

3种微藻对海水集约化对虾养殖尾水氮磷的去除效果

潘志恒^{1,2}, 鲁敏^{1,2}, 曹煜成², 徐煜², 徐武杰², 胡晓娟², 苏浩昌², 文国樑^{1,2}

(1. 浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 基于对虾生物絮团集约化养殖尾水含有高浓度硝态氮和磷酸盐的特征, 比较分析钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)、牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、盐藻(*Dunaliella* sp.) 3种微藻在配制尾水中的存活生长状况及其对无机氮磷的去除效果, 以期筛选出适宜的微藻用于后续尾水净化技术。采用显微镜计数法测定藻细胞密度, 国标法测定总无机氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和磷酸盐的含量。结果显示, 钝顶螺旋藻在试验前后的藻细胞密度变化不大($P>0.05$), 约为 3.32×10^6 个/mL和 5.88×10^6 个/mL; 牟氏角毛藻和盐藻细胞密度有明显增加($P<0.05$), 分别从初始的 4.00×10^4 个/mL和 2.50×10^5 个/mL升高至试验结束时的 1.66×10^6 个/mL和 1.06×10^7 个/mL。经过16 d试验, 钝顶螺旋藻组对硝态氮和总无机氮去除率分别为79.60%和46.06%, 显著高于其他各组($P<0.05$), 第8天时对磷酸盐的去除率可高达98.55%; 牟氏角毛藻组16 d的磷酸盐去除率为98.25%, 显著高于其他各组($P<0.05$)。研究表明, 3种微藻均可在对虾养殖尾水环境中存活, 且对尾水氮磷具有较好的净化效果。

关键词: 养殖尾水; 钝顶螺旋藻; 牟氏角毛藻; 盐藻; 氮磷营养盐

中图分类号: X506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)05-0149-07

水产品已经成为我国重要的蛋白质来源之一, 根据《2021中国渔业统计年鉴》, 2020年全国水产品总产量为6 549万t, 其中养殖产量占总产量的79.8%, 表明水产养殖已成为水产品供给的最主要途径。生物絮团技术(Biofloc technology, BFT)可以利用水体中硝化菌的硝化作用将养殖水体中有害的氨氮和亚硝态氮转化成相对无害的硝态氮, 控制其含量在较低范围(Ray et al, 2010; 徐武杰, 2014); 同时, BFT养殖模式还可为养殖对象提供饵料蛋白源并提高饲料利用率(罗婉仪等, 2021)。然而, 随着BFT集约化养殖到中后期, 水体富集大量硝态氮和磷酸盐(范鹏程等, 2019); 在凡纳滨对虾精养模式中, 高达95%的磷输入来自饲料投放(王申等, 2018)。如果含

有大量无机氮磷的养殖尾水直接排放, 必将对周边水域生态环境造成不良影响(刘庆辉等, 2019)。生物处理集约化养殖尾水相较于物理法、化学法具有成本低、效率高、不易形成二次污染等优点。运用生态学技术高效去除养殖尾水中富集的氮磷, 可以避免其直接排放造成的环境富营养化问题。

微藻生长繁殖快、易于培养, 且对环境有较强适应能力(刘磊等, 2014)。目前已有不少利用微藻处理养殖尾水的相关报道(Guo et al, 2013; Ansari et al, 2017; 刘盼等, 2018; 刘庆辉等, 2021)。钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)对水体盐度的适应范围广, 可在海水中生长存活(刘婷, 2018); 牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)细胞个体不大, 容易形成藻细胞群体, 可在25~35℃的沿岸半咸水环境下迅速繁殖(金彬明和曾国权, 2004); 盐藻(*Dunaliella* sp.)细胞适盐范围广, 可在接近淡水(<0.1 mol/L)甚至饱和盐水(>5 mol/L)环境中生存。有研究表明, 钝顶螺旋藻、盐藻和牟氏角毛藻净化处理一般的养殖尾水均可达到较好效果(叶志娟, 2006; 叶志娟等, 2006; 胡海燕, 2007; 慧敏, 2013)。微藻对养殖尾水氮磷去除的潜力巨大, 但此前的研究水体大多为较低氮磷浓度的尾水(刘林林等, 2014; 刘梅等, 2018); 而在高浓度硝态氮、磷酸盐的集约化养殖尾水中, 鲜见微藻生长生存潜力及其对高密度氮、磷净化效果的研究。本研究通过比较3种

