

基于氮、磷收支的人工湿地-池塘循环水养殖系统 净化效果评价*

陶冶¹, 朱健^{1, 2**}, 李冰^{1, 2}, 侯诒然², 封功成¹

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业与种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081)

摘要: 池塘循环水养殖与人工湿地相组合,是将养殖生产与净化养殖废水并举的新思路,研究该组合系统中氮、磷物质的源-汇作用,对系统工艺参数的设置具有指导意义。本文研究了在复合垂直潜流人工湿地-池塘循环水养殖系统中氮、磷生源要素的流向与收支,并通过氮、磷收支评价人工湿地对池塘尾水净化效果。研究表明:在5个月的试验周期内,饲料投入是该养殖系统氮、磷收入最主要的途径,分别占总收入的65.61%和81.44%,其次是水体中带入的氮、磷。在试验初期,由于养殖生物与湿地植物的生物量较小,因此其对系统的氮、磷收入部分贡献较小。沉积物蓄积是氮、磷最主要的支出途径,占总支出氮、磷的比例为28.60%和42.23%;其次为养殖生物的收获,占总支出氮、磷的26.05%和30.77%;人工湿地植物与基质蓄积的氮、磷占总支出的15.81%和16.11%;通过池塘底泥渗漏损失的氮、磷较少。人工湿地对氨氮、总氮、总磷的去除率分别为33.72%~66.32%、36.35%~72.40%、44.69%~57.32%,且氨氮与总氮的去除率受温度影响显著。研究结果表明:人工湿地对池塘尾水有显著的净化效果,可通过植物收割、基质移除等方式去除系统内未被有效利用的氮、磷,减少池塘内源性氮、磷的蓄积。人工湿地-池塘循环水养殖模式具有良好的生态效益,是一种绿色、可持续的养殖模式。

关键词: 池塘循环水养殖; 人工湿地; 净化效果; 氮磷收支; 沉积物

中图分类号: S959

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)02-036-10

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190349

引用格式: 陶冶, 朱健, 李冰, 等. 基于氮、磷收支的人工湿地-池塘循环水养殖系统净化效果评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(2): 36-45.

TAO Ye, ZHU Jian, LI Bing, et al. An evaluation of purification effect of constructed wetland-pond recirculating aquaculture system based on nitrogen and phosphorus budgets[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(2): 36-45.

氮、磷是养殖系统中限制初级生产力的主要营养元素和衡量自身污染程度的重要指标,其在养殖系统中的含量和流向对浮游生物、养殖生物、养殖水体、底泥沉积物都有很大的影响^[1]。氮、磷收支可反映养殖系统中氮磷的来源与去向,一定程度上揭示氮、磷在系统内各组成要素之间的循环过程以及交流程度,是评价养殖系统中氮、磷重要性、转化效率及污染程度的有效手段^[2]。

据《中国生态环境状况公报》^[3]与《2018年中国海洋生态环境状况公报》^[4]显示:与2017年相比,湖泊(水库)等重要渔业水域总氮、总磷超标范围有所增加;海洋渔业水域无机氮、活性磷酸盐含量超标的水域占总监测水域的75.4%和44.0%。目前渔业水环境污染形势严峻,急需治理,人工湿地作为一种生态处理技

术,可以实现对污水中氮、磷营养物质的高效净化,并且凭借建设成本低、管理维护简便、观赏价值高等特点,目前已被广泛应用到各种污水的处理上^[5-6]。

本试验搭建的复合垂直潜流人工湿地,相较于单一的水平潜流、垂直潜流湿地,其能提供不同的氧化还原状态,更适宜硝化和反硝化作用的进行,具有更高效的污水净化性能^[7]。目前国内外已有许多关于不同的湿地构成要素下的人工湿地污水净化效果的研究^[8-10]、不同养殖模式下或循环水设施调控下的养殖池塘的氮磷收支状况的研究^[11-14],但极少有研究将人工湿地、养殖池塘两者作为整体,考察氮、磷元素在完整的循环水养殖系统内的流向与收支状况。本试验在课题组自复合垂直潜流人工湿地-池塘循环水养殖系统构建以来的一系列研究成果^[15-18]的基础上,在试验期内监测氮、磷

* 基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD25B07);现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-45)资助

Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2012BAD25B07); the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-45)

收稿日期:2019-10-18;修订日期:2020-02-13

作者简介:陶冶(1995-),男,硕士。E-mail:18260060550@163.com

** 通讯作者:E-mail: zhuj@ffrc.cn

营养元素在完整的人工湿地-池塘循环水养殖系统内的氮磷流向,揭示循环水养殖模式下整个系统的收支状况,评价人工湿地的净水效果,明确人工湿地去污路径,以期为人工湿地的长效稳定运行以及具有生态效益的池塘养殖模式的建立提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计与运行管理

本试验的人工湿地-池塘循环水养殖系统位于中国水产科学研究院淡水渔业研究中心宜兴大浦科研实验基地。复合垂直潜流人工湿地由沉淀池、调节池、上下行湿地、预警池和清水池五部分构成。上下行湿地铺设的基质分为两层,上层为直径 2~4 cm 的生物陶粒,下层为直径 6~10 cm 的鹅卵石,其选定的湿地植物为再力花(*Thalia dealbata*)和梭鱼草(*Pontederia cordata*)。人工湿地-池塘循环水养殖系统具体示意图见图 1。人工湿地整体面积为 450 m²,湿地主体面积约

360 m²,基质孔隙度 55%,污水设计流量为 100 m³/d,水力负荷为 0.28 m/d,水力停留时间为 1.25 d。湿地采用管道布水的方式,沉淀池与上行垂直潜流湿地之间依靠水位落差进行溢流进水。为保证均匀布水,在上行垂直潜流湿地底部铺设开有小孔的 4 根纵向的分流 PVC 水管进水,通过墙体间管道溢流进入下行垂直潜流湿地中。下行垂直潜流人工湿地的基质表层 10 cm 下铺设朝下开有小孔的 4 根平行的管道,经湿地处理后,由单元底部的集水管道收集,进入清水池。湿地进出水及各单元间流量主要由阀门进行控制。养殖池塘占地面积 0.333 hm²,池深 1.5 m,放养鳊鱼 100 条,草鱼 300 条,鲫鱼 200 条。

人工湿地的运行从 7 月初开始,11 月结束,每天运行 8 h,定期进行过饱和基质的更换。养殖池塘日投喂量约为鱼体重的 2%~3%,根据天气、水温及时调整投喂量,试验期间不换水。

