沉降12h内,固液分离塔上清液中N、P浓度变化。由图2a和2c可知,在沉降12h后,池塘圈养尾水中TN的浓度从初始8.41下降为5.53 mg/L, TN去除率为34.17%。尾水沉降1h后, TN浓度为5.63 mg/L, TN去除率达到33.03%,由此说明了池塘圈养尾水在沉降1h后TN达到较好去除效果。与TN变化不同, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N在沉降12h内无明显变化,表明固液分离塔沉降作用无法有效的去除池塘圈养尾水中溶解性无机氮。通过差减法计算,其他形式的氮(ON-N, Other Nitrogen)与TN呈现相同的变化趋势,在沉降1h后,其含量由初始的4.02降到1.37 mg/L。由于ON-N的成分主要是颗粒态氮和可溶性有机氮,容易聚集下沉<sup>[17]</sup>,所以该类物质能够较好地通过沉降作用去除。因此, TN主要是通过ON-N的絮凝沉降去除。

由图2b和2c可知,沉降12h后,池塘圈养尾水中

表1 池塘圈养尾水中氮、磷含量

Tab. 1 Nitrogen and phosphorus content in pond-cultivated tailwater

时间Time	TN (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/L)
8月	12.65±0.96	3.91±0.53	0.32±0.033	3.47±0.33	6.56±0.63	0.87±0.07
9月	15.12±1.19	4.79±0.69	0.26±0.037	4.13±0.38	4.74±0.47	0.93±0.23
10月	14.52±1.13	5.03±0.71	0.41±0.029	4.03±0.27	6.89±0.53	0.90±0.14

TP浓度由初始的6.23降到1.72 mg/L, TP去除率达到72.35%, 沉降1h后, 池塘圈养尾水中TP浓度为1.97 mg/L, TP去除率为68.28%。并且沉降1h后, TP的浓度及去除率均无明显的变化。由此可见, 池塘圈养尾水在经过1h沉降后, TP可达到较好的去除效果, 随着沉降时间的增加, TP浓度和去除率基本稳定不变, 这与TN变化趋势一致。不同于TP变化, 在0—

12h沉降时间内, 池塘圈养尾水中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度无明显变化, 说明沉降作用无法对 $\text{PO}_4^{3-}$ -P进行去除。通过差减法计算, 其他形式的磷(OP-P, Other phosphorus)在沉降1h后, 浓度从初始的5.35降低到1.24 mg/L。由于OP-P的组成相似于ON-N, 主要包括颗粒态磷和可溶性有机磷, 而这些大分子物质容易通过官能团形成络合物而发生沉降作用去除<sup>[17, 18]</sup>。因此, TP的去除也是通过OP-P的絮凝沉降作用进行。

在圈养系统实际运行过程中, 需每天对圈养桶进行排污处理<sup>[8]</sup>, 所以固液分离塔和人工湿地系统整体的运行时间不得超过24h。因此, 根据以上研究结果, 为保证后续人工湿地对可溶性无机N、P的去除所需的处理时间, 固液分离塔中池塘圈养尾水最优沉降时间应为1h。

### 2.3 池塘圈养尾水沉降效果

在沉降时间确定后, 需对圈养尾水沉降效果进行分析。在沉降时间为1h时, 连续检测固液分离塔中池塘圈养尾水沉降前后氮、磷浓度(图3)。由圈养系统进入固液分离塔的池塘圈养尾水TN浓度为10.73—19.95 mg/L, 经1h沉降后, 上清液TN浓度为8.40—10.58 mg/L, TN平均去除率为35.05%, 表明沉降作用对池塘圈养尾水中TN有一定去除效果(图3a和3c)。此外,  $\text{NH}_4^+$ -N进水浓度为3.84—6.85 mg/L,  $\text{NO}_2^-$ -N进水浓度为0.18—0.55 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N进水浓度为2.2—5.06 mg/L, 经过1h沉降后, 其上清液 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N浓度分别为3.48—6.52、0.20—0.49和2.33—3.98 mg/L, 发现沉降前后浓度没有较为明显变化, 结果表明沉降作用对池塘圈养尾水中溶解性无机氮去除效果有限。通过差减法计算, 池塘圈养尾水ON-N进水含量为0.62—13.10 mg/L, ON-N进水含量差异较大, 原因在于每周圈养系统产生的废弃物量受到养殖对象生长情况、投饲和排泄等因素影响, 氮素积累量存在差异<sup>[14, 19]</sup>。经过1h沉降后, 其上清液ON-N含量为0.1—3.98 mg/L, 沉降效果较好, 说明沉降作用能够有效去除池塘圈养尾水中的ON-N, 因此TN能够达到一定的去除效率。