收稿日期: 2022-01-13 修回日期: 2023-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFD0900401); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2021SD08); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD57); 财政部和农业农村部—国家现代农业产业技术体系(CARS-48); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建专项资金(2023KJ149)。

作者简介: 潘志恒, 1996年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为养殖尾水菌藻净化。E-mail: 193256166@qq.com

通信作者: 文国樑, 1978年生, 男, 研究员, 主要从事对虾健康养殖研究。E-mail: guowen66@163.com

不同门类的微藻在BFT集约化养殖尾水中的生长状况及对高浓度无机氮磷的去除效果,筛选出效果较优的微藻,可为后续提升集约化养殖尾水处理技术,实现生物净化及资源再利用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的钝顶螺旋藻、牟氏角毛藻和盐藻均由中国水产科学研究院南海水产研究所提供。

BFT养殖尾水取自广东省陆丰市某养殖场的凡纳滨对虾BFT零换水养殖系统(1 000 m³);该系统中放养体长10 mm的虾苗,密度为650尾/m³;养殖水温31.1℃、盐度20、溶解氧4.48 mg/L、pH 7.35、生物絮团沉降体积为10.5 mL/L。试验用BFT采自集约化养殖58 d的尾水,试验设置为4组,分别为钝顶螺旋藻组(SP)、盐藻组(DU)、牟氏角毛藻组(CM)和对照组(CK);初始氮磷浓度见表1。试验前将养殖尾水过滤灭菌处理,然后用过滤灭菌的天然海水、磷酸二氢钾溶液将养殖尾水中的硝态氮浓度调至122~132 mg/L,磷酸盐浓度调至约10 mg/L,使试验水体中的无机氮磷比(N:P)约为13:1。

表1 试验氮磷浓度和微藻浓度设置

Tab.1 Initial nitrogen and phosphorus concentrations and microalgae densities for each treatment

组别	初始氮浓度 /mg·L ⁻¹	初始磷浓度 /mg·L ⁻¹	初始藻浓度 /个·mL ⁻¹
钝顶螺旋藻(SP)	130.85	10.23	10 ⁶
盐藻(DU)	136.70	11.78	10 ⁵
牟氏角毛藻(CM)	122.47	9.65	10 ⁴
对照(CK)	131.71	12.33	0

1.2 试验步骤

分别在调配后的3种BFT养殖尾水中接入适当浓度的微藻,对照组不接藻。每组设3个平行,试验体积80 mL,水体盐度为20。参考相关文献(叶志娟2006;胡海燕,2007;谢丽娟,2019),将3种微藻的初始接种浓度分别设为钝顶螺旋藻3.32×10⁶个/mL、盐藻2.50×10⁵个/mL、牟氏角毛藻4.00×10⁴个/mL。藻液在加入试验瓶之前使用无菌生理盐水对藻细胞进行振荡清洗,4 000 g离心5 min,弃上清液,重复清洗3次。

试验开始后,将锥形瓶置于恒温光照培养箱内培养,温度为(25±1)℃,光照强度2 500~3 000 lx,光暗周期12 h:12 h;每天6:00、12:00、18:00手摇混匀藻液3次,避免藻细胞贴壁生长,并随机更换锥形瓶的位

置,试验时长为16 d。

1.3 微藻测定

于第0天和第16天从各试验瓶中采集微藻样品1 mL,并加入40 μL甲醛固定,4℃保存。盐藻、牟氏角毛藻直接使用血球计数板在光学显微镜下对其进行观察计数。钝顶螺旋藻细胞培养过程中易形成长链条状群体,检测前先将藻液进行超声破碎,形成小段状,再取100 μL藻样在显微镜下用目微尺测定微藻群体及单个细胞的长度,然后计算藻细胞数量(王少沛等,2009)。每个样品测量3次取平均值。

1.4 氮磷营养盐测定

于第0、2、4、6、8、16天分别从各试验组锥形瓶中取适当水样进行过滤稀释处理,参照国家标准(GB/T17378.4-2007),分别采用铈还原法、盐酸萘乙二胺分光光度法、靛酚蓝分光光度法和磷钼蓝分光光度法检测水体中硝态氮、亚硝态氮、氨氮、磷酸盐浓度;总无机氮浓度为硝态氮、亚硝态氮、氨氮浓度之和(曹煜成等,2017)。