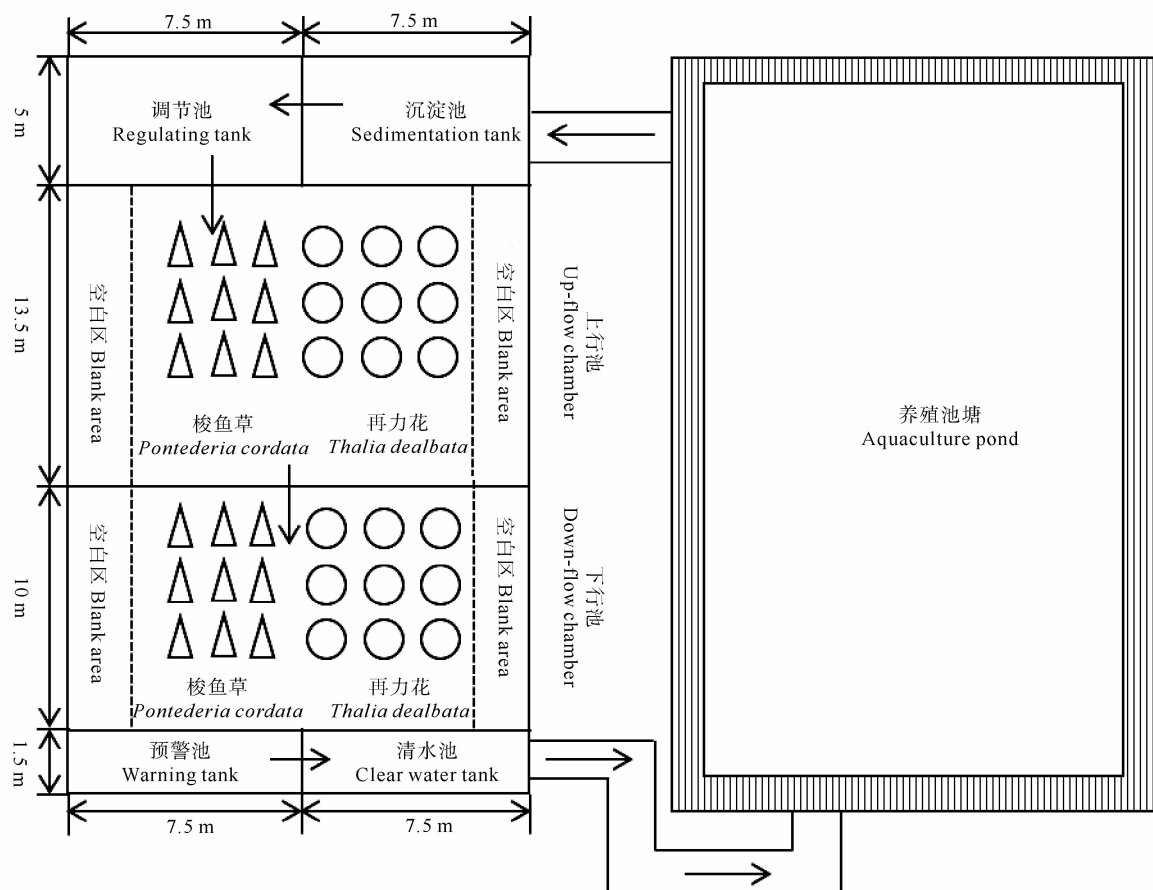


图 1 人工湿地-池塘循环水养殖系统

Fig.1 Constructed wetland-pond recirculating aquaculture system

1.2 样品的采集与测定

1.2.1 水样与间隙水 在试验期间,约 25 d 采集一次养殖池塘与人工湿地各池内的水样,取养殖池塘表层

10 cm 深度泥样,以 4 000 r/min 离心 30 min 得到间隙水,在采样后 24 h 内检测。总磷(Total phosphorus, TP)浓度使用钼锑抗分光光度法测定,总氮(Total ni-

trogen)浓度用紫外分光光度法测定,氨氮(Ammonia nitrogen)浓度用纳氏试剂比色法测定^[19]。

1.2.2 沉积物、基质、植物、养殖生物和饲料 在试验开始和结束之前,采集鱼体样本和养殖池塘沉积物样本,柱状采泥器采集沉积物,采样深度为5 cm,在上行湿地和下行湿地采集、挖取基质样品与梭鱼草、再力花的全株样品。鱼体样本、饲料和基质样本于60℃烘干;植物样本分为根系部分与茎叶部分,于105℃条件下杀青20 min,随后于65℃烘干;沉积物于-50℃冷冻干燥,干燥完后将所有样品研磨、过筛、混匀之后装瓶保存。

鱼体、饲料、基质、沉积物的总氮含量使用元素分析仪测定,植物总氮、总磷的测定参照《土壤农化分析》^[20],鱼体、饲料总磷的测定参照董佳等^[21]的过硫酸钾消解法,基质的测定参照吴海明等^[22]的方法,沉积物总磷的测定参照《沉积物总氮、总磷联合测定分析方法》^[23]。

1.2.3 其他样品 根据间隙水中的TN、TP浓度来计算养殖池塘N、P的渗漏。用带刻度的烧杯接自然降雨,对试验期间降雨量进行估算,用测定水体TN、TP浓度的方法来测定雨水TN、TP浓度。

1.3 氮、磷收支计算

氮、磷收支公式如下:

$$PW_{in} + F_{in} + PF + P_{in} + R = PW_{out} + F_{out} + P_{out} + FA + SA + L + O,$$

$$FA = C'_e \cdot W_e - C_e \cdot W_e,$$

$$SA = C'_i \cdot W_i - C_i \cdot W_i.$$

式中: PW_{in} 为初始水体,含人工湿地各池水体与养殖池塘水体; F_{in} 为投放鱼种; PF 为投入的颗粒饲料; P_{in} 为试验初人工湿地植物; R 为降雨; PW_{out} 为终末水体,含人工湿地与养殖池塘水体; F_{out} 为收获鱼种; P_{out} 为试验末人工湿地植物; FA 为人工湿地基质蓄积量; SA 为养殖池塘沉积物蓄积量; L 为养殖池塘渗漏; O 是其他

项,为未测出的氮、磷,包括沉淀池中沉积物蓄积、微生物同化吸收的氮、磷以及脱氮作用释放的 N_2 、 N_2O 、 NO 与 NH_3 的挥发等路径输出的氮; C_e 、 C'_e 分别表示试验初期和末期湿地基质中的氮、磷含量; W_e 表示湿地中基质质量; C_i 、 C'_i 分表表示试验初期和末期池塘沉积物的氮、磷含量; W_i 表示沉积物质量。

