

龙须菜与缢蛭单养或混养对对虾集约化养殖尾水净化的效果

秦文娟^{1,2}, 陆开宏^{1,2*}, 郑忠明^{1,2}, 杨文^{1,2}, 郑余琦^{1,2}

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 教育部应用海洋生物技术重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了降低对虾集约化养殖尾水的富营养化程度以及对水域环境的影响, 采用龙须菜和缢蛭单养和混养方式来研究对海水养殖尾水中营养物质的去除效率及处理过程中的浮游植物群落动态变化。结果表明, 应用大型藻类龙须菜以及龙须菜和滤食性贝类缢蛭混养处理海水对虾养殖尾水均能取得明显效果, 其中龙须菜和缢蛭混养 24 h 对水体中氨氮、硝态氮、亚硝态氮、磷酸盐、总氮和总磷的去除率可分别达到 76.92%、77.97%、77.88%、80.00%、71.67%和 71.95%。缢蛭对水体浮游植物和总磷也有明显的去除效果, 但在实验时间内未能观察到对其他营养盐含量的明显去除效果; 且实验期间浮游植物种类没有发生显著变化, 但进行过程中混养组浮游植物丰度不断增大。

关键词: 龙须菜; 缢蛭; 浮游植物; 尾水净化

中图分类号: S949

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 06-0035-07

近年来海水养殖业的迅猛发展虽然满足了人们的生活需求^[1-3], 但也对周围海域生态环境造成了严重威胁, 特别在对虾高密度养殖活动中, 由于目前没有统一的操作规程, 养殖过程中产生的残饵和粪便等肆意排放造成了周围水体富营养化频发^[4]。水产养殖尾水中的主要污染物是悬浮颗粒物、氨氮、有机氮和磷酸盐等^[5-6], 未经处理的养殖尾水排入附近水域, 引起水体污染, 也会水体中微小动植物的群落结构造成负面影响^[7-9], 导致水产养殖业难以可持续发展^[10-12]。因此, 必须采取措施对水产养殖尾水进行必要处理, 以降低尾水中污染物含量, 维持健康稳定的水生生态环境。

传统生物处理方法包括活性污泥法和生物膜法以及微生物处理方法^[13-14], 但这些方法操作繁琐, 运行成本高, 推广难度大。随着水处理技术的不断发展, 人们越来越重视生态处理方法, 滤食性动物和大型藻类混养处理养殖尾水由于其潜在的经济和生态效应备受关注。滤食性动物和大型藻类混养技术中, 大型藻类可以吸收废水中部分营养物质, 分解生物毒素, 而滤食性贝类可以通过滤

食和生物沉降作用截留大量悬浮颗粒物、降低氮磷浓度^[15], 并且滤食性动物和藻类在水生生态系统中形成相互协同的关系, 而此协同关系可以加速水产养殖尾水的净化处理^[16]。此外, 滤食性动物和藻类混养在尾水处理的同时, 还可通过收获经济动物和藻类, 在一定程度上减少水产养殖尾水处理成本。本研究通过室内实验, 研究了大型藻类龙须菜和滤食性贝类缢蛭对对虾集约化养殖尾水中营养物质的净化效果, 并对处理过程中尾水中的浮游植物群落动态进行了跟踪调查, 以期大型藻类和滤食性贝类在集约化水产养殖尾水净化等实际应用提供一定的实践指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用大型海藻龙须菜(*Asparagus schoberioides* Kunth) 和缢蛭(*Sinonovacula constricta* Lamarck)均采自浙江省宁波市沿海。

贝藻混养所用容器为直径 50 cm、体积 70 L 的塑料桶, 水量约为 50 L。缢蛭、龙须菜暂养所需容

收稿日期: 2016-10-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家星火计划项目(2013GA701020); 宁波市海洋与渔业局项目(HK2015000047, HK2015000022)。

第一作者: 秦文娟(1991—), 女, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 渔业环境保护。E-mail: 1411091923@nbu.edu.cn

*通信作者: 陆开宏(1964—), 男, 浙江余姚人, 博士/教授, 主要研究方向: 水域生态及渔业环境保护技术。E-mail: lukaihong@nbu.edu.cn

器为 39 cm×19 cm×30 cm 塑料筐, 水量约为 20 L. 缢蛭暂养所需微藻为小球藻(*Chlorella pyrenoidosa* Chick), 藻种来自宁波大学水域生态与环境实验室. 实验所用底泥和养殖尾水取自浙江省宁波市鄞州区瞻岐镇椿霖水产养殖场.