由图3b和3c所示, 池塘圈养尾水进入固液分离塔中TP浓度为3.64—6.39 mg/L, 经过沉降后, TP浓度为1.08—2.40 mg/L, TP平均去除率可达62.85%, 表明沉降作用能够有效去除池塘圈养尾水中TP。进水 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度为0.71—0.95 mg/L。在沉降后, 上清液的 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度为0.59—0.75 mg/L, 沉降前后浓度无明显变化, 因此说明沉降作用对养殖尾水中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P去除效果较差。经差减法计算, OP-P进水含量为2.69—5.60 mg/L, 经过沉降后, 上清液中

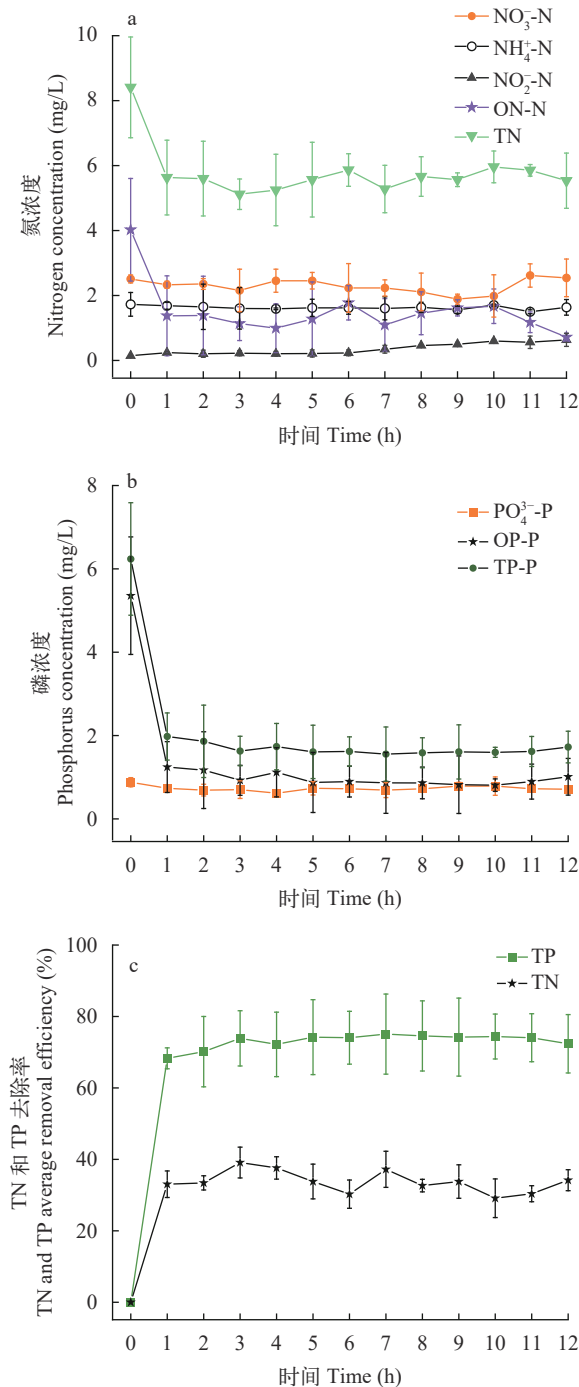


图2 池塘圈养尾水沉降12h氮、磷浓度变化

Fig. 2 Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in 12h sedimentation of pond-cultivated tailwater

OP-P含量为0.44—1.73 mg/L, 可见沉降作用对OP-P去除效果较好。

综上所述, 在圈养系统实际运行过程中经固液分离塔沉降1h处理后, 池塘圈养尾水中氮、磷能够得到有效去除, 主要去除成分为ON-N和OP-P。

### 2.4 间歇曝气对垂直流人工湿地脱氮效果的影响

影响间歇曝气人工湿地脱氮效果的两个环境因素分别是DO浓度和进水COD/N<sup>[20]</sup>。有研究指出, 在增加人工湿地内部溶解氧的情况下, 采取间歇曝气方式的方式可以达到较好的TN去除效果<sup>[21]</sup>。因此, 为了确定人工湿地最佳DO供给量, 连续地进行周期性检测人工湿地进水TN浓度以及COD。如