1.4 统计分析

本研究中数据以平均值±标准差(Mean±SD)表示,对养殖生物的单位体重与氮、磷含量做T检验;对植物各部位的干重做T检验;对各项氮、磷收支采用单因素方差分析,并进行Duncan检验;对水体营养盐浓度采用双因素方差分析;对水体污染物的去除率采用单因素方差分析,并进行Duncan检验,整理统计和图表绘制采用SPSS 25和Microsoft Excel 2010软件进行。

2 结果与分析

2.1 养殖生物、湿地植物的生物量与氮、磷含量

养殖生物的单位体重和氮、磷含量见表1。在试验末期,草鱼、鲫鱼与鳊鱼的体重较试验初期有显著增加,氮、磷含量则无显著差异。人工湿地植物茎叶与根系的质量与氮、磷含量见表2。在试验末期,再力花与梭鱼草的根系与茎叶的干重较试验初期显著增加。

2.2 人工湿地-养殖池塘循环水养殖系统的氮、磷收入

循环水养殖系统中氮、磷收入见表3和图2。氮、磷收入总量为水体、养殖生物、植物、降水、饲料各项氮、磷输入量的总和,其中对氮的贡献顺序依次为饲料>水体>降水>养殖生物>植物,对磷的贡献顺序依次为饲料>水体>养殖生物>降水>植物。饲料投入是循环水养殖系统氮、磷收入最主要的途径,其氮、磷输入量显著高于其他各项,占氮收入总量的65.61%,占磷收入总量的81.44%;其次为水体输入,

表1 放养和收获时养殖生物的体重及氮磷含量

Table 1 Weight, nitrogen and phosphorus content of farmed organisms during stocking and harvest

鱼类 Fish	养殖阶段 Culture phase	存活率 Survival rate/%	体重 Weight/g · ind ⁻¹	N(干重) N(dry weight)/%	P(干重) P(dry weight)/%
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	放养 Stocked	98.0	463.3±15.92 ^a	9.78±0.39	1.94±0.13
	收获 Harvested		1 933.0±62.18 ^b	9.25±0.80	2.16±0.21
鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	放养 Stocked	96.5	122.6±6.87 ^a	10.71±0.26	1.98±0.29
	收获 Harvested		358.2±14.55 ^b	10.94±0.28	2.12±0.22
鳊鱼 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	放养 Stocked	100	328.7±16.89 ^a	9.95±0.24	1.50±0.25
	收获 Harvested		1 365.5±42.73 ^b	9.78±0.37	1.37±0.34

注:同一列中同一种鱼上标 a, b 表示显著性差异($P<0.05$),无上标均为无显著差异($P>0.05$)。

Note: The superscript a and b of the same fish in the same column indicate significant difference ($P<0.05$), no superscript is no significant difference ($P>0.05$).

表 2 人工湿地植物的氮磷积累量

Table 2 Nitrogen and phosphorus accumulation in constructed wetland plants

植物 Plants	部位 Parts	试验开始 Beginning/g · ind ⁻¹			试验结束 Ending/g · ind ⁻¹		
		干重 ^①	氮 ^②	磷 ^③	干重 ^①	氮 ^②	磷 ^③
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	茎叶 ^④	7.35±1.25 ^a	0.16±0.02	0.04±0.01	17.11±1.84 ^b	0.34±0.02	0.08±0.00
	根系 ^⑤	6.62±0.98 ^a	0.11±0.01	0.03±0.00	21.49±3.05 ^b	0.36±0.03	0.09±0.00
再力花 <i>Thalia dealbata</i>	茎叶 ^④	34.03±2.92 ^a	0.72±0.04	0.07±0.02	254.11±44.17 ^b	4.84±0.45	0.55±0.12
	根系 ^⑤	45.24±3.18 ^a	0.46±0.02	0.07±0.01	278.26±37.94 ^b	3.00±0.54	0.50±0.09

注:同一行的干重上标 a,b 表示有显著性差异($P<0.05$)。

Note: The superscript a and b of the dry weight in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

分别占氮、磷含量收入总量的 19.42%、7.57%。在试验初期,养殖生物、植物贡献的氮、磷含量较低,植物所含氮、磷不足总量的 2%。

2.3 人工湿地-养殖池塘循环水养殖系统的氮、磷支出

循环水养殖系统中氮、磷支出见表 3、图 2。氮、磷支出总量为水体、养殖生物、沉积物蓄积、植物收获、基质蓄积、渗漏与其他的总和,“其他”为收入与支出总氮、总磷之差。其中对氮支出的贡献顺序依次为沉积

物蓄积>养殖生物>水体>其他>基质蓄积>植物收获>渗漏,对磷支出的贡献顺序为沉积物蓄积>养殖生物>基质蓄积>水体>植物收获>其他>渗漏。沉积物蓄积是氮、磷支出的最主要途径,养殖生物为次要途经,人工湿地基质和植物的蓄积共占氮、磷支出总量的 15.81%和 16.11%。在试验后期,养殖生物和植物所占氮、磷总量的百分比显著提升。

表 3 人工湿地-池塘循环水养殖系统氮、磷收支

Table 3 Nitrogen and phosphorus budgets in constructed wetland-pond recirculating aquaculture system

项目 Items	N 收入	P 收入	N 支出	P 支出
	N input/kg	P input/kg	N output/kg	P output/kg
水体 Water	14.65±1.39 ^c	1.02±0.29 ^b	13.37±1.19 ^c	0.94±0.09 ^{ab}
养殖生物 Farmedorganisms	4.96±0.43 ^b	0.93±0.09 ^b	20.00±2.21 ^d	4.24±0.58 ^c
植物 Plants	1.02±0.03 ^a	0.19±0.00 ^a	5.37±1.40 ^{ab}	0.82±0.10 ^{ab}
降水 Rainfall	5.31±0.39 ^b	0.36±0.04 ^a	—	—
饲料 Feed	49.49±0.38 ^d	10.97±0.12 ^c	—	—
基质蓄积 Filter medium accumulation	—	—	6.77±2.39 ^{ab}	1.40±0.29 ^b
沉积物蓄积 Sediment accumulation	—	—	21.96±4.53 ^d	5.82±0.96 ^d
渗漏 Leakage	—	—	1.79±0.18 ^a	0.12±0.03 ^a
其他 Others	—	—	7.53±2.78 ^b	0.38±0.12 ^{ab}

注:同一列上标不同字母表示不同项目的 N、P 含量差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference in N and P contents of different items ($P<0.05$), while the same letter indicate no significant difference($P>0.05$).

