

刚毛藻对静态模拟刺参养殖池塘上覆水营养盐含量的影响

曹学彬¹, 马伟伟², 李琦², 吴春梅², 吴彩蜜², 姜爱莉², 邢荣莲²

(1. 山东东方海洋科技股份有限公司 国家级海藻与海参工程技术研究中心, 山东 烟台 264005; 2. 烟台大学 生命科学学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 利用室内装置模拟的刺参养殖池塘上覆水, 在温度为 25℃, 光照为(4000±200)lx 条件下静态培养刚毛藻 48 h, 定时测定上覆水中总氮(TN)、氨态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、活性磷(PO₄³⁻-P)等营养盐含量, 分析了氮磷营养盐含量的动态变化规律, 探讨了刚毛藻生物量对沉积物-水界面营养盐含量变化的影响。结果表明, 刚毛藻生物量对各营养盐含量的影响存在显著性差异($P < 0.05$)。随着培养时间延长, 上覆水中营养盐含量均呈现先增大后减小的趋势。上覆水中各营养盐含量在培养 6~24 h 时分别达到最大值, 其中当刚毛藻生物量为 0.5~4.5 g/L 时, TN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、TP、PO₄³⁻-P 含量达到最大值。继续培养, 上覆水中各营养盐的含量逐渐减小, 其中生物量为 8.5 g/L 时刚毛藻对 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 的吸收效果最好; 生物量为 0.5 g/L 时刚毛藻对 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 吸收效果最好。因此, 高生物量(8.5 g/L)刚毛藻可降低上覆水中 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量, 但低生物量(0.5 g/L)刚毛藻能有效吸收上覆水中的 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P。

关键词: 刺参养殖池塘; 刚毛藻; 沉积物-水; 营养盐

中图分类号: S963.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2018)06-0088-08

DOI: 10.11759/hyxx20170820001

池塘养殖是我国刺参养殖的主要形式之一, 具有相对封闭性、生态结构单一、物质循环流动性差、缓冲能力弱等特点, 未被利用的残饵和排泄物、水生动植物尸体等物质都沉积在池塘底部, 长期养殖缺乏必要的物质循环调控功能^[1-2]。沉积物有机质的富集易导致底层缺氧, 改变沉积物表层营养物质的组成与含量, 破坏刺参养殖池塘生态系统的营养物质循环和平衡, 引发“内源污染”, 威胁该系统中生物有机体的生存^[3-4]。近几年, 随着池塘养殖时间的延长, 养殖水体富营养化加剧, 导致了海藻大量滋生引发绿潮^[5-6]。

藻类暴发破坏水生态系统平衡, 恶化水质, 并可产生毒素毒害水生生物, 威胁人类健康, 已成为世界性关注的生态环境问题之一^[7]。研究发现, 蓝藻暴发时会引起水体中磷营养盐含量急剧增加^[8]; 赤潮发生时, 藻类会消耗大量的氮磷营养盐, 加快沉积物中氮磷释放率, 同时引起水体中溶解氧含量大幅度下降^[9-11]。由此可见, 养殖池塘海藻暴发对生态环境中氮磷营养盐含量的变化也可能存在着潜在影响。

在我国刺参养殖池塘中大型丝状绿藻(如刚毛藻属、硬毛藻属藻类等)是主要暴发海藻, 它们终年可见, 大量滋生时, 因不能被刺参直接摄食, 对刺参养殖池塘生态环境看护和管理构成严重威胁^[13-18]。有

研究称, 丝状绿藻暴发时, 可使湖泊水环境中的 DO、pH 等发生明显的变化, 进而影响沉积物中营养盐的释放^[19-21]。因此, 研究丝状绿藻暴发对刺参养殖池塘沉积物-水界面营养盐的影响, 对探究刺参养殖生态环境变化显得十分重要, 目前相关研究报道甚少^[22-23]。

本文以刚毛藻为研究对象, 从营养盐变化角度出发, 采用室内静态培养的方法, 通过定时测定上覆水中各形态氮、磷营养盐含量, 分析了刚毛藻不同生物量对沉积物-水界面的氮磷营养盐含量的影响, 以为刺参养殖环境中藻类暴发可能造成的影响提出警示, 为刺参池塘养殖环境科学养护提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

用采样器^[24]采集刺参养殖池塘沉积物的表层

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31572622, 31001113)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31572622, No.31001113]