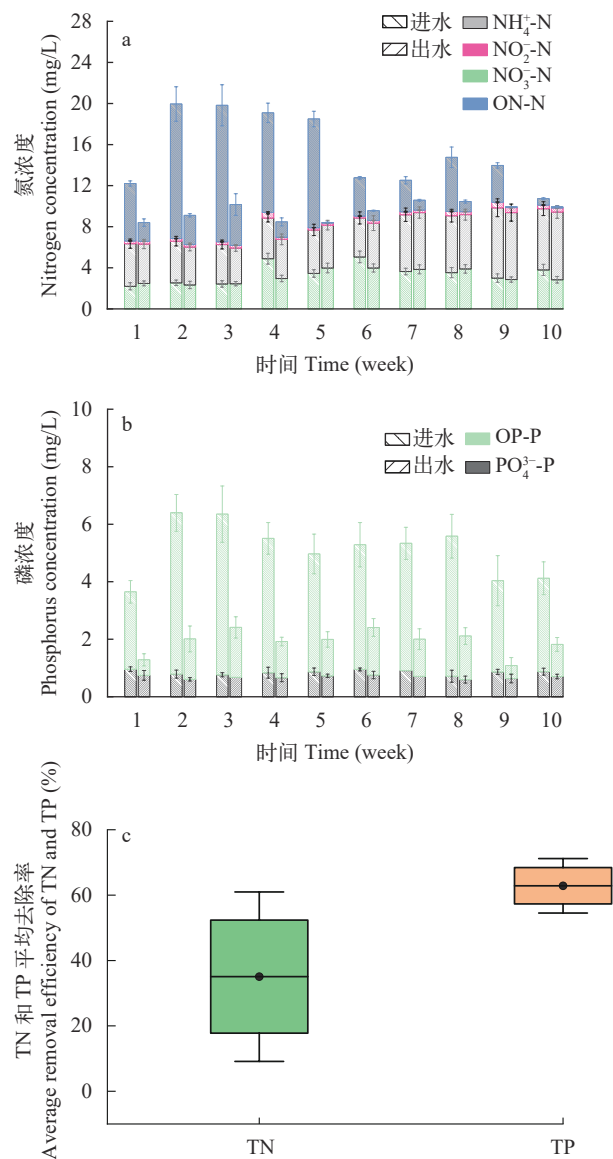


图3 固液分离塔中池塘圈养尾水沉降前后氮、磷浓度变化  
Fig. 3 Changes of nitrogen and phosphorus concentrations before and after sedimentation of pond-cultivated tailwater in solid-liquid separation tower

图4所示, 人工湿地进水TN浓度为8.39—10.21 mg/L, 进水COD为32—45 mg/L, 计算可得, 进水COD/N为3.60—5.24。

为探究间歇曝气下A1中氮去除效果及DO调控情况, 对反应系统A1出水氮浓度及DO变化情况进行了周期监测(图5)。A1中DO浓度在0—20min内

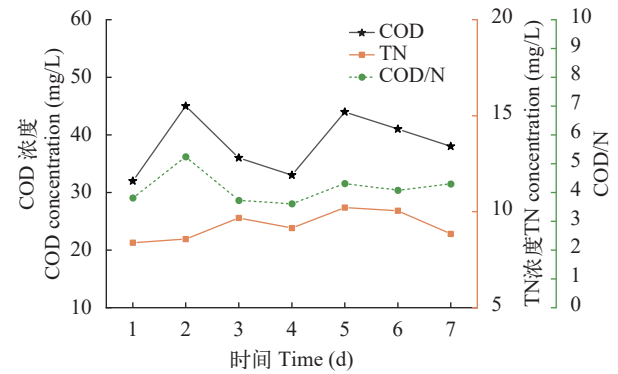


图4 间歇曝气人工湿地进水COD/N变化  
Fig. 4 Variation of COD/N in influent of constructed wetland with intermittent aeration