1.2 实验方法

实验在宁波大学海洋学院实训基地内进行. 实验前将缢蛭和龙须菜在海水中暂养 1 周, 缢蛭养殖条件为温度(26±2)℃, pH 7.8~8.4, 龙须菜的养殖条件为温度 26℃, pH 7.8~8.8, 光照 3 000 lx, 光周期 12L:12D, 每天定量更换框内海水, 给缢蛭添加微藻作为饵料, 使其适应实验条件.

实验共设 3 个实验组(龙须菜组、贝类组和混养组), 1 个对照组, 各 3 个重复(表 1). 实验正式开始前将实验用塑料桶清洗干净, 放入厚度均约 13 cm 的底泥, 再缓慢加入大约 50 L 养殖尾水. 将对虾养殖尾水移入塑料大桶后进行水样采集, 并检测温度、盐度、pH 及其他水质指标(表 2), 然后将称量好的龙须菜和缢蛭放入实验桶内, 龙须菜和缢蛭称重之前清洗, 并用滤纸吸干表面水分, 实验过程中用气泵持续 24 h 充氧, 光照 3 000 lx, 光周期 12L:12D.

表 1 不同处理组所用的龙须菜和缢蛭质量 g

处理方式	龙须菜	缢蛭
对照组	0	0
龙须菜组	10	0
贝类组	0	100
混养组	10	100

根据实际生产要求, 实验持续 24 h, 每 2 h 采样 1 次, 其中 1 L 水样用于浮游植物的鉴定和计数, 水样采集之后立即加入鲁哥氏(Lugol's)碘液进行固定, 分液漏斗沉降 48 h 后浓缩至 50 mL 备测^[17]. 另外对部分水样采用 0.45 μm 的滤膜进行抽滤, 用于测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)的质量浓度变化, 未抽滤水样用于测定总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)的质量浓度变化, 未及时测定的水样保存在 -20℃冰箱内, 2 d 内全部测完.

1.3 测定方法

温度、盐度和 pH 用 YSI 多功能水质检测仪(YSI 6600, USA)测定, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-

表 2 实验用对虾养殖尾水的主要理化指标

水质指标	测量值
pH	8.86±0.3
盐度(×10 ⁻¹²)	22.34±0.05
温度/℃	26±2
氨氮/(mg·L ⁻¹)	1.26±0.16
硝态氮/(mg·L ⁻¹)	1.83±0.15
亚硝态氮/(mg·L ⁻¹)	0.3±0.06
磷酸盐/(mg·L ⁻¹)	0.48±0.11
总氮/(mg·L ⁻¹)	5.91±0.33
总磷/(mg·L ⁻¹)	4.55±0.24
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	140±2

P 采用 WESTCO Smart-Chem 全自动间断化学分析仪(Smart-Chem 200, Discrete Analyzer, Westco Scientific Instruments, Brookfield, USA)测定. 其中 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝法, NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 采用镉柱还原法, PO₄³⁻-P 采用磷钼蓝法. TN、TP 和 COD 用哈希水质分析仪(HACH DRB200, USA)进行测定, 其中, TN 采用过硫酸盐氧化法, TP 采用消解-抗坏血酸法, COD 采用重铬酸钾法. 将浓缩后的浮游植物样品充分混匀后, 取 0.1 mL 滴入浮游植物计数框内, 在 400 倍光学显微镜下鉴定并计数.

1.4 数据处理

浮游植物数据在 Primer 5 软件下进行非度量多维尺度分析(non-metric Multi Dimensional Scaling nMDS).