作者简介: 曹学彬(1978-), 男, E-mail: caoxvebin1978@163.com; 并列第一作者: 马伟伟(1992-), 女, E-mail: 18363850967@163.com; 邢荣莲, 通信作者, E-mail: xingronglian@163.com

(0~5 cm)样品,用采水器采集足量的海水作为实验用上覆水,将其放置保温箱内,于4 h内运回实验室。上覆水用0.45 μm 的混合纤维素酯膜过滤后备用。

1.2 试验设计

新鲜沉积物(1000 \pm 5)g装培养柱(20 cm \times 20 cm \times 80 cm)^[5,25],在培养柱中高度约5 cm,按照水土体积比5:1加入已过滤的上覆水(即体积为10 L)。

水体中分别加入刚毛藻生物量为0(对照组)、0.5、4.5、8.5 g/L进行静态培养。每个生物量水平设3个平行样。在不搅动底泥的情况下,在培养至第0、6、12、24、48 h时,距沉积物表面约2 cm处分别取水样650 mL,用于测定氮、磷各营养盐含量,并将等量已过滤的上覆水用玻璃棒引流缓缓补加到培养柱中。同时分别取少量刚毛藻,暗处理30 min后测其光合量子产量(quantum yield of photosynthesis, QY)。其中该试验培养温度为25 $^{\circ}\text{C}$,培养光照为(4000 \pm 200)lx。

1.3 测定方法

上覆水中N、P各营养盐的测定方法参考海洋化学调查技术规程^[26],其中总氮(TN)用过硫酸钾氧化法,氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)用次溴酸盐氧化法,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)用钼铬还原比色法,亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)用萘乙二胺分光光度法,总磷(TP)用过硫酸钾氧化法,活性磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)用磷钼蓝分光光度法。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是溶解性无机氮(DIN)的主要成分,以三者之和表示DIN含量。

最大光合量子产量(QY)用掌上水体叶绿素荧光仪AquaPen-P AP-P 100测定。

1.4 数据统计

数据分析和图表分别采用SPSS软件和Origin 8.5软件进行。

2 结果

2.1 刚毛藻对上覆水氮、磷盐动态变化的影响

从图1中可以看出,相同培养时间内,刚毛藻不同生物量对上覆水中各营养盐含量变化影响存在显著差异($P<0.05$);随着培养时间的延长,上覆水中各营养盐的含量存在显著差异($P<0.05$)。其中,总态氮、氨态氮、总磷含量随着培养时间的延长均呈现先下降再上升,然后下降的趋势;硝态氮、亚硝态氮、活

性磷、溶解性无机氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)含量则随培养时间均呈现先上升后降低的趋势,硝态氮、DIN含量在培养后期有上升的趋势。而各培养时间内,上覆水中的氮、磷含量并非随着刚毛藻生物量的增多先增加后减少。

2.1.1 刚毛藻对上覆水中总氮含量的影响

由图1a可知,培养时间为24 h时,总氮出现最高峰,其中,当藻量为4.5 g/L时,总氮含量最大为8.515 mg/L;培养时间为48 h时,总氮含量最低,其中0.5 g/L藻量时,总氮含量最低达到0.527 mg/L。说明刚毛藻生物量为0.5 g/L,可以有效吸收上覆水中的TN。

2.1.2 刚毛藻对上覆水中硝态氮含量的影响

图1b显示刚毛藻对上覆水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响,当培养时间为6 h时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量达到最大值3.216 mg/L,此时藻量为0.5 g/L;之后随着培养时间的延长, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量先急剧下降,到培养后期缓慢上升,当培养时间为24 h时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 出现最小值,其中藻量为8.5 g/L时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为0.208 mg/L。培养结束时(48 h),添加刚毛藻的实验组上覆水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均低于空白组,并且为培养初始值的48%~71%。

2.1.3 刚毛藻对上覆水中亚硝态氮含量的影响

培养时间为6 h时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 出现最高峰,其中,当藻量为0 g/L时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量最大为0.066 mg/L;培养时间为48 h时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量最低,其中8.5 g/L藻量时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量最低达到0.006 mg/L(图1c)。表明刚毛藻生物量为8.5 g/L,可以有效吸收上覆水中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。培养结束时(48 h),添加刚毛藻的实验组上覆水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量均低于空白组,并且为培养初始值的25%~45%。