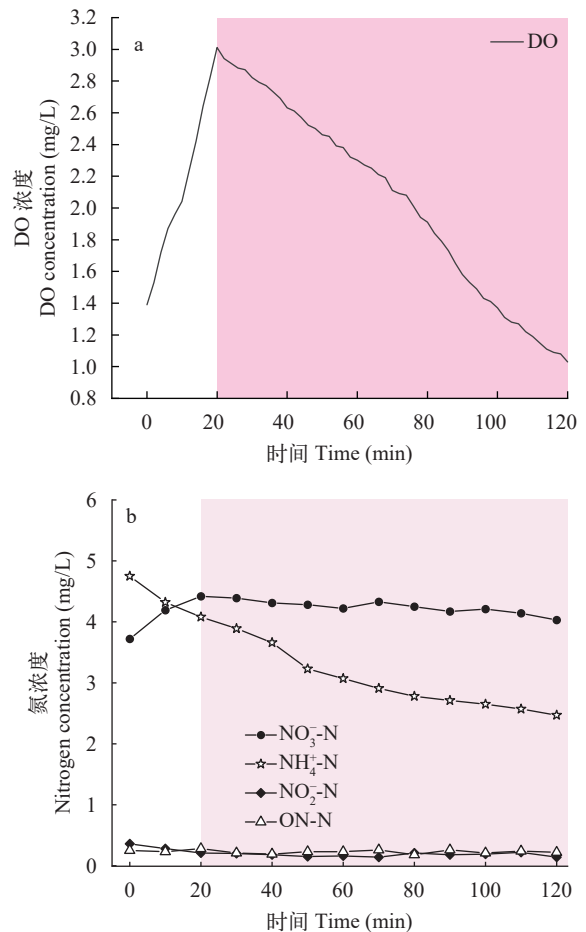


图5 A1中DO及出水氮浓度周期变化情况  
Fig. 5 Periodic variation of DO and effluent nitrogen concentration in A1

持续上升(1.39→3.01 mg/L), 在20—120min内DO浓度开始持续下降(3.01→1.03 mg/L), 说明DO浓度变化符合曝气20min、不曝气100min的运行趋势(图 5a)。同时从图中可以看出DO浓度在反应期间基本都控制在1.8—3.5 mg/L内, 表明在间歇曝气人工湿地中能够实现DO的最佳供给量。由图 5b可知, 在0—20min曝气阶段, A1中池塘圈养尾水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度从初始的4.75降到4.08 mg/L,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度从0.36降到0.21 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N浓度从3.72增加到4.42 mg/L, 表明在曝气阶段A1内发生了硝化反应。在20—120min厌氧阶段, 其 $\text{NH}_4^+$ -N浓度持续下降到2.47 mg/L,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度下降到0.14 mg/L, 而 $\text{NO}_3^-$ -N浓度在4.03—4.39 mg/L变化。在生物膜反应器中, 为实现同时硝化反硝化反应(Simultaneous Nitrification and Denitrification, SND), DO通常控制在2—3 mg/L<sup>[22]</sup>, 在此阶段 $\text{NH}_4^+$ -N浓度下降而 $\text{NO}_3^-$ -N浓度却没有显著的下降趋势, 表明A1在不曝气阶段发生了同时硝化反硝化反应。同时在0—120min内池塘圈养尾水TN浓度从初始的9.08持续下降到6.86 mg/L, ON-N的含量在0.18—0.28 mg/L变化, 说明间歇曝气对池塘圈养尾水中的ON-N去除无明显作用。以上结果表明在A1内曝气方式为间歇曝气能够使A1发生同时硝化反硝化反应, 调整A1的DO后, 其同时硝化反硝化效率能够得到增强。因此, 调整A1的曝气强度能够有效的降低池塘圈养尾水中无机氮浓度, 提升A1中池塘圈养尾水TN去除效果。

在确定间歇曝气方式能够实现同时硝化反硝化过程, 提升池塘圈养尾水中氮的去除效果后, 对A1内池塘圈养尾水氮浓度进行长期监测。如图 6所示, 人工湿地进水TN浓度为8.21—10.43 mg/L, 经A1间歇曝气处理后, 出水TN浓度为6.06—7.65 mg/L,