1.5 数据统计

各组水质氮磷营养盐指标去除率计算公式如下:

$$R = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中:R为去除率(%),C₀为初始浓度(mg/L),C_t为取样测定浓度(mg/L)。

采用SPSS 26软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),并用Duncan's法检验各试验组间差异显著性,显著水平设为P<0.05。

2 结果与分析

2.1 微藻数量变化

3种微藻在BFT尾水中的数量变化如表2所示。试验结束时,钝顶螺旋藻的数量上升但无显著差异(P>0.05),盐藻组和牟氏角毛藻的细胞数量明显增加(P<0.05)。

表2 3种微藻在BFT尾水中的数量变化

Tab.2 Changes in the microalgal densities in the BFT aquaculture tailwater

试验组	不同时间的微藻数量/个·mL ⁻¹		显著性
	第0天	第16天	
钝顶螺旋藻	(3.32±0.05)×10 ⁶	(5.88±0.13)×10 ⁶	P>0.05
盐藻	(2.50±0.02)×10 ⁵	(1.06±0.01)×10 ⁷	P<0.05
牟氏角毛藻	(4.00±0.06)×10 ⁴	(1.66±0.03)×10 ⁶	P<0.05

2.2 氮磷去除效果

试验期间,对照组中的各项氮磷指标除了氨氮

浓度显著升高外($P<0.05$),其他水质指标均无显著变化($P>0.05$),表明3种微藻对养殖尾水中氮磷去除效果良好(图1,表3,表4)。

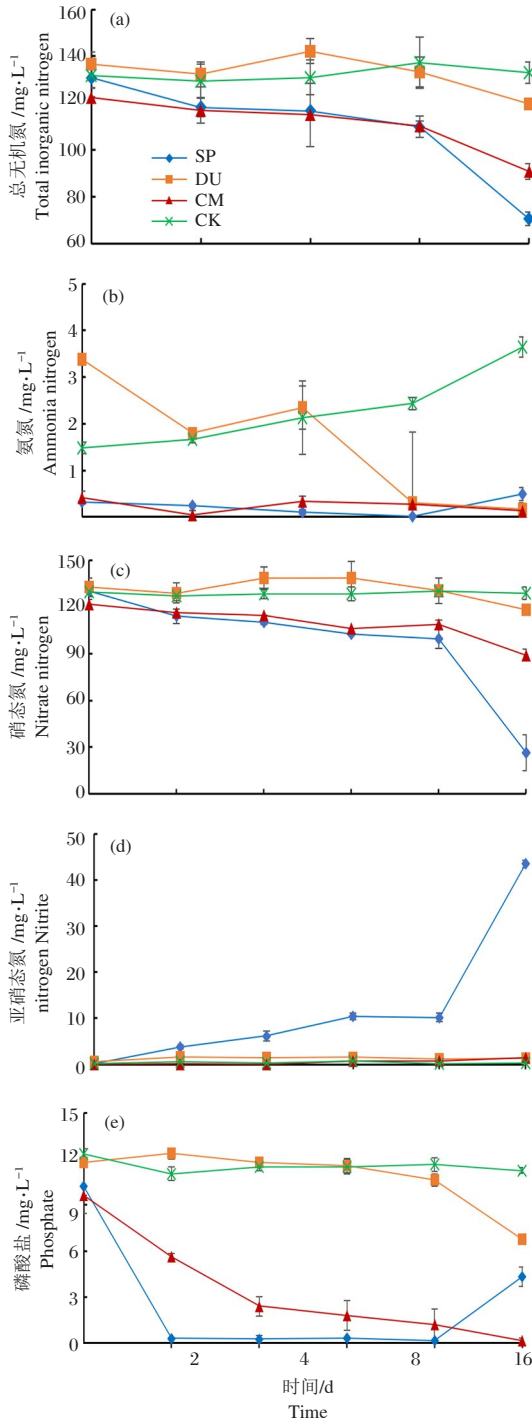


图1 养殖尾水中氮磷营养盐浓度变化

Fig.1 Variation of nitrogen and phosphorus concentrations in BFT aquaculture tailwater