2.4 不同时期人工湿地污水净化效果

试验从 7 月运行至 11 月,跟踪监测了人工湿地的去污效果。整个试验期间水温在 12.4~32.4℃之间,7—9 月水温较高,11 月水温最低。不同时期下人工湿地进出水口总磷、氨氮和总氮浓度见图 3~5。经双因素方差分析,人工湿地对尾水的处理与季节水温的变化都对水体营养盐浓度有显著影响,其交互作用对总磷浓度有显著影响,对氨氮、总氮浓度无显著影响。在

同一时期下,人工湿地进水口总磷、氨氮和总氮浓度都显著高于出水口浓度。经单因素方差分析,不同时期下的水温对总氮、氨氮的去除率影响显著,对总磷的去除率无显著影响。

不同时期下人工湿地总磷去除率见图 3。在人工湿地运行的前中期,总磷的去除率逐步升高,去除率在 9 月达到了最高,最高去除率为 57.32%,而在人工湿地运行后期,去除率呈现下降趋势,在 7 月与 11 月取得

最低去除率,分别为 44.69%和 45.12%,显著低于最高时期。从去除率整体水平来看,平均去除率为 50.01%

的水平下,最低去除率仍有 44.69%,去除率的变化波动较小。

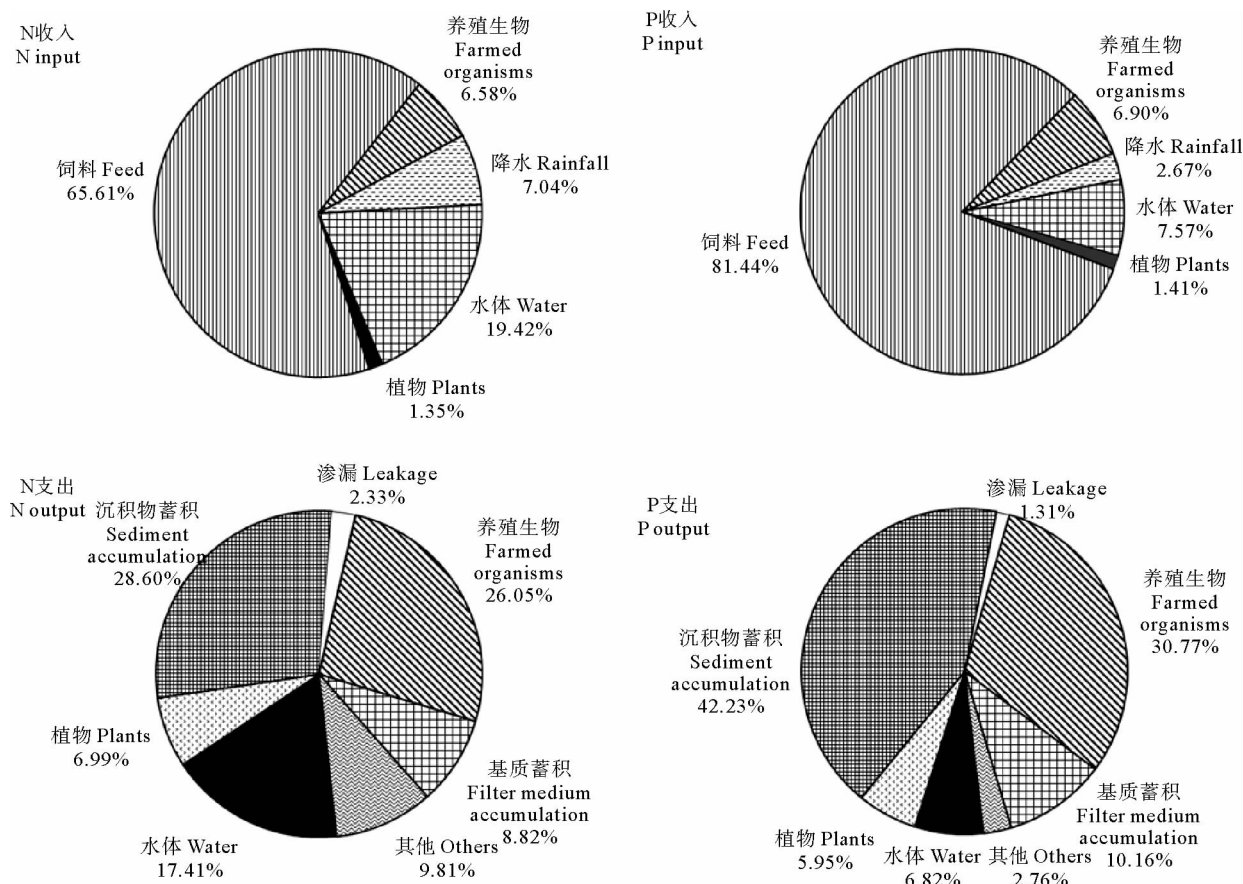
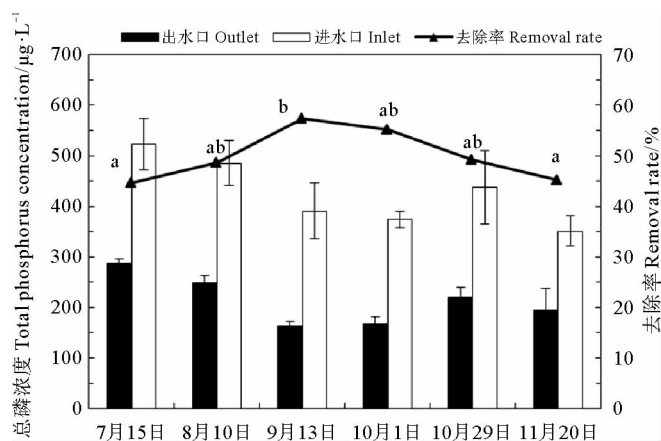


图2 各项在氮、磷支出中所占比例

Fig.2 The proportion of each item in the N and P budgets



(不同字母表示在不同时期的水温下去除率差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。下图同。Different letters indicate significant difference in removal rate between different water temperatures ($P < 0.05$), while the same letter indicate no significant difference ($P > 0.05$). The following figures are the same.)