其TN平均去除率为27.79%, 表明间歇曝气对池塘圈养尾水总氮去除效果有一定的提升作用。进水ON-N的含量为0.10—1.24 mg/L, 经A1间歇曝气处理后, ON-N的含量为0.11—0.82 mg/L, 其含量无明显变化, 表明间歇曝气对养殖尾水中ON-N去除效果较低。进水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度为3.64—6.03 mg/L,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度为0.23—0.42 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N浓度为2.78—4.23 mg/L, 经A1间歇曝气处理后, 其出水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度为1.41—2.89 mg/L,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度为0.11—0.23 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N浓度为2.92—4.26 mg/L, 可以发现 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的浓度有较明显的下降趋势, 而 $\text{NO}_3^-$ -N的浓度上升较少, 因此能够说明在A1内发生了同时硝化反硝化反应。

综上所述, 在间歇曝气人工湿地中, 根据进水COD/N调整DO供给, 能够使人工湿地硝化系统A1发生同时硝化反硝化反应, 增强A1中SND效率, 进而有效地降低池塘圈养尾水中的无机氮浓度, 提高人工湿地TN去除效率。

## 2.5 固液分离塔-间歇曝气人工湿地对池塘圈养尾水处理效果

由上述结果可知, 间歇曝气能够提升人工湿地对氮的去除效果。因此, 为高效处理池塘圈养尾水, 将优化后的间歇曝气策略实际应用于池塘圈养尾水处理工艺中, 设计构建固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理工艺, 其池塘圈养尾水处理效果如图 7所示。

由图 7a和7c可知, 系统进水TN浓度为12.65—18.75 mg/L, 经固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理后, TN浓度降为4.11—5.13 mg/L, TN平均去除率可以达到68.04%, 其中固液分离塔TN平均去除率为36.82%, 间歇曝气人工湿地TN平均去除率为

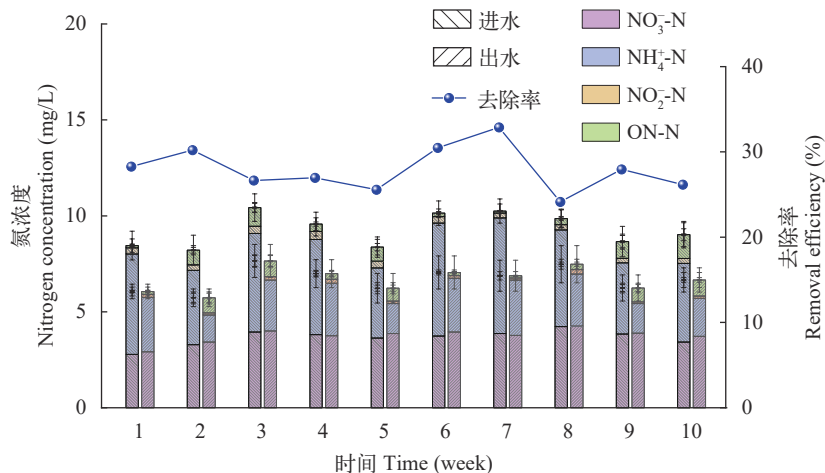


图 6 A1系统中池塘圈养尾水氮浓度变化

Fig. 6 Variation of nitrogen concentration in pond-cultivated tailwater in A1 system