从氮磷浓度变化来看,SP组、DU组和CM组的总无机氮浓度总体呈下降趋势,分别由第0天的130.85、136.70、122.47 mg/L显著下降至70.52、

119.78、90.89 mg/L($P<0.05$)。其中SP组总无机氮浓度降幅最大,去除量达到60.33 mg/L(图1-a)。

试验结束时,DU组的氨氮浓度由起始3.38 mg/L下降至0.16 mg/L,差异显著($P<0.05$),SP组和CM组的氨氮浓度始终保持在0.5 mg/L以下,各藻组氨氮的终浓度都较低,而对照组氨氮浓度由初期的1.48 mg/L上升到3.65 mg/L(图1-b)。

SP组、DU组和CM组的硝态氮浓度降低显著($P<0.05$),由第0天的130.40、132.76、122.05 mg/L分别下降至26.65、118.31、89.27 mg/L(图1-c)。

SP组和CM组的亚硝态氮浓度随着试验进行逐渐上升,第16天分别为43.54 mg/L和1.49 mg/L,且差异显著($P<0.05$),而DU组和对照组的亚硝态氮浓度全程均低于2.00 mg/L,无明显变化($P>0.05$)(图1-d)。

3个微藻组的磷酸盐浓度均有不同程度的降低,试验结束时SP组、DU组和CM组分别由第0天的10.23、11.78、9.65 mg/L显著下降至4.33、6.75、0.17 mg/L($P<0.05$),其中SP组在试验前期对磷酸盐的去除率更高(图1-e)。

表3 3种微藻第8天对尾水中的氮磷去除率 %

Tab.3 Removal rate of nitrogen and phosphorus by microalgae in tailwater on Day 8

组别	总无机氮	氨氮	硝态氮	磷酸盐
SP	12.42±0.95 ^a	97.31±6.49 ^a	23.46±4.80 ^a	98.55±0.21 ^a
DU	3.39±2.29 ^c	90.88±7.16 ^a	1.68±2.68 ^c	9.80±2.76 ^c
CM	10.13±1.89 ^{ab}	33.32±0.02 ^b	12.81±0.15 ^b	87.28±8.45 ^b
CK	-4.27±6.49 ^c	-64.19±3.73 ^c	-0.23±4.82 ^c	5.68±2.14 ^d

注:同列中不同小写字母者表示组间差异显著性($P<0.05$)。

Note: Different letters denote significant differences ($P<0.05$).

表4 3种微藻第16天对尾水中的氮磷去除率 %

Tab.4 Removal rate of nitrogen and phosphorus by microalgae in tailwater on Day 16

组别	总无机氮	氨氮	硝态氮	磷酸盐
SP	46.06±2.50 ^a	-62.69±24.48 ^c	79.60±7.07 ^a	61.17±1.08 ^b
DU	12.38±3.50 ^c	95.12±3.52 ^a	10.75±3.57 ^c	42.64±2.90 ^c
CM	25.79±2.70 ^b	69.09±0.05 ^b	28.58±3.55 ^b	98.25±1.30 ^a
CK	-1.02±1.61 ^d	-146.62±1.17 ^d	0.56±3.75 ^d	8.76±1.87 ^d

注:同列中不同小写字母者表示组间差异显著性($P<0.05$)。

Note: Different letters denote significant differences ($P<0.05$).

由表3和表4可见,就尾水中的氮磷去除率而言,SP组、DU组和CM组在试验第8~16天对总无机氮去除率逐渐上升,其中SP组在第16天时的去除率最高,达到46.06%,显著高于DU组和CM组($P<0.05$),而CM组的总无机氮去除率显著高于DU组

($P<0.05$)。第8天时SP组氨氮的去除率达到97.31%，DU组为90.88%，均显著高于CM组的33.32%($P<0.05$)；此后DU组和CM组的氨氮去除率逐渐升高，至第16天时分别达到95.12%和69.09%。3种微藻对硝态氮的去除率差异显著($P<0.05$)，第16天时SP组、DU组和CM组的硝态氮去除率分别是79.60%、10.75%和28.58%；其中，钝顶螺旋藻对硝态氮的去除率显著高于其他2种微藻($P<0.05$)。第8天时SP组的磷酸盐去除率达到98.55%，显著高于DU组的9.80%和CM组的87.28%($P<0.05$)，第16天时DU组的去除率上升至42.64%，CM组则上升至98.25%。