2.1.4 刚毛藻对上覆水中氨态氮含量的影响

刚毛藻对上覆水中氨态氮含量的影响如图1d所示,培养时间为24 h时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出现最高峰,其中,当藻量为4.5 g/L时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大为0.109 mg/L;培养时间为6 h时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较低,其中0.5 g/L藻量时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最低。结果表明刚毛藻生物量为0.5 g/L,可以有效吸收上覆水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

2.1.5 刚毛藻对上覆水中总磷含量的影响

如图1e所示,培养时间为12 h时,TP出现最高峰,其中,当藻量为0.5 g/L时,TP含量最大为0.301 mg/L;培养时间为48 h时,TP含量最低,其0.5 g/L藻量时,TP含量最低达到0.060 mg/L。结果表明刚毛藻生物量为0.5 g/L,可以有效吸收上覆水中的TP。

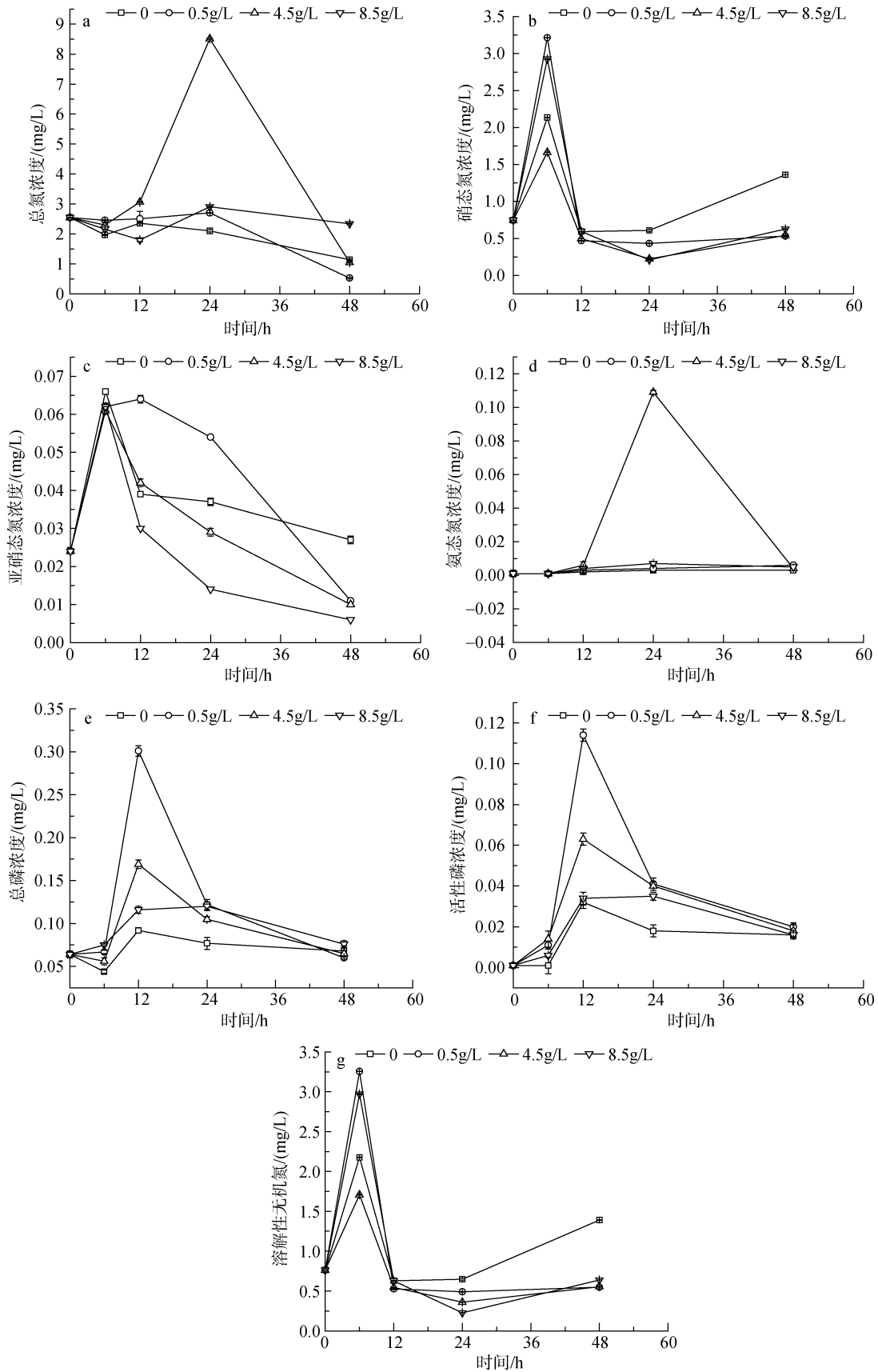


图1 刚毛藻对上覆水营养盐含量的影响

Fig. 1 Effect of *Cladophora* sp. on nutritive salt concentration in overlying water