种类优势度算式如下:

$$Y = (N_i / N) f_i,$$

式中, N_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类的总个体数, f_i 为第 i 种在各站中出现的频度^[18]. $Y > 0.02$ 时表示为优势种.

营养盐实验数据在 Microsoft Excel 2003 及 Origin 8.0 软件下拟合作图, 在 SPSS 20.0 软件下统计分析.

清除率算式如下:

$$C_R = (C_0 - C) / C_0 \times 100\%,$$

式中, C_0 为第 1 次(0 h)采样时各指标含量, C 为第 8 次(24 h)采样时各指标含量.

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P、TN、TP、COD 质量浓度先经单因素方差分析(One-way ANOVA), 再进行 Duncan 多重比对以比较同一时

间点不同处理方法间的差异。

2 结果

2.1 无机营养盐含量

实验进行的 0~24 h 期间,贝类组、龙须菜组和混养组氨氮浓度均呈现先降低再升高的趋势,混养组氨氮含量在 4 h 时已显著低于对照组($P<0.05$) (图 1(a)),另外,混养组在处理 10 h 后,氨氮量达到最低,为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;龙须菜组在实验进行到 12 h 时,氨氮质量浓度最低;而对照组则是呈现持续缓慢下降趋势。实验期间,对照组去除率呈现先升高后降低再升高的趋势,而混养组去除率不断增大,在 10 h 时去除率最高,实验进行到 24 h 时,混养组对氨氮的去除率达到 76.92%,龙须菜组低于混养组,为 73.60%,而对照组和贝类组对氨氮的去除率相对较低,分别为 50.81%和 66.21%。

实验过程中,龙须菜组和混养组均在实验进行到 12 h 时硝态氮的含量最少,此后稍有上升,但对照组和贝类组在整个实验过程中硝态氮含量变化幅度相对较小,并且混养组在处理 6 h 后,硝态

氮含量和对照组和贝类组均呈现显著性差异($P<0.05$) (图 1(c))。实验期间,龙须菜组和混养组对硝态氮的去除率均呈现不断增大的趋势,并在实验进行到 12 h 时,2 组硝态氮去除率达到最高,其中混养组在实验进行到 24 h 时对硝态氮的去除率为 77.97%,龙须菜组相对混养组偏低,仅为 68.76%,而对照组和贝类组在整个实验过程中对硝态氮的去除能力相对较低,其中对照组在实验结束时,硝态氮的去除率比混养组低 41.61%。

实验过程中,混养组整体呈现先降低再升高,然后再缓慢降低的趋势,2 个最低点亚硝酸盐的质量浓度分别为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,龙须菜组呈现缓慢降低趋势,实验进行 2 h 后,龙须菜组和混养组亚硝态氮含量和对照组已呈现出显著性差异($P<0.05$) (图 1(d))。实验过程中,龙须菜组和混养组均呈现先升高、后降低、再升高的趋势,其中混养组在实验结束时去除率最高,为 77.88%,是此时对照组亚硝态氮去除率的 1.44 倍。