图3 不同时期进、出水口总磷浓度和去除率

Fig.3 Total phosphorus concentration rate of inlet and outlet and removal rate in different periods

不同时期下人工湿地氨氮、总氮去除率见图4和5。不同时期湿地系统的氮元素都到一定程度的去除,

氨氮、总氮的平均去除率为 51.42%、56.96%,且去除率都在9月达到最高,总氮的最大去除率为 72.40%,氨氮的最大去除率为 66.32%,都显著高于最低时期。从去除率整体水平来看,氨氮、总氮去除率的变化波动较大,整体呈现先上升后下降的趋势。

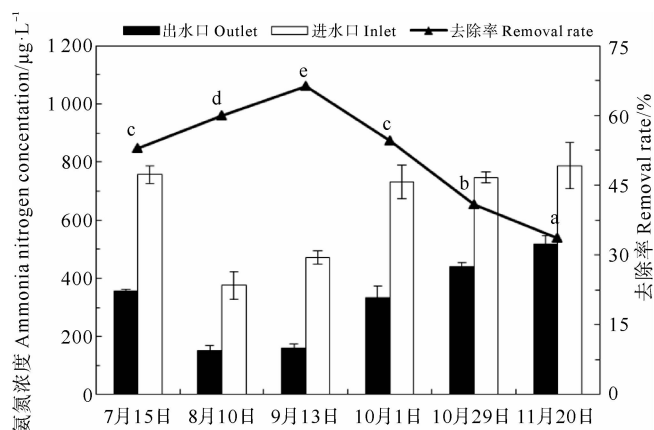


图4 不同时期进、出水口氨氮浓度和去除率

Fig.4 Ammonia nitrogen concentration rate of inlet and outlet and removal rate in different periods

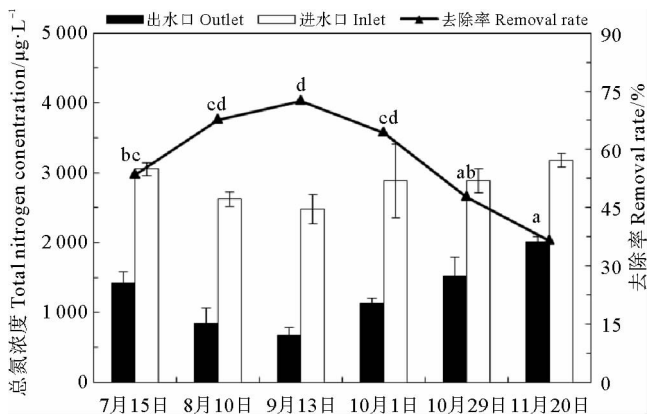


图 5 不同时期进、出水口总氮浓度和去除率

Fig.5 Total nitrogen concentration rateof inlet and outlet and removal rate in different periods

2.5 污水净化效果与人工湿地的蓄积状况

复合垂直潜流人工湿地对池塘养殖尾水的净化效果与蓄积状况可见表 4。人工湿地进水口处总磷平均浓度为 0.43 mg/L,出水口平均浓度为 0.21 mg/L,满足《淡水养殖尾水排放要求》一级标准(TP<0.5 mg/L);进水口总氮的平均浓度为 2.85 mg/L,出水口平均浓度为 1.27 mg/L,满足《淡水养殖尾水排放要求》一级标准(TN<3.0 mg/L)。试验期间,复合垂直潜流人工湿地植物的氮、磷蓄积量占到总支出的 5.64%和 4.54%,基质的氮磷蓄积量占总支出的 8.82%和 10.16%。

表 4 水体净化效果与人工湿地蓄积状况

Table 4 Wastewater purification effect and accumulation of constructed wetland

项目 Item	进水口平均浓度 Inlet concentration /mg·L ⁻¹	出水口平均浓度 Outlet concentration /mg·L ⁻¹	平均去除率 Removal rate /%	植物蓄积量 Plants accumulation /%	基质蓄积量 Substrate accumulation /%
氮 Nitrogen	2.85±0.24	1.27±0.45	56.96±12.46	5.64±1.60	8.82±1.87
磷 Phosphorus	0.43±0.06	0.21±0.04	50.01±4.76	4.54±0.75	10.16±2.19

3 讨论

3.1 人工湿地-养殖池塘的氮磷收支评价

在传统池塘养殖中,氮、磷的收入主要包括投饵、施肥、养殖生物、降水、换水和生物固氮作用等,在本试验中,试验期间未施肥、未换水,水体中具有固氮作用的蓝藻数量很少,因此不计入氮、磷收入中。据以往研究表明,饵料和肥料是对虾和鱼类等养殖系统氮、磷输入的最主要来源,水体的氮、磷输入为次要来源,降水、生物固氮作用等输入的氮、磷占收入总量的比例较小,一般都在 10%以内^[24]。常杰等^[25]在对虾、青蛤和江蓠的三元混养实验中,饵料占总收入氮、磷的 54.7%~75.5%和 81.6%~93.6%,水体占比为 16.1%~17.7%;陈东兴等^[26]对青虾等三种虾塘的氮、磷收支研究结果表明,饵料占总收入氮、磷的 68.32%~94.24%和 73.09%~91.12%,水体分别为 5.76%~26.75%、8.88%~24.17%。在本试验中,饲料投入的氮、磷占收入总量的 65.61%和 81.44%,水体输入分别占收入总量的 19.42%、7.57%,与上述研究结果相比差异较小。

在传统池塘养殖模式下,沉积物蓄积是氮、磷支出的最主要路径,通常占总支出量的 50%以上,其次是养殖生物、水体、渗漏等输出路径^[24]。残饵、粪便的沉积

使底泥营养盐富集,增加底部耗氧,并且作为池塘内源性污染,可通过交换作用向水体释放营养盐,其含量过多可能会导致水质富营养化,威胁用水安全^[27-28]。董佳等^[29]的三疣梭子蟹混养试验中,沉积物蓄积的氮、磷占比为 40.29%~65.89%和 76.11%~86.54%;高杉等^[30]在牙鲆、贝类的混养试验结果表明,沉积物蓄积的氮、磷占比为 69.6%~73.4%和 86.7%~93.5%。上述研究中不同养殖模式下进入池塘的氮、磷营养盐都只有少数被养殖生物吸收利用,大部分营养盐沉降在底泥中,其中磷在底泥中的支出多于氮的原因主要与其循环形式有关,磷元素为沉积性循环,大部分磷与矿物质离子形成沉淀,沉积在底泥中^[21]。本试验养殖生物的氮、磷含量占输出总量的 26.05%和 30.77%,沉积物蓄积的氮、磷占比为 28.60%和 42.23%,通过人工湿地基质和植物蓄积去除的氮、磷共占总量的 15.81%和 16.11%。与上述研究相比,本试验中被养殖生物吸收的氮、磷含量没有减少,人工湿地的基质、植物和微生物去除了部分未被有效利用的氮、磷,减少了其在沉积物中的蓄积。高毛林等^[31]的研究表明,复合循环水养殖塘通过湿地种植的水稻和陶粒去除的氮、磷占支出总量 26.18%与 26.97%,其底泥氮、磷累积量(21.08%、42.04%)低于对照塘,这与本试验的研究结果是一致的。试验表明与人工湿地结合构建的循环水