2.1.6 刚毛藻对上覆水中活性磷含量的影响

图 1f 给出了不同刚毛藻生物量条件下, 上覆水中活性磷含量的变化趋势, 上覆水中活性磷的变化趋势与总磷的变化趋势相同, 即培养时间为 12 h 时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 出现最高峰, 其中, 当藻量为 0.5 g/L 时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量最大为 0.114 mg/L; 随着培养时间的延长, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量呈下降趋势, 当培养结束时, 其含量高于初始含量。因此, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量最低为初始含量, 即 0.01 mg/L。

2.1.7 刚毛藻对上覆水中溶解性无机氮含量的影响

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是溶解性无机氮(DIN)的主要组成部分, 其中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 是 DIN 的主要贡献者。由图 1g 可知, 培养时间为 6 h 时, DIN 出现最高峰, 其中, 当藻量为 0.5 g/L 时, DIN 含量最大为 3.256 mg/L; 培养时间为 24 h 时, DIN 含量最低, 其中 8.5 g/L 藻量时, DIN 含量最低达到 0.228 mg/L。结果表明刚毛藻生物量为 8.5 g/L, 可以有效吸收上覆水中的 DIN。

2.2 刚毛藻最大光合量子产量(QY)的变化

刚毛藻生物量及培养时间均对 QY 的影响存在显著差异($P < 0.05$, 图 2)。培养初期, QY 降低, 6 h 后, QY 呈现先增加后降低的趋势; 同一时间条件下, QY 随着刚毛藻生物量的增加而下降。培养 24 h 时, QY 达到最大值, 当刚毛藻生物量为 0.5 g/L 时, QY 最大为 0.68; 培养 48 h 时, QY 最低, 当刚毛藻生物量为 8.5 g/L 时, QY 最小为 0.46。

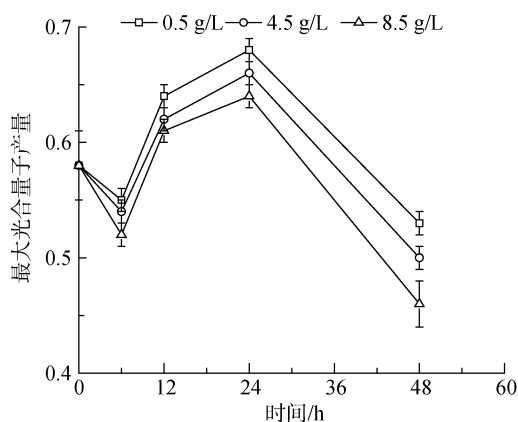


图 2 刚毛藻最大光合量子产量(QY)的变化

Fig. 2 Effect of *Cladophora* sp. on maximum quantum yield of photosynthetic

3 讨论

沉积物-水-藻构成一个完整的循环系统, 各种状态的营养盐经过代谢活动在其中相互转化循环^[27]。

有研究报道沉积物营养盐可释放到上覆水中, 使上覆水中营养盐含量增加^[28,29]。本实验发现, 培养初期(0~12 h), 各实验组上覆水中各氮、磷营养盐的含量均明显增加, 对照组上覆水氮、磷营养盐含量增加, 可能是沉积物向上覆水中释放氮磷营养盐。藻类在初入新环境都有适应生长阶段^[30]。藻类通过光合自养完成生长代谢过程, 通常可通过蛋白质、叶绿素、多糖等生理指标参数考察其生长状态, 间接反映其光合效率, 对藻类光合作用强弱评价存在偏差^[31]。QY 表示最大光合量子产量, 是反映光合系统 II 反应中心的光能转换效率, QY 值的大小直接体现了光合自然生物化合活性, QY 值越高, 光合活性越强, 而且该测定方法灵敏、简洁、易操作, 能直观的体现藻类的光合作用强弱^[32]。培养初期刚毛藻 QY 值降低, 光合活性弱, 刚毛藻处于生长的适应阶段, 生长缓慢, 吸收氮、磷营养盐能力弱, 吸收速度低于沉积物氮营养盐的释放速度, 造成上覆水中氮营养盐含量高于初始值但明显低于对照组。磷营养盐含量明显高于对照组, 可能刚毛藻的添加促进沉积物中磷营养盐的释放, 此时处于生长适应阶段的藻对磷营养盐的吸收能力弱, 导致实验组磷营养盐含量高于对照组。邵雪琳等^[29]研究发现硬毛藻生长促进沉积物释放磷营养盐。因此, 培养初期上覆水中氮、磷营养盐含量增加。

