

# 地表潜流湿地技术在水产养殖尾水处理中的应用研究

天津农学院水产学院 李秉道 季延滨

**摘要:** 本试验通过构建地表潜流湿地与对照养殖模式来进行对半咸水池塘养殖尾水处理模式下的水质指标及微生物多样性进行分析。于2021年5—9月每月两次对实验池塘取样理化指标,包括TN(TotalNitrogen)、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、TP(totalphosphorus)、正磷酸盐、COD(ChemicalOxygenDemand)的监测,调查浮游生物的种类、数量以及对养殖水体、底泥、毛刷和池底的微生物多样性进行分析。通过高通量测序技术,又称下一代测序(Next-generationsequencing,NGS)分析发现具有相似环境特性和功能的湿地单元之间具有较高的微生物群落结构相似性,通过微生物群落的种类运算数量分类单位(operationaltaxonomicunit,OTU)更好地揭示了微生物群落结构及处理效能之间的关系。潜流湿地模式下养殖池塘的TN由从5.27mg/L下降到0.87mg/L,去除率达83.5%,TP由0.4672mg/L下降到0.0753mg/L,对总氮总磷的净化具有明显的净化效果。微生物优势种转变为变形菌、绿弯菌、厚壁菌、放线菌。

**关键词:** 地表潜流;理化指标;尾水处理;微生物群落

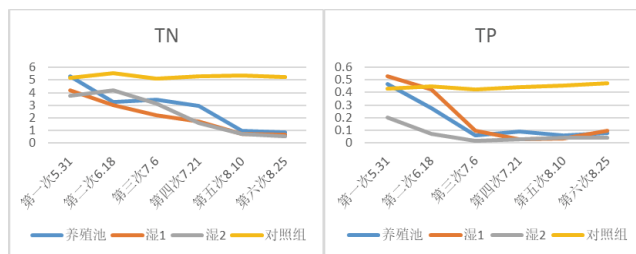
中国沿海一直是三大虾种凡纳滨对虾(Litopenaeusvannamei)产量最大的地方,大规模感染的时有发生是由于过度使用抗生素和化学药物造成的,这降低了水生动物的免疫力,并增加了它们对疾病的易感性,这是水产养殖业务的密集和广泛发展的结果。在传统养殖模式中,养殖密度不合理、饲料饲养不科学、药物使用不规范、清洗和池塘维护不及时等问题频繁出现,限制了养殖效益。特别是尾水中含有大量的有机物。处理起来都很有挑战性。如今,水产养殖产量占全国水产总产量的70%以上,接近6000万吨。因此,如何有效排放养殖尾水,如何可持续利用养殖尾水,是解决养殖尾水问题的关键。

目前,物理、化学和生物净化是水产养殖废水的三种主要净化方法。地表潜流湿地是处理养殖尾水的主要方法,利用水产经济蔬菜种植开展地表潜流湿地技术是研究的热点。异质恢复技术主要集中在地下流湿地模型的建立和不同湿地净化区水产养殖径流的回收利用。实际生产中的养殖尾水处理多涉及池塘净化、设施净化、湿地净化等。池塘净化的优点是建造成本低,投入成本低,但缺点是净化效果有限,净化工厂可能造成局部污染。高效、占地面积小、成本高是设备净化的优点。人工湿地是一个复杂的多功能生态系统,利用物理过滤、化学吸附、沉淀、植物过滤和微生物作用,可有效去除养殖尾水中的N、P等营养成分。还能去除部分BOD、COD、SS,净化能力大。

## 二、理化指标变化概况

在2021年6—10月对地表潜流湿地及对照组池塘取样理化指标的监测进行定性、定量对比。分设采样点“养殖池”3处、“湿地区1”1处、“湿地区2”1处、“对照组”3处。试验期间养殖池总氮含量变化如图所示,养殖池通过潜流湿地尾水净化处理,总氮含量呈下降状态,从5.27mg/L下降到0.87mg/L,去除率达

83.5%,对总氮具有明显的净化效果。养殖池总磷含量变化如图所示,养殖池总磷含量变化从0.4672mg/L下降到0.0753mg/L,总磷含量从7月6日到8月25日有所波动。湿一从0.53mg/L下降到0.095mg/L。湿二从0.2mg/L降至0.038mg/L。通过地表潜流湿地尾水处理技术,养殖池中TP的去除率为84%,可以看出其对于TP的去除效果较为显著。