3 讨论

3.1 微藻处理集约化养殖尾水的优势

在当前处理集约化养殖尾水氮磷的方法中，生物净化法具有不可比拟的优势，其利用各种生物(植物、动物和微生物等)吸收、降解或转化尾水中的污染物，可以让养殖尾水系统循环呈现正循环，更加彻底有效地净化养殖尾水(徐武杰等,2020)。生态处理法作为一种生物净化方式，运用了生态学原理，以物质循环为基础来吸收净化养殖尾水中的氮磷营养盐。尾水生态处理不仅适用于淡水养殖，也适用于海水养殖，但与淡水养殖尾水处理相比，可供选择的海水尾水氮磷净化植物较少，其中微藻是第一选择。与其他净水生物相比，微藻具有个体小、生长速度快、高效吸收尾水中氮磷可溶性营养盐并具有附加效益等优点；同时，利用微藻自身特性处理养殖尾水中的氮磷营养盐，还具有生态修复的良好效果(胡海燕等,2009；刘梅等,2018；庞昊,2021)。蓝藻门的钝顶螺旋藻、硅藻门的牟氏角毛藻和绿藻门的盐藻常作为水产养殖动物的饵料和饲料添加剂，是养殖水体中常见的微藻，具备对养殖生物无害、高效吸收氮磷、易收取等优点，并且还有较高营养和经济研究价值(Félix et al,2017；于宗赫等,2021；张新明等,2021；El-Araby et al,2022)。

3.2 微藻在BFT养殖尾水中的密度变化

微藻对水体中氮磷营养盐的去除是通过吸收水体无机氮磷转化为微藻细胞有机氮磷来实现，所以其在尾水中的生长繁殖状态直接影响水体氮磷营养盐的去除效果。从钝顶螺旋藻、盐藻和牟氏角毛藻在集约化养殖尾水中的生长繁殖情况来看，钝顶螺旋藻从试验初始的 3.32×10^6 个/L至试验结束增长为 5.88×10^6 个/L，试验前后微藻数量无显著差

异($P>0.05$)；相比试验前后的盐藻和牟氏角毛藻，均增长了2个数量级，差异显著($P<0.05$)。分析钝顶螺旋藻数量增加不显著的原因，可能是由于螺旋初始藻密度较高，降低了培养液的透光率，从而导致光合作用变弱，致使生长繁殖不显著(Cheirsilp & Torpee, 2012)；也有可能是前期优先利用氨氮，第8天时的去除率已达97.31%，从而抑制其吸收利用硝态氮，同时磷酸盐浓度也消减快速，在第2天时的去除率达到了97.0%，一定程度上限制了螺旋藻的生长繁殖(张诚和邹景忠,1997)。磷元素的缺乏在一定程度上也限制了螺旋藻的生长繁殖，从而导致其细胞大量死亡，造成了培养液中磷酸盐、氨氮和亚硝酸盐氮浓度上升；而盐藻和牟氏角毛藻试验前后的藻量增加显著，与张扬等(2011)的试验结果显著性相似。本次试验结果表明，3种微藻在集约化养殖尾水中均可较好地存活，并可保持较高的细胞密度。

3.3 不同微藻对氮磷的净化效果比较

钝顶螺旋藻虽多见于淡水环境中，但近年来也有其相关的驯化试验。邵营泽等(2005)研究发现，驯化后的钝顶螺旋藻可在盐度10~40的环境中良好生长。本研究结果显示，钝顶螺旋藻在盐度20的养殖尾水环境中可以生长存活。也有利用钝顶螺旋藻净化废水和污水的相关报道，张燕鹏(2020)利用糖蜜发酵废水培养钝顶螺旋藻，发现废水中硝态氮和磷酸盐浓度从215 mg/L和23 mg/L分别下降了94.7 mg/L和18.1 mg/L，与本研究钝顶螺旋藻对养殖尾水中硝态氮、磷酸盐吸收值相近。胡海燕(2007)利用螺旋藻净化海水养殖废水，发现螺旋藻对氨氮的吸收效果随着藻添加量的增加，其氨氮去除速度更快。本试验第8天时，钝顶螺旋藻对氨氮也表现出了较好的吸收效果。盐藻具有广泛的适盐性，同时该藻富含胡萝卜素、甘油和蛋白质等，是一种重要的海洋经济藻类，在食品、医药和养殖业中具有独特的商业价值(虞海天,2014；李元翔,2019)。本研究发现，盐藻对海水养殖尾水中氨氮去除率达到95.12%，与胡海燕(2007)的研究结果类似。叶志娟和刘兆普(2015)发现盐藻在海水养殖废水中生长良好，且对氨氮、硝态氮以及磷酸盐均有较高的去除率。牟氏角毛藻是海水养殖池塘常见的有益藻，因其细胞富含不饱和脂肪酸常被选做饵料；同时，有研究发现角毛藻可用于吸收和净化养殖水体中的氮磷营养盐(张特,2012)；在较低浓度硝态氮(1.070 mg/L)和磷酸盐(0.232 mg/L)的海水养殖废水中培养牟氏角毛藻，其去除率分别为95.89%和91.81%(叶志娟和刘兆