藻类光合自养进行生长需要吸收无机氮磷营养盐^[33]。随着培养时间延长(12~24 h), 刚毛藻最大光合量子产量(QY)值开始升高, 藻光合作用活性增强, 开始旺盛生长。而此阶段上覆水中氮磷营养盐开始降低, 这说明随着藻适应环境开始生长, 氮磷营养盐被大量吸收利用而迅速下降。沉积物可吸附上覆水中的氮、磷等营养物质^[1]。培养 24~48 h, 对照组氮磷营养盐含量降低变化, 可能是沉积物对其吸附所致, 但其含量仍然高于有藻组。由此可见, 刚毛藻有效减少沉积物上覆水中氮磷营养盐。随着营养盐含量减少, 刚毛藻生长受到限制, 因此刚毛藻的 QY 值也随之下降, 该藻的光合活性降低。

研究报道, 不同生物量水平的藻类对上覆水中氮、磷营养盐含量的影响存在显著差异^[29]; 同时藻类可以亲和性的吸收各形态的氮磷营养盐^[34]。本文结果显示, 与对照组相比, 不同生物量刚毛藻对上覆水中不同形态氮磷营养盐含量的影响差异显著。培养结束(48 h)时, 上覆水中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 含量明显低于培养初始时, 说明刚毛藻吸收

NO_3^- -N、 NO_2^- -N 这两种形态无机氮盐的能力较强,因此该藻更倾向于对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 营养盐的吸收;且当生物量仅为 8.5 g/L 时,刚毛藻对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的吸收效果最好。对 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 营养盐含量的影响较小,培养后期几乎不吸收 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 这两种营养盐,其中生物量为 0.5 g/L 时刚毛藻对 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 的吸收效果最好。因此,刚毛藻高生物量对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 营养盐的吸收能力强,但低生物量对 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 营养盐的吸收能力强。

上覆水中的无机氮磷营养盐可被藻类吸收、沉降后被沉积物吸附减少,但同时其含量受有机氮磷分解影响^[28,34-36]。微生物可将上覆水及沉积物中的有机氮磷分解为藻类、虾等水生生物可利用的无机氮磷^[37],当上覆水中的氮磷营养盐含量过高时则会吸附在沉积物表面,反之则由沉积物释放到上覆水中^[1,29]。本实验中所采用的上覆水及沉积物均未灭菌,因此,上覆水中总氮的减少量明显高于溶解性无机氮(DIN),总磷的减少量明显高于活性磷。

QY 表示植物光和高活性的高低,受温度、光照、氮磷营养盐等因素的影响,直接反映植物在不同环境下的生长状态^[38-39]。相同培养时间下,刚毛藻生物量越高 QY 越低。这是由于刚毛藻对氮磷营养盐的需求量增加,导致上覆水氮磷含量降低,不足以满足刚毛藻的正常生长代谢,间接抑制了刚毛藻的光合活性,使其 QY 降低。因此,适量的刚毛藻生物量才能在维持自身生长代谢的前提下更好的吸收上覆水中的氮磷营养盐。

4 结论

(1) 培养初期,刚毛藻处于生长的适应阶段,生长缓慢,吸收氮磷营养盐的能力弱,上覆水中的氮磷营养盐含量增加,说明沉积物可向上覆水中释放氮磷营养盐;培养后期,上覆水中氮磷营养盐含量明显下降。