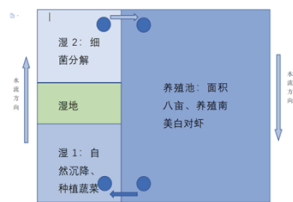


## 三、材料与方法

### (一) 试验地点、实验设计及采样方法

试验在天津市通洋农业科技有限公司进行,该基地水源充足,进排水通畅,供电充足,通讯交通方便,面积18亩,分为人工地表潜流湿地和对照组在两个不同养殖区域进行。

养殖池塘(地表潜流湿地)面积:10亩水面,养殖区面积:8亩水面,平均水深1.8m;净化区面积:2亩水面,平均水深1.8m。其中净化区由养殖池进入,依次悬挂了生态基、种植了空心菜、水芹菜、海马齿菹、绿萝、芦苇。在净化区内部达到水自流,节省成本。净化区与养殖区通过两个水泵实现水循环,见下图。养殖池塘在2021年6月放入体长1.2cm的标粗虾苗2.2万~2.8万尾/亩,共计250000尾。对照组养殖区域面积:8亩水面,养殖池塘面积:平均水深1.8m。养殖池塘在2021年6月放入1.2cm的标粗虾苗30000/亩,共计250000尾。



连续多月对地表潜流湿地及对照组池塘取样理化指标的监测和微生物的多样性分析，进行定性、定量对比监测。分设多个采样点取平均值。在每个采样点用采水器采集，取水样 1L。浮游动、植物样品立即用鲁戈氏液 15mL 固定，加入甲醛溶液保存。固定后的水样摇匀倒入 1L 沉淀器中，充分沉淀后，用虹吸管慢慢吸去上清液。吸至澄清液至留下含沉淀物的水样 30mL，放入 50mL 的定量样品瓶中，定容到 50mL。

### (二) 相关指标的测定方法

1. 浮游生物计数。1L 水样中浮游植物的个数（密度）可用下列公式计算：

$$N = \frac{C_s}{F \cdot F_s} \cdot \frac{V}{V_0} \cdot P_s$$

单位体积浮游动物的数量按下式计算：

$$N = \frac{V_s \cdot n}{V \cdot V_s}$$

2. 化学指标测定方法。水样的理化指标主要包括 pH、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐等。水样的 pH 手持 pH 计）现场测定，氨氮（纳氏试剂比色法，HJ535-2009）、亚硝酸盐（分光光度法，GB7493-87）、硝酸盐（紫外分光光度法，HJ-T346-2007）、总磷（钼酸铵分光光度法，HJ636-2012）等指标保存带回实验室测定。

水体总氮和总磷去除率的计算公式为： $\rho = (\rho_i - \rho_e) / \rho_i \times 100\%$  (1)

公式 (1) 中， $\rho$  (%) 为总氮和总磷的去除率； $\rho_i$  (mg/L) 为处理前水体中的总氮和总磷质量浓度； $\rho_e$  (mg/L) 为处理后水体中的总氮和总磷质量浓度。

3. 微生物多样性的测定方法。用于微生物群落结构分析的水样低温保存带回实验室后，水样用 0.45nm 和 0.22nm 的滤膜进行抽滤处理放于冰箱冷冻保存。

微生物群落结构及多样性通过 16S rRNA 基因高通量测序分析。

4. 数据分析方法。利用软件进行数据处理，绘图。

### 四、浮游动植物种类组成、密度、生物量

在 6—8 月的三次采样中养殖池共观察到 7 门 13 属（种），湿一共观察到 6 门 13 属（种），湿二共观察到 6 门 13 属（种）。湿一中绿藻种数最多为 26.4%，养殖池、湿二中分别为 23.1%，9.7%。

表 1 原位池各浮游植物丰度 (10<sup>5</sup> 个/L)