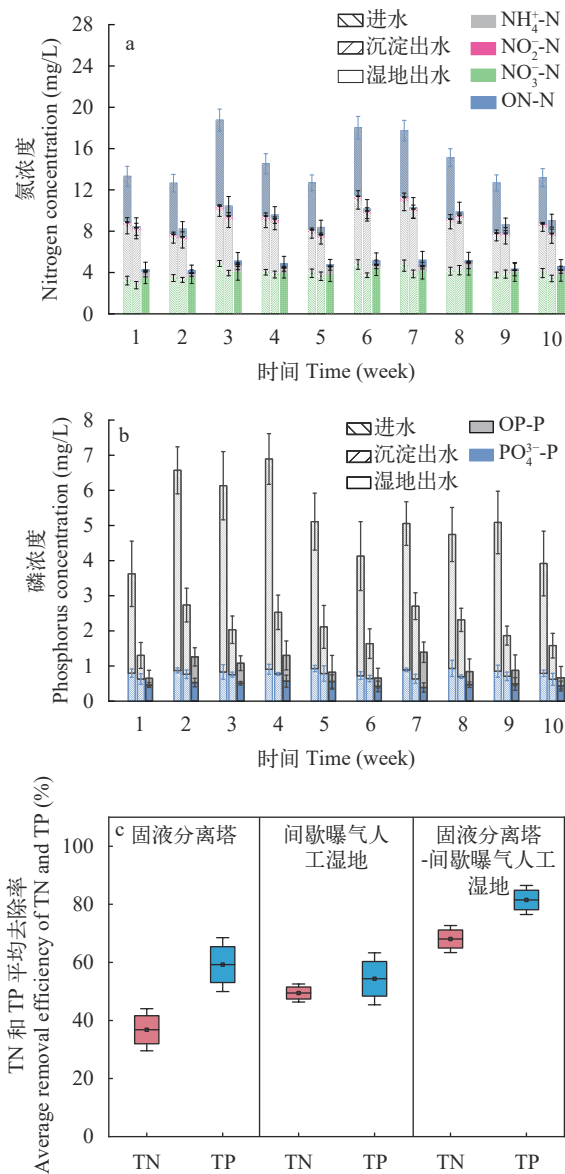


图7 固液分离塔-间歇曝气人工湿地工艺中池塘圈养尾水氮、磷浓度变化

Fig. 7 Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in pond-cultivated tailwater in solid-liquid separation tower-intermittent aeration constructed wetland process

49.47%，而一般淡水池塘养殖尾水处理系统对TN去除率为34.67%<sup>[13]</sup>，故本研究中间歇曝气人工湿地对养殖尾水可以有效去除TN且存在较好的去除效果。此外，进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为3.89—6.25 mg/L， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为0.23—0.45 mg/L， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为3.22—4.88 mg/L，ON-N含量为4.44—8.31 mg/L，经固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理后，其出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为0.21—0.75 mg/L， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为0.01—0.02 mg/L， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为3.53—4.39 mg/L，ON-N含量为0.10—0.58 mg/L，表明经该工艺处理后，池塘圈养尾水中ON-N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 能够基本得到去

除，同时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 生成量较少，可以在氮素去除方面实现较好的处理效果。同时由图7c可知，在该处理工艺中，池塘圈养尾水中的ON-N主要由固液分离塔沉降去除，而溶解性无机氮由间歇曝气人工湿地降解处理。

由图7b和7c可知，系统进水TP浓度为3.62—6.89 mg/L，经固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理后，TP浓度降为0.64—1.39 mg/L，TP平均去除率为81.49%，其中固液分离塔TP平均去除率为59.23%，间歇曝气人工湿地TP平均去除率为54.35%，而一般的淡水池塘养殖尾水处理系统对TP的去除率为31.89%<sup>[13]</sup>，固液分离塔和人工湿地对TP均有较好的去除效果。其中系统进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为0.72—0.93 mg/L，OP-P含量为2.82—5.98 mg/L，经该工艺处理后，其出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为0.39—0.57 mg/L，OP-P含量为0.18—1.00 mg/L，说明该处理工艺能够有效去除池塘圈养尾水中OP-P和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。同时由图7可知，OP-P主要在沉降阶段去除，而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 主要在间歇曝气人工湿地内去除，这与人工湿地内基质为对磷有较强吸附作用的火山石有关。

综上所述，池塘圈养尾水经过固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理后，氮、磷等污染物能够得到有效去除，TN和TP平均去除率分别可达68.04%和81.49%，其中间歇曝气人工湿地TN去除率为49.47%。此外，池塘圈养尾水经该工艺处理后，TN和TP出水平均浓度为4.69和0.95 mg/L，其浓度低于淡水池塘养殖尾水排放标准(SC/T 9101—2007)，其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 出水平均浓度分别为0.45、0.02和0.48 mg/L，出水几乎不含对养殖对象有毒害作用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ，同时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 生成量较少，基本可以实现池塘圈养尾水循环利用或达标排放的目的。

### 3 结论

本研究针对池塘圈养模式下的尾水处理，通过分析池塘圈养尾水中污染物特征，设计搭建固液分离塔-间歇曝气人工湿地尾水处理工艺，主要研究结果如下：(1)池塘圈养尾水中TN和TP浓度分别为12.65—15.12和4.74—6.89 mg/L， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为3.91—5.03和0.26—0.41 mg/L，表明圈养系统集、排污装置能够有效收集圈养过程中产生的氮、磷等污染物，尤其能够较大程度地收集其中的有害氮素。(2)通过12h连续追踪监测，发现1h沉降可实现较好的池塘圈养尾水中氮、磷去除，综合考虑沉降效率及人工湿地处理时间，确定固液