普,2015)。本研究中,牟氏角毛藻第16天的磷酸盐去除率为98.25%,与其结果相似,且去除绝对值更高,说明其在本试验条件下对磷酸盐去除效果更好;硝态氮去除率为28.58%,与之相比较低,但去除绝对浓度明显更高,达到37.93 mg/L。谢丽娟(2019)利用未稀释的高盐度养殖尾水硝态氮和氨氮培养牟氏角毛藻12 d,去除率分别为58.2%和52.5%,本研究硝态氮和氨氮去除率为28.58%和69.09%,这可能与本研究培养环境中的高硝酸盐氮浓度有关;同时其研究中磷酸盐在第8天消耗殆尽,与本次牟氏角毛藻组对磷酸盐的最高去除率基本相同。本研究发现牟氏角毛藻对集约化养殖尾水中的磷酸盐净化作用显著高于盐藻($P<0.05$),在叶志娟(2006)的研究中也有类似发现。

利用微藻净化养殖尾水过程中,存在微藻难以收集的大问题,相较于盐藻和牟氏角毛藻,钝顶螺旋藻藻体较大,便于后期收集处理是其主要的优势。螺旋藻作为水产养殖的常用藻种,其藻细胞中包含多种氨基酸、矿物质,蛋白含量更是高达60%~70%(姚丹等,2012);相对于盐藻和牟氏角毛藻,其对高浓度氮磷的对虾BFT集约化养殖尾水的净化效果更好,并且藻细胞生物量大回收利用更便捷。当前螺旋藻的开发利用已形成相对完善的产业链,不仅可以用来作为理想蛋白来源和保健品,其在水产上还经常用作饲料及原料使用。

4 结论

(1)钝顶螺旋藻、盐藻和牟氏角毛藻在含有高浓度氮磷的对虾BFT集约化养殖尾水中均可存活生长,钝顶螺旋藻对尾水中的硝态氮、总无机氮去除率显著高于盐藻和牟氏角毛藻($P<0.05$)。

(2)钝顶螺旋藻的氨氮最高去除率可达95%以上,磷酸盐的最高去除率为98.55%;盐藻16 d的氨氮去除率最优;牟氏角毛藻16 d的磷酸盐去除率3组中最高,为98.25%。

(3)钝顶螺旋藻、盐藻和牟氏角毛藻均可用于海水对虾集约化养殖尾水的净化,综合来看以钝顶螺旋藻为最优选择。

参考文献

曹煜成,李卓佳,胡晓娟,等,2017. 磷浓度与氮磷比对蛋白核小球藻氮磷吸收效应的影响[J]. 生态科学, 36(5):34-40.
范鹏程,徐武杰,文国樑,等,2019. 基于生物絮团技术构建的零换水养殖系统对凡纳滨对虾高密度养殖效果分析[J]. 南方农业学报, 50(12):2833-2840.