门	编号	中文名	6 月			7 月			8 月		
			养殖池	湿一	湿二	养殖池	湿一	湿二	养殖池	湿一	湿二
甲藻门	1	多甲藻	3.4	4.2	2.7	0.74	0.89	0.9	1.42	1.36	1.74
绿藻门	1	栅藻	123.2	63.2	26.6	124	18.48	128.8	22.32	3.36	14.04
	2	空星藻	53.8	43	37	31					
	3	空球藻		15.3					3.84		
	4	四角藻					0.6				
	5	卵囊藻					3.2			2.6	
蓝藻门	1	蓝纤维	1.6	1.2					0.48		0.6
	2	微囊藻	9730	7560	3740		1407		1270	2678	2376
	3	颤藻				224.4					
	4	平裂藻				9.9					6
	5	色球藻							13.8		6.48
裸藻门	1	扁裸藻		1.2		1.32					
	2	裸藻				4.62				0.6	
隐藻门	1	隐藻			4.2	267.3	1.32				
硅藻门	1	小环藻			5.8	10.7	2.04	4.4	13.08	10.32	6.96
	2	舟形藻					1.08	1.2			
	3	菱形藻					0.48		5.88	0.48	9.96
	4	异端藻									2.04
	5	桥弯藻									2.4
	6	针杆藻					0.94				0.72

在 5 月 31 日后开始正式启用自循环，微囊藻大部分死亡，丰度骤减。7 月 7 日养殖池以隐藻、颤藻、栅藻为优势种，浮游植物丰度为  $74.22 \times 10^6$  个/L。7 月 7 日后水体中由于投喂饵料，残饵粪便大量积累，导致水体富营养化，开始爆发微囊藻，丰度上升，8 月 10 日浮游植物丰度为  $153.6 \times 10^6$  个/L。

表 2 浮游植物密度和生物量统计

采样点	6 月		7 月		8 月	
	密度 (10 <sup>5</sup> 个/L)	生物量 (mg/L)	密度 (10 <sup>5</sup> 个/L)	生物量 (mg/L)	密度 (10 <sup>5</sup> 个/L)	生物量 (mg/L)
养殖池	10365	62.5547	772.86	86.81	1813.08	12.13
湿一	115.2	4.75	1647.6	9.78	4338.24	24.70
湿二	42	6.41	135.2	3.61	2427.24	15.42

表 3 不同月浮游植物优势种密度占总密度比例

采样点	主要优势种及其占相应采样点浮游植物总密度百分比		
	6 月	7 月	8 月
养殖池	蓝藻门 98.46%	隐藻门 44.41%， 蓝藻门 30.32%， 绿藻门 23.06%	蓝藻门 97.42%
湿一	绿藻门 97.92%	蓝藻门 98.32%	蓝藻门 99.58%
湿二	绿藻门 63.33%， 硅藻门 13.81%， 甲藻门 12.86%， 隐藻门 10%	绿藻门 95.27%	蓝藻门 98.43%

在 6 月、8 月两次采样中，原位池共计发现浮游动物 8 种。其中枝角类 4 种，桡足类 1 种，轮虫 3 种。

表 4 原位池各浮游动物丰度 (个/L)

门	编号	中文种名	标本					
			6 月			7 月		
			养殖池	湿一	湿二	养殖池	湿一	湿二
桡足类	1	剑水蚤	900			2400	3000	1800
枝角类	1	隆线蚤	600		900			
	2	大型蚤	1200		300			
	3	裸腹藻	300		1200			
	4	无节幼体	300	300		600	2700	300

轮虫	1	壶状臂尾轮虫	300	300		3000	3900	1500
	2	萼花臂尾轮虫			300			300

表5 浮游动物密度和生物量统计

采样点	6月		7月	
	密度 (10 <sup>5</sup> 个/L)	生物量 (mg/L)	密度 (10 <sup>5</sup> 个/L)	生物量 (mg/L)
养殖池	2276	453	5301	136.5
湿一	600	30.06	9600	360.78
湿二	2700	240.06	3900	84.36