(2) 不同生物量水平的刚毛藻对 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 这两种形态的氮营养盐含量的影响最大,其中生物量为 8.5 g/L 时刚毛藻对 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的吸收效果最好;刚毛藻对 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 营养盐含量的影响较小,培养后期几乎不吸收 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 这两种营养盐,生物量为 0.5 g/L 时刚毛藻对 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 吸收效果最好。

(3) 适量的刚毛藻生物量,才能达到既维持正

常生长代谢、又能更好的吸收水体中氮磷营养盐的目的。

参考文献:

- [1] 李小伟, 乔永民, 杨宇峰. 广州市郊养殖池塘表层沉积物中氮磷的初步研究[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 74-77.
Li Xiaowei, Qiao Yongmin, Yang Yufeng. Preliminary study on nitrogen and phosphorus in surface sediments of Guangzhou Ponds[J]. Reservoir Fisheries. 2008, 28(1): 74-77.
- [2] 刘石林, 杨红生, 周毅, 等. 刺参对筏式养殖海区生物沉积物消除作用的模拟研究[J]. 海洋科学, 2006, 20(12): 21-24.
Liu Shilin, Yang Hongsheng, Zhou Yi, et al. Simulative studies on utilization efficiency of *Apostichopus japonicus* on the biodeposit in the raft culture system in shallow sea[J]. Marine Sciences, 2006, 20(12): 21-24.
- [3] 刘华丽, 曹秀云, 宋春雷, 等. 水产养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 129-133.
Liu Huali, Cao Xiuyun, Song Chunlei, et al. Environmental effects of organic matter and restoration strategy in sediment of aquaculture ponds[J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(6): 129-133.
- [4] 付春平, 钟成华, 邓春光. pH 值与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27(10): 125-127.
Fu Chunping, Zhong Chenghua, Deng Chunguang. Relationship between pH value of the water and release silt bottom of nitrogen and phosphate in the Three Gorges[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2004, 27(10): 125-127.
- [5] Ye N, Zhang X, Mao Y, et al. "Green tides" are overwhelming the coastline of our blue planet: Taking he world's largest example[J]. Ecological Research, 2011, 26(3): 477-485.
- [6] Gubelit Y I, Berezina N A. The causes and consequences of algal blooms: The *Cladophora glomerata* bloom and the Nevaestuary (eastern Baltic Sea)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61(4): 183-188.
- [7] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou, et al. The mechanism and control technology of lake eutrophication and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [8] 李建松, 王广军, 龚旺宝, 等. 养殖池塘蓝藻暴发时水体细菌群落特征及其主要环境影响因子[C]. 中国水产学会学术年会论文摘要集, 2015.