养殖系统能有效减少沉积物氮、磷沉积,降低池塘内源性污染爆发的可能性。

在本试验中,“其他”项的氮、磷收支量为令“收入=支出”后用差减法计算后得到的差值,其主要为通过氨的挥发、微生物的脱氮作用释放的 N_2 、 N_2O 、 NO 气体输出的氮与微生物同化吸收、人工湿地沉淀池中沉积物蓄积等路径流失的氮、磷^[22]。沉淀池中沉积物的来源为人工湿地进水过程中底泥的沉降,这一部分的底泥占沉积物的总量很少,因此未将其计入氮、磷支出的计算。在养殖池塘中,氨的挥发作用与微生物的脱氮作用十分微弱,在氮的支出中占有的比例极少^[32],可将因氨的挥发作用与养殖池塘微生物的脱氮作用流出的氮不计入氮的支出项目^[21,29]。且大量研究表明,人工湿地微生物的生物脱氮过程是湿地除氮的主要途径^[33-35],因此在本试验中,“其他”项输出的氮、磷主要为通过复合垂直潜流人工湿地微生物的脱氮作用释放的 N_2 、 N_2O 、 NO 与微生物同化吸收去除的氮、磷。

3.2 基于氮、磷收支的人工湿地污水净化效果评价

不同的人工湿地由于各组成要素的不同,其净化效果通常有所差异。于君宝等^[6]的美人蕉湿地单元对总氮、氨氮和总磷的净化效率可达到 90% 以上;周旭丹等^[36]的垂直流人工湿地对总氮、氨氮、总磷的去除率为 43.5%~82.3%、21.7%~42.3% 和 38.7%~73.5%。在本试验中,人工湿地对池塘尾水的总磷、总氮、氨氮的去除率分别为 44.69%~57.32%、36.35%~72.40%、33.72%~66.32%,具有显著地净化效果。

人工湿地脱氮除磷主要依靠植物、基质和微生物三者之间的协同作用来完成,而这三者在人工湿地对污水净化过程中贡献程度的大小可以通过其占氮、磷总支出的比例反映出来。因此可基于氮、磷收支,对人工湿地污水去除率的季节性变化的原因进行讨论、分析。在本试验中,人工湿地对池塘尾水总磷的平均去除率为 50.01%,最低去除率为 44.69%,最高去除率为 57.32%,不同的运行时期去除效果相对稳定,并呈现先上升后下降的趋势。基于本试验中氮磷支出的研究结果分析,其主要影响因素为基质与温度。基质蓄积是人工湿地除磷的主要路径,占支出总量的 10.16%,通过植物与微生物同化吸收去除的磷较少,为次要途经。由于基质吸附磷的能力主要与自身物理化学性质有关,如粒径、孔隙率、表面电性等^[37],受温度影响较小,因此不同时期下人工湿地除磷效果相对稳定。在谢涛等^[38]与陈永华等^[39]的研究中,人工湿地对磷的平均去除率分别为 96% 和 80.8%,在冬季总磷的去除率仍高达 92% 和 74.5%。但植物与微生物其同化、吸收能力受温度影响较大^[40]。温度适宜,植物、微生物生长繁殖迅速,对磷的同化吸收能力较强,去除率上升;气

温降低,植物生长速度减缓,部分植物枯萎、凋落,微生物活性降低,磷的去除效果逐渐下降,因此去除率呈现先上升后下降的趋势。

在本试验期间,人工湿地对氨氮的最高去除率为 66.32%,最低去除率为 33.72%,总氮的最高去除率为 72.40%,最低去除率为 36.35%,不同的运行时期波动较大,并呈现先上升后下降的趋势。基于本试验中氮磷支出的研究结果分析,这主要受温度因素的影响。人工湿地主要的脱氮途径为微生物的氨化、硝化与反硝化作用,植物同化吸收和基质的吸附、截留^[24]。在本试验中,“其他”项输出的氮主要为通过微生物的脱氮作用释放的 N_2 、 N_2O 、 NO 等形式流失的氮,这部分的氮约占输出总量的 9.81%,基质蓄积占输出总量的 8.82%,为次要途经,植物的同化吸收作用占输出总量的 6.99%,三者对人工湿地除氮贡献程度相近。

在试验前期温度适宜,微生物结构逐渐趋于稳定,氨化、硝化、反硝化作用强,且植物快速生长繁殖、基质吸附未达到饱和,因此系统对氮元素去除率逐步升高而在试验后期气温降低,微生物的生长繁殖活动受到减弱,植物根系泌氧作用降低,影响了微生物的硝化作用,人工湿地脱氮能力降低^[33],氮元素的去除率逐步下降,达到最低点,与最高去除率之间有显著差异。吴海明^[22]、周旭丹^[36]等的研究表明:在微生物菌落数目和酶活性最高的秋季,植物的氮磷积累量达到最大值,显著差异于其他季节,并在此时氮元素的去除率达最高值。这与本试验的研究结果是相一致的。

4 结论

(1) 人工湿地-池塘循环水养殖模式与传统池塘养殖模式相比,相对减少了氮、磷营养盐在池塘底泥中的蓄积量,降低了池塘内源性污染爆发的可能,并可通过湿地植物地上部分的收割、过饱和基质的更换等方式移除池塘内部分未被有效利用的氮、磷。

(2) 人工湿地对总磷、氨氮、总氮的平均去除率分别为 50.01%、51.42%、56.96%,对池塘尾水具有一定的净化效果。从氮、磷收支的研究结果分析,由于氮、磷去除路径的差异,氨氮和总氮的去除率受温度影响较大,总磷去除率受温度影响较小,总磷、氨氮、总氮的去除率都在试验期间内呈现先上升后下降的趋势。

参考文献:

- [1] 陈明海,唐汇娟,孙依依,等. 丰产鲫精养池塘氮磷的动态与收支[J]. 华中农业大学学报, 2015(2): 95-100.
Chen M H, Tang H J, Sun Y Y, et al. Dynamics and budgets of nitrogen and phosphorus in intensive Crucian carp culture ponds[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015(2): 95-100.