分离塔中池塘圈养尾水最佳沉降时间为1h, TN和TP平均去除率分别为35.05%和62.85%。(3)在间歇曝气人工湿地中, 由进水COD/N确定人工湿地A1中最佳DO供应量为1.8—3.5 mg/L, 在此DO供应下对A1进行20min曝气和100min不曝气处理, 发现出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的下降量明显高于 $\text{NO}_3^-$ -N的上升量, 由此表明在A1内通过间歇曝气处理发生了同时硝化反硝化反应, 调整了A1的DO浓度后, A1的SND效率得到增强, 其TN去除率较持续曝气处理明显得到提高。上清液经人工湿地三级处理后, TN和TP平均去除率分别达到49.47%和54.35%。(4)池塘圈养尾水经过固液分离塔-间歇曝气人工湿地处理后, TN和TP去除率可达68.04%和81.49%。经过处理后的尾水TN和TP平均浓度为4.69和0.95 mg/L,  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P平均浓度分别为0.45、0.02和0.48 mg/L, 其浓度低于淡水池塘养殖尾水排放标准。综上所述, 固液分离塔-间歇曝气人工湿地组合工艺对池塘圈养尾水氮、磷等污染物有较好的去除效果, 可实现池塘圈养尾水的循环利用或达标排放。

#### 参考文献:

- [1] Yang G J, Wang W L, Zhou W. Water quality problems and countermeasures for pond culture in China [J]. *Journal of Aquaculture*, 2021: 64-66. [杨耿介, 王文琳, 周玮. 我国池塘养殖面临的水质问题及对策 [J]. 水产养殖, 2021: 64-66.]
- [2] Yao F, Zhen S Q, Yang Y M, et al. Effects of stocking density on nitrogen and energy budget of gibel carp [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2009(3): 451-455. [姚峰, 甄恕棻, 杨严鸥, 等. 养殖密度对异育银鲫氮和能量收支的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2009(3): 451-455.]
- [3] Cheng L W, Xu H, Chen M D, et al. Review on causes of eutrophication of water body and its control measure [J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(1): 18-21, 38. [程丽巍, 许海, 陈铭达, 等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展 [J]. 环境保护科学, 2007, 33(1): 18-21, 38.]
- [4] Huang T S, Bai J J, Li S J, et al. Discussion on the current situation and green development of California bass culture in China [J]. *China Fisheries*, 2017(12): 44-47. [黄太寿, 白俊杰, 李胜杰, 等. 我国加州鲈养殖现状和绿色发展问题探讨 [J]. 中国水产, 2017(12): 44-47.]
- [5] Zhang A F, Jin B R, Fu Y L, et al. Analysis on the problems faced by freshwater aquaculture and its healthy development countermeasures [J]. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2016(4): 46-48. [张爱芳, 金乘荣, 傅义龙, 等. 浅析淡水养殖面临的问题及健康发展对策 [J]. 江西水产科技, 2016(4): 46-48.]
- [6] Zhang H Z. Problems and countermeasures of marine aquaculture in Dongying [J]. *China Fisheries*, 2001 (7): 28. [张汉珍. 东营海水养殖存在的问题及对策 [J]. 中国水产, 2001(7): 28.]
- [7] Zhang Q. Effects of culture density on growth, physiological indexes and muscle quality of largemouth bass in captivity [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [张奇. 圈养模式下养殖密度对大口黑鲈生长、生理指标以及肌肉品质影响的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [8] He X G, Hou J. Research progress in pond captive mode [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 21-29. [何绪刚, 侯杰. 池塘圈养模式研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 21-29.]
- [9] He X G. "Zero emission" green and efficient captive technique in pond [J]. *Scientific Fish Farming*, 2019(9): 16-17. [何绪刚. 池塘“零排放”绿色高效圈养技术 [J]. 科学养鱼, 2019(9): 16-17.]
- [10] Li F, Lu L, Zheng X, et al. Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-feeding [J]. *Bioresource Technology*, 2014(169): 395-402.
- [11] Lopardo C R, Zhang L, Mitsch W J, et al. Comparison of nutrient retention efficiency between vertical-flow and floating treatment wetland mesocosms with and without biodegradable plastic [J]. *Ecological Engineering*, 2019(131): 120-130.
- [12] Wu S, Kusch P, Brix H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review [J]. *Water Research*, 2014(57): 40-55.
- [13] Xu J B, Shi Y H, Liu Y S. Nitrogen and phosphorus purification effect of aquaculture wastewater treatment system in freshwater culture ponds [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2022, 37(1): 104-112. [徐嘉波, 施永海, 刘永士. 淡水池塘养殖尾水处理系统对氮磷的净化效果 [J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 104-112.]
- [14] Liao W J. Ecological and economic benefit analysis of pond captive mode - using large mouth black bass as an example [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [廖伟坚. 池塘圈养模式的生态与经济效益分析——以大口黑鲈为例 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [15] Gong L. Study on purification of pond aquaculture wastewater and nitrogen migration and transformation of pond sediment [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [龚龙. 池塘养殖废水净化及池塘底泥的氮素迁移、转化研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [16] Shen N F, Gong C P, Wang S, et al. Recommendations for purification efficiency and process optimization of tail water treatment in freshwater pond culture [J]. *Chinese Aquatics*, 2021(9): 3-75. [沈乃峰, 公翠萍, 王曙, 等. 淡水池塘养殖尾水处理净化效果及工艺流程优化建议 [J]. 中国水产, 2021(9): 3-75.]