实验期间,龙须菜组和混养组磷酸盐质量浓度整体均是呈现下降趋势,但实验进行到 8 h 时,

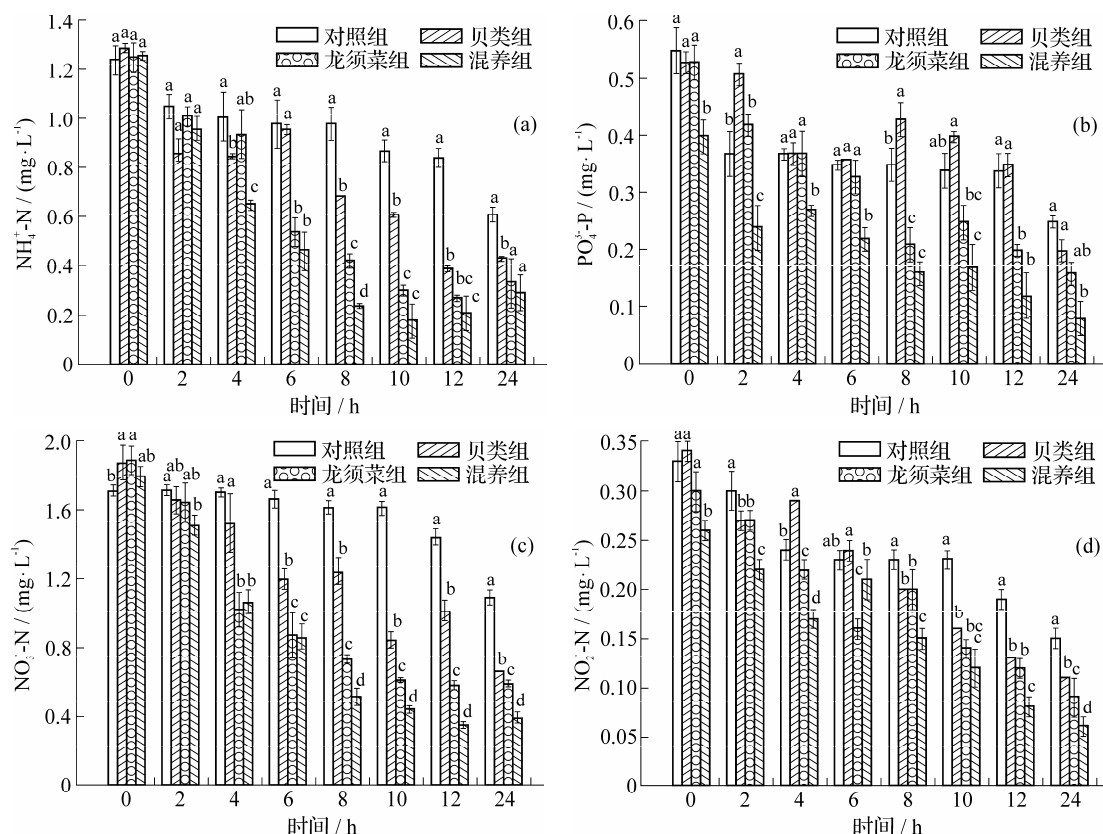


图1 不同处理方法对集约化养殖尾水中主要无机营养盐含量的去除效果

龙须菜组和混养组磷酸盐质量浓度分别呈现一个由低到高的转折点,此时2组的磷酸盐去除率分别达到60.38%和59.17%。在实验进行10h后,混养组与对照组、贝类组以及龙须菜组均存在差异性,其中显著低于贝类组磷酸盐含量($P<0.05$)(图1(b))。实验进行的0~24h间,龙须菜组和混养组对磷酸盐的去除率都呈现上升趋势,而混养组的磷酸盐去除率始终高于龙须菜组,实验结束时对照组磷酸盐去除率最低,仅为54.55%,而混养组磷酸盐去除率相对最高,对照组和混养组磷酸盐去除率的比值仅为0.68。

2.2 TN、TP 和 COD 的去除效果

实验由0h进行到6h时,龙须菜组和混养组总氮含量整体呈下降趋势,但在实验进行到6h时总氮质量浓度由低向高转折,此时2组的总氮去除率分别为41.07%和43.1%,另外,此时龙须菜组和混养组总氮含量均与对照组呈现显著性差异($P<0.05$)(图2(a))。实验过程中,龙须菜组和混养组的总氮去除率均随着实验进程的发展不断增大,实验结束时,混养组总氮去除率为71.67%,混养组总氮去除率和龙须菜组相比整体差异不大,但高于对照组和贝类组,是贝类组总氮去除率1.52倍。

整个实验中,混养组总磷质量浓度整体呈下降趋势。6h时,混养组总磷质量浓度显著低于对照组($P<0.05$)(图2(b));10h时,混养组和龙须菜组总磷质量浓度偏高,其中混养组总磷质量浓度与8h及12h时的该组总氮质量浓度相比,分别高0.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此后总磷质量浓度持续降低,但总磷去除率增幅和此前相比较低,实验结束时,混养组总磷去除率是对照组1.4倍,而对照组的总磷去除率在此实验条件下相对降低,仅为51.29%。