- Li Jiansong, Wang Guangjun, Gong Wangbao, et al. Characteristics of bacterial community in the aquacultural pond water and its main influencing environmental factors when Cyanobacterial blooming occurred[C]. Chinese Fisheries Society Academic Annual Meeting Abstract, 2015.
- [9] 魏权, 邵雪琳, 高丽. 绿潮藻类暴发对天鹅湖水体和沉积物磷含量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 139-144.
Wei Quan, Shao Xuelin, Gao Li. Effects of macroalgal blooms on phosphorus concentrations in water and sediments of Rongcheng Swan Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 139-144.
- [10] 高波, 邵爱杰. 我国近海赤潮灾害发生特征、机理及防治对策研究[J]. 海洋预报, 2011, 28(2): 68-77.
Gao Bo, Shao Aijie. Study on characteristics, mechanisms and strategies of harmful algal blooms in China coastal waters[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(2): 68-77.
- [11] 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 等. 春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2159-2165.
Li Hongmei, Shi Xiaoyong, Chen Peng, et al. Distribution of dissolved inorganic nutrients and dissolved oxygen in the high frequency area of harmful algal blooms in the East China Sea in spring[J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2159-2165.
- [12] Balak P, Ramanathana L. Characterization of phosphorus fractions in the sediments of a tropical intertidal mangrove ecosystem[J]. Wetlands Ecology and Management, 2010, 18: 165-175.
- [13] 王友爱, 李平. 海岸生态环境变化对荣成市月湖旅游资源影响研究[J]. 海岸工程, 2009, 28(2): 98-104.
Wang Youai, Li Ping. Coastal ecological environment change and its impacts on the tourism resources of Yue Lake in Rongcheng[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(2): 98-104.
- [14] 魏权, 宋鹏鹏, 邵雪琳. 温度、曝气和沉积物对绿潮硬毛藻分解的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2329-2336.
Wei Quan, Song Pengpeng, Shao Xuelin. Influence of temperature, aeration and sediment on decomposition of *Chaetomorpha* sp.[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2329-2336.
- [15] 邓蕴彦, 汤晓荣, 黄冰心, 等. 强壮硬毛藻(*Chaetomorpha valida*)的温度性质及其在中国海藻区系中的扩散潜力[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 404-408.
Deng Yunyan, Tang Xiaorong, Huang Bingxin, et al. The temperature character of marine green alga, *Chaetomorpha valida*, with analysis of its diffusion potential in marine algal flora of china[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(3): 404-408.
- [16] 张宇, 李景玉, 宫庆礼. 线形硬毛藻的生物学特性、价值、生态危害及其防治[J]. 河北渔业, 2014(5): 59-62.
Zhang Yu, Li Jingyu, Gong Qingli. The biological characteristics, value, ecological hazards and control of *Chaetomorpha linum*[J]. Hebei Fisheries, 2014(5): 59-62.
- [17] Gao L, Zhang L H, Hou J Z, et al. Decomposition of macroalgal blooms influences phosphorus release from the sediments and implications for coastal restoration in Swan Lake, Shandong, China. Ecological Engineering, 2013, 60: 19-28.
- [18] 袁宗勤, 张正海, 倪成男, 等. 海参池塘“除草剂抗性”刚毛藻的危害和清除[J]. 科学养鱼, 2014.
Yuan Zongqin, Zhang Zhenghai, Ni Chengnan, et al. Harm and removal of herbicide resistance *Cladophora* sp. from the pond breeding *Apostichopus japonicus*[J]. Scientific Fish Farming, 2014.
- [19] Zhu G W, Wang F, Zhang Y L, et al. Hypoxia and its environmental influences in large, shallow, and eutrophic Lake Taihu, China[J]. International Association of Theoretical and Applied Limnology- Proceedings, 2008, 30(3): 361-365.
- [20] 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 930-934.
Zhang Qiang, Liu Zhengwen. Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 930-934.
- [21] Garcia R E, Corzo A. Effects of macroalgal blooms on carbon and nitrogen biogeochemical cycling in photoautotrophic sediments: An experimental mesocosm[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(7): 1550-1556.
- [22] Menendez M, Herrera J, Comin F A. Effect of nitrogen and phosphorus supply on growth, chlorophyll content and tissue composition of the macroalga *Chaetomorpha linum* (O.F. Mull), Kutz, in a Mediterranean Coastal Lagoon[J]. Scientia Marina, 2002, 66(4): 355-364.
- [23] 侯金枝, 宋鹏鹏, 高丽. 刚毛藻分解对荣成天鹅湖沉积物磷释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 826-831.
Hou Jinzhi, Song Pengpeng, Gao Li. Influence of decomposition of *Cladophora* on phosphorus release from the sediments of Rongcheng Swan Lake, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(4): 826-831.
- [24] 邢荣莲, 宋洪旭, 郭尽力, 等. 一种浅水底泥分层水平采样器: CN, ZL 2013203196185[P], 2013.
Xing Ronglian, Song Hongxiu, Guo Jinli, et al. A stratified horizontal Sampler for shallow water: CN, ZL 2013203196185[P], 2013.
- [25] 国家环境保护总局. 全国土壤污染源状况调查样品分析测试技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State environmental protection administration. Technical