- [17] Song H Q, Gu C C, Zhang Y L. Tail water treatment of aquaculture system [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, **25**(22): 85-87. [宋红桥, 顾川川, 张宇雷. 水产养殖系统的尾水处理方法 [J]. *安徽农学通报*, 2019, **25**(22): 85-87.]
- [18] Zhang R X. Effect of adding activated carbon on MBR treatment of mariculture wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015. [张茹霞. 投加活性炭对MBR处理海水养殖废水的影响 [D]. 杭州: 浙江工业大学. 2015.]
- [19] Wang H P. Study on the construction of pond captive system and its breeding effect [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. [王海鹏. 池塘圈养系统构建及其养殖效果研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.]
- [20] Saeed T, Afrin R, Al Mueeed A, *et al.* Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(9): 1065-1073.
- [21] Li J, Hu Z, Li F, *et al.* Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: intermittent aeration and tidal flow [J]. *Chemosphere*, 2019(223): 366-374.
- [22] Yan Y, Lu H, Zhang J, *et al.* Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification (SND) for nitrogen removal: a review and future perspectives [J]. *Environmental Advances*, 2022(9): 100254.

## APPLICATION STUDY OF SOLID-LIQUID SEPARATION TOWER COUPLED VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND IN POND-CULTIVATED TAILWATER

ZHOU Xiao-Di<sup>1</sup>, LI Jin-Neng<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, JIA Zhi-Ming<sup>1</sup>, HE Xu-Gang<sup>1,2,3</sup> and HOU Jie<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Green Development of Bulk Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430070, China; 3. Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Although the pond captive model has several practical advantages, such as being ecologically friendly, resource conserving, and economic effective, research on the treatment mode of pond-cultivated tailwater is still relatively insufficient. In order to reduce the pollution load of captive tailwater and improve the environmental quality of cultured water, we systematically investigated the characteristics of contaminant content in pond-cultivated tailwater during the middle period (from August to October) of pond circle cultivation. The study evaluated the treatment capacity of a solid-liquid separation tower and vertical flow constructed wetland unit for pond captive tailwater, and analyzed the effect of the solid-liquid separation tower vertical flow artificial wetland process to purify cultured tailwater bodies. The results showed that after settling for 1h using a solid-liquid separation tower, the average removal rates of TN and TP in pond-cultivated tailwater were 35.05% and 62.85%, respectively. After settling in a combined vertical flow constructed wetland and improving the intermittent aerated constructed wetland by adjusting the influent COD/N, the DO concentration was improved and the average concentrations of  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N and soluble phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P) in the reused tailwater were 0.45, 0.02 and 0.48 mg/L, and the average TN and TP removal rates reached 68.04% and 81.49%, respectively, recycling or up to the standard discharge of pond-cultivated tailwater in ponds can be achieved.

**Key words:** Dissolved Oxygen; Influent COD/N; Nitrogen and phosphorus removal; Pond-cultivated system; Tailwater; Vertical flow constructed wetlands