实验期间,混养组COD质量浓度在4h时和对照组呈现不显著差异,在实验结束时,即24h时和对照组呈现显著性差异($P<0.05$)(图2(c)),整个实验过程中,除贝类组的COD去除率相对有较大变化外,对照组、龙须菜组和混养组COD去除率整体均呈现上升趋势,并且相差不大,但在实验结束时,混养组的COD去除率仍然比对照组高2.88%,其中对照组的COD去除率为22.36%。

2.3 浮游植物

实验期间总共鉴定出12种浮游植物(表3),其

中蓝藻门4种,绿藻门4种,硅藻门3种,甲藻门1种,分别占浮游植物总种数的33.3%、33.3%、25%、8.4%。实验期间总丰度为 $2.484\times 10^9 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$,蓝藻门、绿藻门丰度分别为 $2.373\times 10^9 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.04\times 10^8 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占总丰度95.54%和4.19%,硅藻门、甲藻门相对而言所占比例较少。实验期间生物量

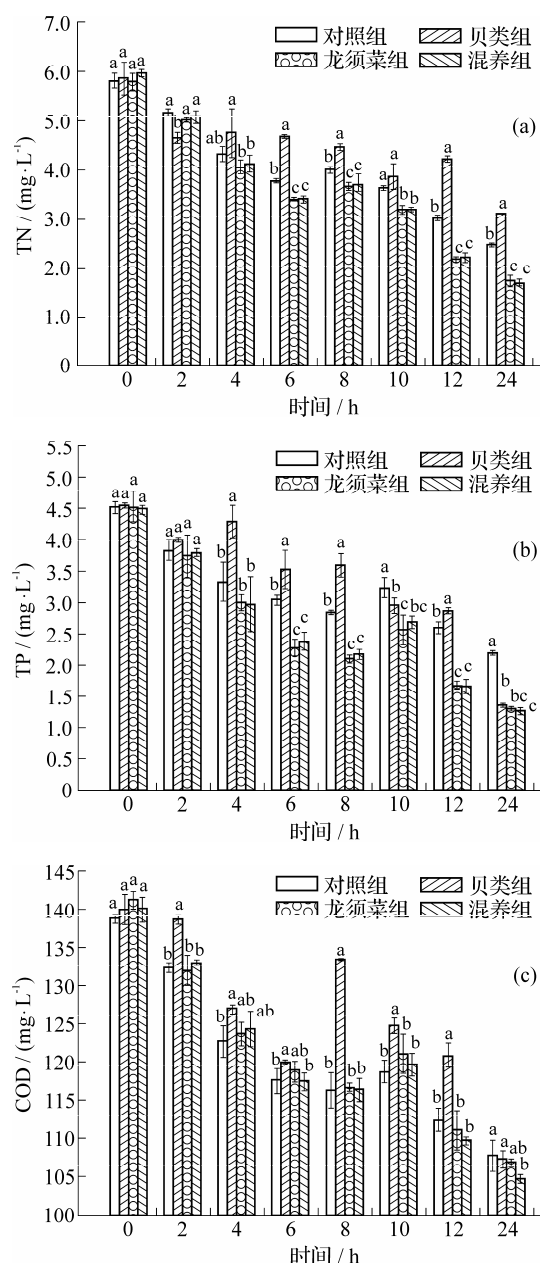


图2 不同处理方法对集约化养殖尾水中TN、TP和COD含量的去除效果

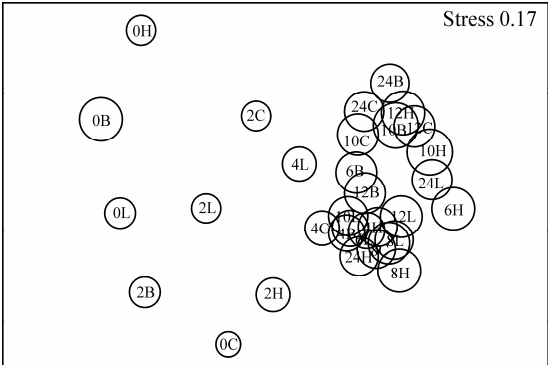
变化范围是0.00785~1.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总生物量41.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,绿藻门生物量最大,占总生物量的44.89%,其次是蓝藻门,硅藻门和甲藻门生物量相对较小,