胡海燕,2007. 水产养殖废水氨氮处理研究[D]. 青岛:中国海洋大学.
胡海燕,单宝田,金卫红,等,2009. 一株淡水螺旋藻的盐度驯化及其净化养殖废水作用[J]. 渔业现代化, 36(1):1-4,17.
慧敏,2013. 钝顶螺旋藻培养及其对富营养化水体中氮磷的去除[D]. 呼和浩特:内蒙古大学.
金彬明,曾国权,2004. 牟氏角毛藻培养技术[J]. 中国水产, (10):73-74.
李元翔,2019. 杜氏盐藻类胡萝卜素代谢对光强和光质变化的响应机制[D]. 北京:中国科学院大学.
刘磊,杨雪薇,陈朋宇,等,2014. 3种微藻对人工污水中氮磷去除效果的研究[J]. 广东农业科学, 41(11):172-176,201.
刘林林,黄旭雄,危立坤,等,2014. 15株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析[J]. 环境科学学报, 34(8):1986-1994.
刘梅,原居林,何海生,等,2018. 微藻在南美白对虾养殖废水中的生长及净化效果[J]. 应用与环境生物学报, 24(4):866-872.
刘盼,贾成霞,杨慕,等,2018. 2种微藻对养殖水体中氨氮和亚硝态氮的净化作用[J]. 水产科学, 37(3):389-393.
刘庆辉,余祥勇,叶孝飞,等,2021. 4种饵料微藻对水产养殖废水的净化效果研究[J]. 水产科技情报, 48(5):267-273.
刘庆辉,余祥勇,张鹤千,等,2019. 微藻对水产养殖尾水中氮磷去除效果的研究进展——基于水产养殖尾水资源化利用角度分析[J]. 水产科技情报, 46(5):290-295.
刘婷,2018. 钝顶螺旋藻对含盐二级出水营养物质去除及回收特性研究[D]. 济南:山东大学.
罗婉仪,雷泽湘,李义勇,2021. 生物絮团中微生物群落的功能、结构及其调控研究进展[J]. 中国农学通报, 37(24):91-96.
庞昊,2021. 微藻处理海水养殖废水及工艺提升研究[D]. 大连:大连理工大学.
邵营泽,李信书,吴建新,等,2005. 盐度对螺旋藻的生长和生化成分的影响[J]. 科学养鱼, (9):42-43.
王少沛,李卓佳,曹煜成,等,2009. 微绿球藻、隐藻、颤藻的种间竞争关系[J]. 中国水产科学, 16(5):765-772.
王申,高珊珊,蒋力,等,2018. 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, 31(5):50-57.
谢丽娟,2019. 牟氏角毛藻培养特性及在对虾养殖尾水处理中的研究[D]. 福州:福建师范大学.
徐武杰,2014. 生物絮团在对虾零水交换养殖系统中功能效应的研究与应用[D]. 青岛:中国海洋大学.
徐武杰,文国樑,曹煜成,等,2020. 浅谈水产养殖尾水的生态处理技术[J]. 南方农业, 14(27):181-182.
姚丹,黄忠华,雷光鸿,等,2012. 螺旋藻提取研究概述[J]. 轻工科技, 28(3):16-17,66.
叶志娟,2006. 牟氏角毛藻和盐藻对不同种类海水养殖废水生长和生理反应的研究[D]. 南京:南京农业大学.

- 叶志娟,刘兆普,王长海,2006. 牟氏角毛藻在海水养殖废水中的生长及其对废水的净化作用[J]. 海洋环境科学, (3):9-12.
- 叶志娟,刘兆普,2015. 盐藻在海水养殖废水中的生长及对废水的净化作用[J]. 湖北农业科学, 54(1):39-42.
- 于宗赫,黄文,马文刚,等,2021. 牟氏角毛藻和海洋红酵母对玉足海参浮游幼体发育、生长及成活率的影响[J]. 水产学报, 45(12): 2003-2010.
- 虞海天,2014. 杜氏盐藻中 β -胡萝卜素的提取纯化及制备生物燃料的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学.
- 张诚,邹景忠,1997. 尖刺拟菱形藻氮磷吸收动力学以及氮磷限制下的增殖特征[J]. 海洋与湖沼, (6):599-603.
- 张特,2012. 凡纳滨对虾仔虾能量代谢及藻菌对育苗水体和废水调控作用研究[D]. 湛江:广东海洋大学.
- 张新明,赵璐,张衡,等,2021. 盐藻的营养价值及其在动物生产中的应用[J]. 养殖与饲料, 20(4):36-37.
- 张燕鹏,2020. 食品工业废水培养钝顶螺旋藻过程中的污染物去除和藻蓝蛋白生产[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- 张扬,刘亚梦,高苑融,等,2011. 农村生活污水培养杜氏盐藻的初步研究[J]. 黑龙江农业科学, (6):39-41.
- Ansari F A, Singh P, Guldhe A, et al, 2017. Microalgal cultivation using aquaculture wastewater: Integrated biomass generation and nutrient remediation[J]. Algal Research, 21:169-177.
- Cheirsilp B, Torpee S, 2012. Enhanced growth and lipid production of microalgae under mixotrophic culture condition: Effect of light intensity, glucose concentration and fed-batch cultivation[J]. Bioresource Technology, 110: 510-516.
- El-Araby D A, Amer S A, Attia G A, et al, 2022. Dietary Spirulina platensis phycocyanin improves growth, tissue histoarchitecture, and immune responses, with modulating immunoexpression of CD3 and CD20 in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, DOI: 10.1016/J.AQUACULTURE.2021.737413
- Félix D M, Elías J A L, Córdova A I C, et al, 2017. Survival of *Litopenaeus vannamei* shrimp fed on diets supplemented with *Dunaliella* sp. is improved after challenges by *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 148:118-123.
- Guo Z, Liu Y, Guo H Y, et al, 2013. Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production[J]. Journal of Environmental Sciences, 25(S1):85-88.
- Ray A J, Seaborn G, Leffler J W, et al, 2010. Characterization of microbial communities in minimal-exchange, intensive aquaculture systems and the effects of suspended solids management[J]. Aquaculture, 310:130-138.