- [2] 孙云飞. 草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)混养系统氮磷收支和池塘水质与底质的比较研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Sun Y F. A Study of Nitrogen and Phosphorus Budgets, and the Comparison of Water and Sediment Quality Variation in Grass Carp Polyculture Ponds[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [3] 生态环境部. 中国生态环境状况公报(2018)[R]. 北京: 生态环境部, 2019.
Ministry of Ecology and Environment. China Ecological Environment Status Bulletin(2018)[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2019.
- [4] 生态环境部. 2018 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2019.
Ministry of Ecology and Environment. Bulletin on the State of Marine Eco-environment of China 2018[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2019.
- [5] 周桑扬, 杨凯, 吴晓芙, 等. 人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 717-724.
Zhou S Y, Yang K, Wu X F, et al. Advance in mechanism of removing heavy metals from wastewater by plants in wetlands[J]. Wetland Science, 2016, 14(5): 717-724.
- [6] 于君宝, 侯小凯, 韩广轩, 等. 多介质人工湿地对生活污水中氮和磷的去除效率研究[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 233-239.
Yu J B, Hou X K, Han G X, et al. Removal efficiency of multi-medium constructed wetlands on nitrogen and phosphorus in domestic sewage[J]. Wetland Science, 2013, 11(2): 233-239.
- [7] 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 等. 人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3430-3437.
Liu J, Yi N K, Xiong Y J, et al. Effect of constructed wetland configuration on the removal of nitrogen pollutants and antibiotics in aquaculture wastewater[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3430-3437.
- [8] 张毓媛, 曹晨亮, 任丽君, 等. 不同基质组合及水力停留时间下垂直流人工湿地的除污效果[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 292-299.
Zhang Y Y, Cao C L, Ren L J, et al. Research on pollutants removal effect of different combined substrate under different hydraulic retention time in vertical flow constructed wetlands[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 292-299.
- [9] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性及去污效果[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 916-924.
Chen Y H, Wu X F, Hao J, et al. The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 916-924.
- [10] 左倬, 陈煜权, 成必新, 等. 不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 953-960.
Zuo Z, Chen Y Q, Cheng B X, et al. Ecological characteristics of macrobenthic communities in SFWs of different hydrophytes and their relationships with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 953-960.
- [11] 刘永士, 臧维玲, 侯文杰, 等. 凡纳滨对虾生长及养殖池氮、磷收支随养殖时间的变化[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(2): 143-147.
Liu Y S, Zang W L, Hou W J, et al. Changes in growth of Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei*, and nitrogen and phosphorus budgets with culture time[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2013, 28(2): 143-147.
- [12] 孙国祥, 李薏, 刘鹰. 投喂负荷对循环水养殖大西洋鲑生长及氮、磷收支的影响[J]. 渔业现代化, 2014, 41(2): 1-6.
Sun G X, Li M, Liu Y. Effects of feeding load on growth, nitrogen and phosphorus budgets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems [J]. Fishery Modernization, 2014, 41(2): 1-6.
- [13] 张凯, 田相利, 董双林, 等. 三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和菲律宾蛤仔混养系统氮磷收支的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 44-53.
Zhang K, Tian X L, Dong S L, et al. Nitrogen and phosphorus budgets of polyculture system of *Portunus trituberculatus*, *Litopenaeus vannamei* and *Ruditapes philippinarum*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(2): 44-53.
- [14] 刘永士. 人工湿地除氮作用及其调控虾塘的氮收支状况[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Liu Y S. The Removal Performance of Nitrogen in Constructed Wetlands and Nitrogen Budgets in Shrimp Ponds[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [15] 王璐, 李冰, 孙盛明, 等. 复合养殖系统中浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 水生生态学杂志, 2015(5): 81-88.
Wang L, Li B, Sun S M, et al. Phytoplankton community structure and its relationship to water quality parameters in a compound aquaculture system [J]. Journal of Hydroecology, 2015(5): 81-88.
- [16] 雷旭, 李冰, 李晓, 等. 复合垂直流人工湿地系统中不同植物根际微生物群落结构[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1373-1381.
Lei X, Li B, Li X, et al. Rhizosphere microbial communities of three plants in vertical-flow constructed wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1373-1381.
- [17] 张成龙, 李冰, 侯治然, 等. 复合垂直流人工湿地中硝化和反硝化细菌的筛选及其特性分析[J]. 南方农业学报, 2019, 50(4): 736-744.
Zhang C L, Li B, Hou Y R, et al. Screening and characterization of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria in integrated vertical subsurface flow constructed wetlands[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(4): 736-744.
- [18] 余家辉, 李冰, 王林, 等. 人工湿地基质氧化还原酶与净水效果的相关性[J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 682-693.
Yu J H, Li B, Wang L, et al. Correlation between substrate oxidoreductase and water purification in constructed wetlands [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(3): 682-693.
- [19] 雷衍之. 养殖水环境化学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Lei Y Z. Aquaculture Water Environmental Chemistry Experiment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil Agrochemical Analysis (Third Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 董佳, 田相利, 董双林, 等. 三疣梭子蟹和凡纳滨对虾混养系统的氮磷收支的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(12): 16-24.