分别为总生物量的 17.19%、0.56%。整个实验过程中优势种为附生色球藻(*Chroococcus epiphyticus*)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)和小球藻(*Chlorella vulgaris*)。浮游植物的生物量优势种和丰度优势种存在差异,生物量优势种主要为微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、附生色球藻(*Chroococcus epiphyticus*)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)和小环藻(*Chlorella vulgaris*)。

表 3 浮游植物平均丰度及平均生物量

浮游植物	平均丰度/(ind·L ⁻¹)	平均生物量/(mg·L ⁻¹)
微小色球藻	845 052.1	0.095 525
附生色球藻	27 928 385	0.071 808
伪鱼腥藻	44 821 615	0.316 665
卷曲鱼腥藻	562 500	0.003 974
肾形衣藻	57 291.67	0.012 953
小球藻	3 135 417	0.562 818
镰形纤维藻	2 604.167	0.000 204
湖生卵囊藻	54 687.5	0.010 303
两头针杆藻	1 302.083	0.000 256
短小舟形藻	37 760.42	0.015 588
小环藻	157 552.1	0.208 707
裸甲藻	13 020.83	0.007 359

图 3 显示各组基于浮游植物丰度进行的 nMDS 分析在不同采样时间点的聚类情况(图中不同气泡的大小代表浮游植物总丰度,气泡越大表示丰度越大),各处理组在实验进行 4 h 后开始聚集,实验进行过程中浮游植物丰度不断增大,实验后期含贝组浮游植物丰度稍有降低, nMDS 分析中应力系数(Stress Level)的范围在 0.01~0.20 之间,说明该模型可靠。



0C~24C、0L~24L、0B~24B 和 0H~24H 分别为不同采样时间对照组、龙须菜组、贝类组和混养组

图 3 非度量多维尺度分析的浮游植物群落排序图

3 讨论

3.1 水体动植物和微生物对营养盐综合净化效果

本实验用水为集约化对虾养殖尾水,初期水体中各项水质指标均处于较高水平(表 2),通过进行不同的藻贝处理,实验组的营养盐含量在短时间(亚硝态氮和磷酸盐 2 h,氨氮 4 h,硝态氮、总氮和总磷 6 h)显著低于对照组($P<0.05$)(图 1),尤其是贝藻混养组。并且在实验结束时,混养组对各营养盐含量的去除率相对其他 3 组较高,尤其高于对照组,说明龙须菜与缢蛏混养对海水集约化对虾尾水中营养盐的去除效果显著,这与卜雪峰利用大型藻类和贝类混养处理养鱼废水的研究结果相一致^[19]。此外,孙伟在将龙须菜和文蛤混养用以研究二者互利机制^[20],结果也表明,龙须菜与滤食贝类文蛤混养可显著降低水体中营养盐含量。本研究中 COD 的去除效率并未达到预想的效果,其原因可能是养殖尾水的温度、pH 以及充氧方式有关,黄晓婷等^[21]利用生物活性炭处理水产养殖废水的研究表明,温度大于 22.6℃,pH 高于 7.39 以及采用空气进行充氧均会降低 COD 去除效率,而本文中养殖尾水直接取自水产养殖场,温度(26±2)℃、pH (8.86±0.3),并且采用空气充氧的方式,至于是否有其他因素的影响,仍需要进一步深入的探讨与研究。

实验初期,贝藻混养组大部分营养盐指标都呈现下降趋势,应该是龙须菜、缢蛏、微藻和微生物等的综合作用效果显著。在实验后期,光照骤然减弱,龙须菜以及微藻的新陈代谢受到较大影响,再加之其他可能的的外在因素等使指标含量有稍微上升态势,但随着温度和室外光照的不断增强,各指标含量再次发生变化。Van 等^[22]、Guo 等^[23]和 Trentacoste 等^[24]的研究表明,微藻和大型藻类龙须菜在充氧和光照条件下,可以将太阳能转化为生物能,同时大量吸收水体中的氮、磷等营养物质,合成自身生存和生长所需要的能量以及氨基酸、蛋白质等有机营养物质^[25]。值得一提的是,随着实验过程中浮游植物丰度的不断增大(图 3),微藻的增殖和生长对水体中营养盐的削弱也起到了重要作用,这也是对照组在 24 h 后具有较高净化效果的原因所在。同时,大型藻类龙须菜作为生物过滤器还