## 五、分析、讨论与结果

(一) 分析讨论地表潜流湿地尾水处理模式对水质理化指标的影响

实验结果表明, 地表潜流湿地养殖尾水净化后的排放指标均符合国家标准, 各时段水质指标均符合国家标准。参考鱼蛤混合养殖湿地模型对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和TN的平均去除率分别为38.05%、26.93%、34.75%、29.66%和32.49%。典型的TP去除率可高达41.21%。根据朱晓荣等建立的沉流湿地模型对TN、TP和COD的去除率分别为80.8%~90.9%、78.95%~88.18%和23.20%~27.24%。与未进行湿地处理的对照池塘相比, 这些速率显著降低, 它也相似于本次试验的结果。由此可见, 种植水芹菜和空心菜, 水芹菜, 海马齿苋, 绿萝, 芦苇等植物可以净化养殖废水。为了保证凡纳滨对虾养殖的高效、长期生长, 在凡纳滨对虾养殖过程中, 水体的理化指标应保持在正常范围内。这样也可以使养殖环境处于良好的状态, 防止虾类疾病的传播。三株植物之间的距离很近, 减少了植物间的竞争, 使净化效果最大化, 这可能是原因所在。这种安排最大限度地利用了可用的水域。微生物聚集体中的细菌和藻类主要负责吸收和转化养殖水中的含氮化学物质。Lezama等研究了生态基质对凡纳滨对虾养殖池中虾幼虫发育和水质的影响, 发现生态基质可以大大降低养殖池中氨氮浓度。其在对养殖池水进行异位净化时, 认为生物底物可以大大降低氨氮浓度。为了增加养殖水体中氮的转化, 共同影响养殖水质参数, 各种微生物群落可能在养殖系统中相互协作。生态基地可以悬挂在养殖池塘中, 以去除磷和氮污染物。生态基地有两种方法可以去除养殖水中的磷。生态基础、载体表面的附着生长、细菌、藻类和养殖用水对磷盐作为载体基质具有很强的亲和力。它们可以迅速吸收盐中的磷, 并将其转化为盐的组成部分。相比之下, 生态基面覆盖着大量磷的高效积累, 在氧气充足的条件下, 磷在水体中大量积累的磷可以被吸入体内, 并将其同化或转化为一个稳定的适合自身结构的矿化组织, 使鱼虾组织的磷含量增加。细菌和藻类是食用后的顶级生物食物链, 最终被用于鱼

虾的身体。生态基础可以维持一定的恒定处理影响, 同时也可以成功地降低养殖系统水中TP的浓度。研究发现, 池塘底泥与养殖水体经历了氮磷吸附与释放的动态平衡过程。沉积物中氮和磷的释放受到多种变量的影响, 包括溶解氧、pH值、温度和水的扰动。确切的原因还需要研究调查, 因为生物基础对南美白对虾繁殖池底部沉积物中的氮和磷水平没有明显的影响。

水产养殖尾水修复的流行趋势是植物组合, 为了减少植物间的竞争, 适当混合植物的数量, 提高养殖尾水的净化能力, 应选择具有不同生态位的植物。水生植物主要依靠生长在植物根区表面和相邻区域的微生物的附着来去除污水中的COD、TN和TP。为了为微生物的生长创造一个更好的环境, 应该选择有更多生根的水生植物。此外, 植物化感作用的存在可能会影响附近植物的生理运作、连接的微生物群落的组成和运作等因素, 因此很有必要加以考虑。

(二) 地表潜流湿地养殖尾水处理技术对池塘微生物多样性的影响

湿地的基本要素是基质, 基质可以提供稳定的培养基和适宜植物生长的环境, 同时也为微生物提供大量的附着位点。理论上, 其物理吸附也具有一定的脱氮作用, 部分氨氮可能会立即从基质表面挥发到大气中。当污水进入人工湿地时, 基质对不溶性物质进行过滤拦截。一些污染物被吸附在每一层基质填料的表面。由于不同基质对氮吸附的影响差异很大, 选择基质填料以提高脱氮率是有意义的。如沸石的脱氮效果优于细砂, 氨氮去除率高, 底物的比表面积大, 是微生物黏附和污染物高效吸附的理想材料。底物吸附氮的能力也受到限制, 吸附过程是不可逆和不可持续的。然而, 人工湿地组合基质对氮的吸附能力大于单一基质, 形成了清晰的微生物分层, 微生物种类更丰富。这大大提高了脱氮的有效性。根据早期的研究, 变形菌主要是在无氧条件下活动, 其中大多数与C循环、N循环和P循环有关。变形菌门对去除氮和磷的生物过程有巨大影响; 这种影响可以被进一步理解和利用。拟杆菌门是异养细菌, 可以利用水中的硝酸盐和氮以及降解碳水化合物, 它们与反硝化有关。大型污水处理设施经常含有厚壁菌门, 这是一种异养革兰氏阳性细菌, 具有从环境中去除氮的能力。当溶解氧不足时, 可用硝酸盐去除氮。这是通过硝酸盐还原过程实现的, 这使得人工湿地中的微生物更容易接受氮的转化, 显著提高了氮的去除效率。放线菌与清除有机碎片有关, 可以加速植物和动物残骸的降解。细胞内聚集体具有高度的适应性和竞争力, 可以在缺乏营