- Dong J, Tian X L, Dong S L, et al. Study on nitrogen and phosphorus budget in polyculture systems of *Litopenaeus vannamei* and *Portunus trituberculatus* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(12): 16-24.
- [22] 吴海明. 人工湿地的碳氮磷循环过程及其环境效应[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- Wu H M. Cyclic Processes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Constructed Wetlands and Its Environmental Effects[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [23] 南京大学. 沉积物总氮、总磷联合测定分析方法: CN200610085999. X[P]. 2006-11-29.
- Nanjing University. Analysis method of combined determination of total nitrogen and total phosphorus in sediment: CN200610085999. X[P]. 2006-11-29.
- [24] 刘峰, 李秀启, 王芳, 等. 养殖系统 N、P 收支及环境 N、P 负荷量的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 603-608.
- Liu F, Li X Q, Wang F, et al. Review on budgets and environmental loads of nitrogen and phosphorus in culture system[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(4): 603-608.
- [25] 常杰, 田相利, 董双林, 等. 对虾、青蛤和江蓠混养系统氮磷收支的实验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(增1): 33-39.
- Chang J, Tian X L, Dong S L, et al. An experimental study on nitrogen and phosphorus budgets in polyculture of shrimp, bivalve and seaweed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(Sup.1): 33-39.
- [26] 陈东兴, 杨超, 华雪铭, 等. 3 种虾类养殖池塘污染强度及氮磷营养物质收支研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(8): 132-136.
- Chen D X, Yang C, Hua X M, et al. Pollution fluxes and budgets of nitrogen and phosphorus nutrients in three types of shrimp culture ponds[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(8): 132-136.
- [27] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 166-172.
- Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 166-172.
- [28] 于海波, 高勤峰, 孙永军, 等. 刺参-对虾复合养殖系统主要营养盐动态变化及循环过程的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(9): 25-32.
- Yu H B, Gao Q F, Sun Y J, et al. Dynamic change and circulation of nutrients in polyculture system of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(9): 25-32.
- [29] 董佳. 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)池塘混养系统结构优化和氮磷收支的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Dong J. Studies on the Optimization and Nitrogen and Phosphorus Budgets of Polyculture System of *Portunus trituberculatus* Ponds [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [30] 高杉, 吴立新, 姜志强, 等. 牙鲆和贝类混养池塘中氮、磷收支的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(3): 203-208.
- Gao S, Wu L X, Jiang Z Q, et al. Nitrogen and phosphorus budgets in a pond with polyculture of Japanese flounder with shellfish [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2011, 26(3): 203-208.
- [31] 高毛林. 新型组合湿地在池塘养殖中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- Gao M L. Application Effect of the New Integrated Constructed-wetland in Intensive Pond Aquaculture[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [32] 王申, 高珊珊, 蒋力, 等. 水产养殖系统氮磷营养盐收支及其生态影响研究[J]. 水产学杂志, 2018, 31(5): 50-57.
- Wang S, Gao S S, Jiang L, et al. A review of budget and ecological impact of nutrients nitrogen and phosphorus in an aquaculture ecosystem[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2018, 31(5): 50-57.
- [33] 李志杰, 孙井梅, 刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展[J]. 工业水处理, 2012, 32(4): 1-5.
- Li Z J, Sun J M, Liu B S. Mechanisms of denitrification and dephosphorization by constructed wetland and its research progress [J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(4): 1-5.
- [34] 钟成华, 李杰, 邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 141-146.
- Zhong C H, Li J, Deng C G. Advances in the study of nitrogen and phosphorus removal mechanisms in constructed wetlands[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(4): 141-146.
- [35] A W Mayo, J Mutamba. Modelling nitrogen removal in a coupled HRP and unplanted horizontal flow subsurface gravel bed constructed wetland[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(11/16): 673-679.
- [36] 周旭丹, 孙晓刚, 赵春莉, 等. 人工湿地植被根区土壤性质及其净化水质季节效应分析[J]. 生态环境学报, 2015(6): 1043-1049.
- Zhou X D, Sun X G, Zhao C L, et al. Research on enzymatic activities in the rhizosphere of constructed wetland plants and purification of wastewater in seasonal[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015(6): 1043-1049.
- [37] 张镭, 刘福兴, 蒋媛, 等. 人工湿地基质去除污染物的作用机制研究进展[J]. 上海农业学报, 2019, 35(2): 121-126.
- Zhang L, Liu F X, Jiang Y, et al. Advance in researches on mechanism of pollutants removal conducted through substrates of constructed wetland[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(2): 121-126.
- [38] 谢涛, 海热提, 周有. 垂直流-潜流式人工湿地技术在北京流域污染治理中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(4): 120-123.
- Xie T, Hai R T, Zhou Y. Study on the application of vertical-subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment in the river basin of Beijing [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(4): 120-123.
- [39] 陈永华, 吴晓英, 郝君, 等. 人工湿地植物应用现状与问题分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(31): 88-92.
- Chen Y H, Wu X F, Hao J, et al. Current situation and problems analysis of application on constructed wetland plants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(31): 88-92.
- [40] 王加鹏, 崔正国, 周强, 等. 人工湿地净化海水养殖外排水效果与微生物群落分析[J]. 渔业科学进展, 2014(6): 1-9.
- Wang J P, Cui Z G, Zhou Q, et al. Removal effect of mariculture wastewater and analysis of microbial communities in constructed wetlands[J]. Progress In Fishery Sciences, 2014(6): 1-9.

An Evaluation of Purification Effect of Constructed Wetland-Pond Recirculating Aquaculture System Based on Nitrogen and Phosphorus Budgets

TAO Ye¹, ZHU Jian^{1,2}, LI Bing^{1,2}, HOU Yi-Ran², FENG Gong-Cheng¹

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: The combination of recirculating pond aquaculture and constructed wetland is a new idea considering both aquaculture production and wastewater purification. Studying the effects of sources and sinks of nitrogen and phosphorus in the combined system has guiding significance to the parameters. In this study, we determined the flow and budgets of nitrogen and phosphorus in the integrated vertical-flow constructed wetland-pond recirculating aquaculture system, and evaluated the purification effect of the constructed wetland on the pond wastewater through N and P budgets. The results showed that feeding is the most important way for the N and P inputs of the system within the five-month experimental period, accounting for 65.61% and 81.44% of the total inputs, respectively. The second was the N and P in water layer. At the beginning of experiment, the biomass of farmed organisms and wetland plants was low, and contributed little to the N and P inputs of the system. Sediment accumulation was the most important way of N and P outputs, accounting for 28.60% and 42.23% of the total outputs, and the second way was the harvest of farmed organisms, which accounted for 26.05% and 30.77% of the total N and P outputs, respectively. The nitrogen and phosphorus accumulated by plants and substrates in the constructed wetland accounted for 15.81% and 16.11% of the total outputs, and less N and P were lost through leakage of pond sediment. The removal rates of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP in constructed wetlands varied between 33.72% and 66.32%, 36.35% and 72.40%, and 44.69% and 57.32%, respectively. The removal rates of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN were significantly affected by water temperature. The constructed wetland showed a significant purification effect on pond wastewater. It removed nitrogen and phosphorus that were not effectively used in the system through plant harvesting and substrate removal, thus reduced the accumulation of endogenous nitrogen and phosphorus in pond. It has good ecological benefits and is a green and sustainable aquaculture mode.

Key words: pond recirculating aquaculture; constructed wetland; purification effect; nitrogen and phosphorus budgets; sediment

责任编辑 朱宝象