可以对水体中的氮、磷等营养盐具有一定的吸附能力,可以调节尾水的 pH 值,从而使养殖环境得到改善和修复^[26]。

3.2 不同处理的效果分析

文中,龙须菜组和龙须菜、缢蛏混养组对削减水体氮磷具有明显效应,相对而言,缢蛏贝类组对总磷和浮游植物去除明显,而对其他营养盐的去除效果不及龙须菜组和龙须菜、缢蛏混养组,与对照组的去除率相比也没有显著差异。龙须菜、缢蛏混养组与龙须菜组相比较,除了后期对浮游植物有较大的抑制作用外,大部分实验指标净化效果差异并不显著(图 1 和图 2),似未发挥期待的协同作用。作者认为可能的原因有:一方面大型底栖贝类通过摄食和生物沉降降低水体营养和微藻浓度;另一方面底栖贝类通过筑洞在沉积物-水界面产生生物扰动作用,加大了底泥与空气的接触面积,促进微生物在底泥中的生长繁殖,从而促进沉积物中的部分有机物分解为无机营养盐并在沉积物-水界面处释放^[27-28],导致水体中无机营养盐含量相对增加。因此,实验观测到的结果应该是上述两方面效应综合作用的结果,相信随着研究的延续,或处理水体的加大,龙须菜和缢蛏的协同作用会得到应有的发挥。另外本文是小型室内模拟实验,龙须菜和缢蛏混养能够较好地降低水体中营养盐含量,但在实际生产中还要根据水体中主要污染物的成分和现场检测数据等进行适当调节与完善,才能充分发挥二者对水体的净化能力。

参考文献:

- [1] QUINTÃ R, SANTOS R, THOMAS D N, et al. Growth and nitrogen uptake by *Salicornia europaea* and *Aster tripolium* in nutrient conditions typical of aquaculture wastewater[J]. Chemosphere, 2015, 120(11):414-421.
- [2] HALFHIDE T, ÅKERSTRØM A, LEKANG O I, et al. Production of algal biomass, chlorophyll, starch and lipids using aquaculture wastewater under axenic and non-axenic conditions[J]. Algal Research, 2014, 6(B): 152-159.
- [3] BABATSOULI P, FODELIANAKIS S, PARANYCHIA-NAKIS N, et al. Single stage treatment of saline wastewater with marine bacterial-microalgae consortia in a fixed-bed photobioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 292:155-163.
- [4] QUINTÃ R, HILL P W, JONES D L, et al. Uptake of an amino acid (alanine) and its peptide (trialeanine) by the saltmarsh halophytes *Salicornia europaea*, and *Aster tripolium*, and its potential role in ecosystem N cycling and marine aquaculture wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2015, 75:145-154.
- [5] ZHANG Q, ACHAL V, XU Y, et al. Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsskal) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 60(3):48-55.
- [6] MOOK W T, CHAKRABARTI M H, AROUA M K, et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review[J]. Desalination, 2012, 285(3):1-13.
- [7] ÇAKIR R, GIDIRISLIOGLU A, ÇEBİ U. A study on the effects of different hydraulic loading rates (HLR) on pollutant removal efficiency of subsurface horizontal-flow constructed wetlands used for treatment of domestic wastewaters[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 164:121-128.
- [8] LANANAN F, HAMID S H A, WAN N S D, et al. Symbiotic bioremediation of aquaculture wastewater in reducing ammonia and phosphorus utilizing Effective Microorganism (EM-1) and microalgae (*Chlorella* sp.)[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 95(A):127-134.
- [9] KANDRA P, CHALLA M M, JYOTHI H K P. Efficient use of shrimp waste: Present and future trends[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 93(1):17-29.
- [10] LIU J, WANG Z, LIN W. De-eutrophication of effluent wastewater from fish aquaculture by using marine green alga *Ulva pertusa*[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2010, 28(2):201-208.
- [11] CAO L, WANG W, YANG Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2007, 14(7):452-62.
- [12] 程果锋, 吴宗凡, 时旭, 等. 温室池塘高密度循环水养殖系统构建[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1):37-42.
- [13] 宋迪, 徐佳, 单宝田, 等. 膜技术在水产养殖废水处理中的应用进展[J]. 海洋科学, 2014, 38(2):102-106.
- [14] 黄晓婷, 陈兵, 刘伟, 等. 生物活性炭深度处理循环水产养殖废水研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(6):82-85.
- [15] 方磊, 刘健, 陈锦辉, 等. 贝类生态修复作用及固碳效果研究进展[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3):7-11.