养、碳、氮和磷来源有限的环境中发展。根据研究，低营养浓度可以显著增加放线菌的丰度。李振灵等利用水平潜流人工湿地处理校园污水的研究表明，小球藻是兼性厌氧生物，在局部潜流湿地中其丰度较高。各底物层和植物根系样品中微生物多样性指数和物种丰度的变化规律与植物根系和各底物层样品的微生物组成基本一致，但各底物层样品中微生物丰度的比例略有不同。

反硝化是人工湿地脱氮最关键的途径。在缺氧条件下，硝酸盐氧化，释放分子氮和气体反应产物从人工湿地中逸出。即使不断加氮，也不会发生氮汇饱和现象。为了它们自己的生长和繁殖，兼性异养细菌称为反硝化菌氧化和分解有机物质。硝化细菌通常在富氧环境中被发现，而反硝化细菌通常在兼性和厌氧条件下被发现。空气中的氧气可以通过植物通风纸编织到达植物根系，扩散到根系表面，在根系周围形成氧化层（根际氧化带），有利于硝化细菌的快速增殖。这是因为氧化和还原微环境共存于浮床植物根际。然而，由于植物叶片的存在和氧化带以外的夜间呼吸作用，水中的溶解氧含量略低，这鼓励了反硝化细菌的生长。因此，漂浮床植物系统中富氧和厌氧微环境使几种氮循环细菌共存。结果表明，浮床植物系统能显著改变池水细菌、真菌数量，实现不同生理类群微生物在同一水体中共存，促进水体氮循环，增强水体自净功能，达到净化水体的目的。

### （三）结论

经过处理之后的养殖尾水，各理化指标显著降低且可以达到排放标准，通过种植空心菜、水芹菜、海马齿苋、绿萝、芦苇，可更好地吸收养殖尾水中的含氮化合物、南美白对虾及毛刷对养殖尾水中的有机质、饲料残余可起到较好的吸附、去除作用。地表潜流湿地尾水处理模式使微生物和藻类的多样性增加，池塘底部的泥浆含有大量硝化和非硝化细菌的混合，这有助于更有效地固氮。由于本实验凡纳滨对虾在养殖水体中的增殖是健康状态，因此本研究中的微生物多样性可以看作是健康养殖模式下微生物区系多样性的映射。因此，水产养殖业可以从尾水处理和谨慎的循环利用中获益更多。

#### 参考文献：

- [1]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.
- [2]赖巧晖, 张浩, 刘治鹏. 不同植物配置下人工湿地微生物群落特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(05):89-94+99.
- [3]彭建, 周凡, 贝亦江等. 南美白对虾养殖尾水生态处理技术研究进展[J]. 河北渔业, 2019(11):53-56.
- [4]王兴强, 马柱, 董双林. 凡纳滨对虾生物学及养殖生态学研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004(04):94-100.
- [5]黄世明, 陈献稿, 石建高等. 水产养殖尾水处理技术现状及其开发与应用[J]. 渔业信息与战略, 2016, 31(04):278-285

[6]GangYang, ShaoQingJian, HongzhongCaoetal.Changesinmicrobiotaalongtheintestineofgrasscarp(Ctenopharyngodonidella):Community, interspecificinteractions, andfunctions[J].Aquaculture, 2018.

[7]SangkiChoi, WoohyungSim, DongJangetal.Antibioticsincoastalacquaculturewaters:Occurrenceandeliminationefficiencyinoxidativewatertreatmentprocesses[J].JournalofHazardousMaterials, 2020, 396.

通讯作者：季延滨。

基金项目：天津市科技计划项目（29YFZCSN00430）。