(责任编辑 万月华)

Comparison of Three Microalgae for Removing Nitrogen and Phosphorus from the Tail Waters of Intensive Seawater Shrimp Aquaculture

PAN Zhi-heng^{1,2}, LU Min^{1,2}, CAO Yu-cheng², XU Yu², XU Wu-jie², HU Xiao-juan²,
SU Hao-chang², WEN Guo-liang^{1,2}

(1. Zhejiang Ocean University, National Engineering Research Center for Marine Aquaculture,
Zhoushan 316022, P.R. China;

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences,
Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment,
Guangzhou 510300, P.R. China)

Abstract : Using tail waters from an intensive biofloc shrimp aquaculture system with high concentrations of inorganic nitrogen and phosphorus, we compared the growth of three microalgae species (*Spirulina platensis*, *Chaetoceros muelleri*, *Dunaliella* sp.) in the tail water and their removal of inorganic nitrogen and phosphorus. Our aim was to provide data to support screening for and obtaining microalgae that are effective for tail water purification. Tail water collected from the shrimp aquaculture system were adjusted for testing to an N:P ratio of 13:1 after sterilization. Treatments with each algae species and a control group were run in triplicate, with initial microalgae concentrations of 3.32×10^6 cells/mL in the *S. platensis* group, 2.50×10^5 cells/mL in the *Dunaliella* sp. group and 4.00×10^4 cells/mL in the *C. muelleri* group. The test lasted for 16 days, and microalgae samples were collected before and after the test to determine changes in the cell density of each microalgae species by microscope counting. The removal of total inorganic nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, and phosphate in the tail water was analyzed by comparing the concentrations of each nutrient on day 0, 2, 4, 6, 8 and 16 of the test, using national standard methods. The cell density of *S. platensis* did not change significantly during the experiment, remaining at $\sim 3.32 \times 10^6$ cells/mL ($P > 0.05$). The cell densities of *Dunaliella* sp. and *C. muelleri* increased significantly, from initial concentrations of 2.50×10^5 cells/mL and 4.00×10^4 cells/mL to final densities 1.06×10^7 cells/mL and 1.66×10^6 cells/mL ($P < 0.05$). The removal rates of nitrate nitrogen and total inorganic nitrogen in *S. platensis* treatment were respectively, 79.60% and 46.06%, significantly higher than those in the other groups ($P < 0.05$), and the highest removal rate (98.55%) of phosphate was on day 8. The removal rate of phosphate in *C. muelleri* treatment was 98.25% on day 16, significantly higher than that in other groups ($P < 0.05$). In conclusion, the three microalgae species grew well in the tail water from intensive shrimp aquaculture, removal of inorganic nitrogen and phosphorus was effective, and *S. platensis* was the best, overall, for the biological purification of tail water.

Key words : tail water of the intensive shrimp aquaculture system; *Spirulina platensis*; *Chaetoceros muelleri*; *Dunaliella* sp.; nitrogen and phosphorus nutrients