- [16] 郑辉. 贝藻混养协同净化水产养殖废水技术研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [17] Standard methods for the examination of water and wastewater, Washington, DC 20005-2605[S].
- [18] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[D]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [19] 卜雪峰. 贝藻处理海水养殖废水的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [20] 孙伟. 龙须菜和文蛤混养互利机制的模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006.
- [21] 黄晓婷, 张再利, 刘伟, 等. 生物活性炭处理循环水产养殖废水及其影响因子研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2380-2386.
- [22] VAN D H S, BEELEN V, BORE G, et al. Up-scaling aquaculture wastewater treatment by microalgal bacterial flocs: From lab reactors to an outdoor raceway pond[J]. Bioresource Technology, 2014, 159(6):342-354.
- [23] GUO Z, LIU Y, GUO H, et al. Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25:S85-S88.
- [24] TRENTACOSTE E M, MARTINEZ A M, ZENK T. The place of algae in agriculture: Policies for algal biomass production[J]. Photosynthesis Research, 2015, 123(3): 305-315.
- [25] 孟范平, 宫艳艳, 马冬冬. 基于微藻的水产养殖废水处理技术研究进展[J]. 微生物学报, 2009, 49(6):691-696.
- [26] 杨丹菁, 靖元孝. 植物在水产养殖废水处理中的研究进展[J]. 生态科学, 2008, 27(6):522-526.
- [27] 孙思志, 郑忠明. 大型底栖动物的生物干扰对沉积环境影响的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(2):263-268.
- [28] 孙芳, 郑忠明, 陆开宏, 等. 底泥微生物活性对蓝藻水华水柱及沉积物间隙水氮磷分布的影响[J]. 生态科学, 2011, 30(3):217-222.

Purification effect on the treatment efficiency of *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck in monoculture or polyculture on the intensive marine shrimp culture tail-water

QIN Wen-juan^{1,2}, LU Kai-hong^{1,2*}, ZHENG Zhong-ming^{1,2}, YANG Wen^{1,2}, ZHENG Yu-qi^{1,2}

(1.School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to reduce eutrophication in the wastewater of intensive marine shrimp aquaculture ponds and its impact on the surrounding waters, an experiment was conducted using monoculture or polyculture with *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck to treat the wastewater. The dynamics of phytoplankton communities in the wastewater treatment ecosystems were also investigated. The results showed *Asparagus schoberioides* Kunth and the combination of *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck achieved effective purification of the effluent under the experimental conditions. The combination of *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck produced 76.92%, 77.97%, 77.88%, 80.00%, 71.67% and 71.95% more purification with ammonia, nitrate, nitrite, phosphate, total nitrogen and total phosphorus respectively, compared with *Asparagus schoberioides* Kunth. *Sinonovacula constricta* Lamarck had a significant difference in removal rate on phytoplankton and total phosphorus, but did not produce a significant difference in removal effect of other nutrient contents in the experiment time. Phytoplankton species were not significantly different in diversity, but increased in abundance especially with the combination of *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck.

Key words: *Asparagus schoberioides* Kunth; *Sinonovacula constricta* Lamarck; phytoplankton; tail-water purification

(责任编辑 章踐立)