- cal requirements for sample analysis and testing of soil pollution sources in China[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [26] 国家海洋局908专项办公室. 海洋化学调查技术规程[M]. 1版, 北京: 海洋出版社, 2006.
908 special office of State Oceanic Administration. Technical specification for marine chemical investigation[M]. One, Beijing: Ocean Press, 2006.
- [27] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. 中国环境科学, 2010, 30(s1): 1-6.
Huang Liang, Wu Naicheng, Tang Tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. China Environmental Science, 2010, 30(s1): 1-6.
- [28] 刘冬梅, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖藻对水-沉积物界面磷交换过程的影响[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 8-13.
Liu Dongmei, Jiang Xia, Jin Xiangcan, et al. Effects of algae on the phosphorus exchange at water-sediment interface in Taihu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(4): 8-13.
- [29] 邵雪琳, 孟祥森, 高丽, 等. 硬毛藻生长对水体和沉积物中碱性磷酸酶活性及磷含量的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 890-898.
Shao Xuelin, Meng Xiangsen, Gao Li, et al. Effects of *Chaetomorpha* growth on alkaline phosphatase activity and phosphorus concentrations in water and sediments[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 890-898.
- [30] 卢少勇, 金相灿, 郭建宁, 等. 沉积物-水系统中氮磷变化与上覆水对藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2169-2173.
Lu Shaoyong, Jin Xiangcan, Guo Jianning, et al. Variation of nitrogen and phosphorus concentration in water-sediment system and influence of overlying water on the algae growth[J]. Environmental Science, 2007, 28(10): 2169-2173.
- [31] 杨晓玲, 胡永华, 李小琴, 等. 风吹楠与大叶风吹楠的叶绿素含量比较研究[J]. 热带农业科技, 2018, 41(2): 37-42.
Yang Xiaoling, Hu Yonghua, Li Xiaolin, et al. Comparative analysis for chlorophyll contents of *Horsfieldia amygdalina* and *H.kingii*[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2018, 41(2): 37-42.
- [32] 林碌, 汤响, 张纪涛, 等. 不同水势对黄瓜花后叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2030-2040.
Lin Lu, Tang Yun, Zhang Jitao, et al. Effects of different water potentials on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cucumber during post-flowering growth stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2030-2040.
- [33] 张宇, 宫庆礼, 李景玉. 环境条件对线形硬毛藻营养盐吸收影响的季节变化[J]. 海洋湖沼通报, 2015: 50-62.
Zhang Yu, Gong Qingli, Li Jingyu. Seasonal nutrient uptake by *Chaetomorpha linum* (O.F.Muller) kutzing under different environmental factors[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015: 50-62.
- [34] 徐晟, 李欣, 钟萍, 等. 苦草根系对硝氮和氨氮的吸收[J]. 生态科学, 2012, 31(3): 312-317.
Xu Sheng, Li Xin, Zhong Ping, et al. The uptake of nitrate and ammonium by the root of *Vallisneria spiralis*[J]. Ecological Science, 2012, 31(3): 312-317.
- [35] 侯金枝. 荣成天鹅湖沉积物磷的释放规律及其影响因素的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.
Hou Jinzhi. Study on phosphorus release from the sediments and its influencing factors in Rongcheng Swan Lake[D]. Yantai: Yantai university, 2013.
- [36] 魏全源. 微生物对水库沉积物氮释放的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
Wei Quanyuan. The research of microbial effects on nutrient release from aquatic sediments[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [37] 薛菲菲. 养殖池塘中氨氮降解有益微生物的分离与鉴定[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Xue Feifei. Isolation and identification of beneficial microbial degradation of ammonia nitrogen in aquaculture ponds[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [38] 陈晓光, 李洪民, 张爱君, 等. 不同氮水平下多效唑对食用型甘薯光合和淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1728-1733.
Chen Xiaogaung, Li Hongmin, Zhang Aijun, et al. Effect of paclobutrazol under different n-application rates on photosynthesis and starch accumulation in edible sweetpotato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(9): 1728-1733.
- [39] 田江梅. 氮磷钾肥对甘薯产量品质影响及光合和养分积累的调控[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
Tian Jiangmei. The effect of NPK fertilizers on yield-quality, the regulation of photosynthesis and nutrient accumulation of sweet potato[D]. Chongqing: Xi'an University, 2016.

Effect of *Cladophora* sp. on the content of nutrient in sediment-water interface from the pond breeding of *Apostichopus japonicus*

CAO Xue-bin¹, MA Wei-wei², LI Qi², WU Chun-mei², WU Cai-mi²,
JIANG Ai-li², XING Rong-lian²

(1. National Algae and Sea Cucumber Project Technology Research Centre, Shandong Oriental Ocean Sci-Tech Co., LTD., Yantai 264005, China; 2. School of Life Science, YanTai University, YanTai 264005, China)

Received: Dec. 5, 2017

Key words: the pond breeding of *Apostichopus japonicus*; *Cladophora* sp.; sediment-water; nutritive salt

Abstract: To study the effect of *Cladophora* sp. on the nutrient in sediment-water interface, laboratory static culture was conducted. The temperature was 25°C, light intensity was (4000 ± 200)lx. The content of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N), nitrite nitrogen (NO₂⁻-N), total phosphorus (TP), reactive phosphorus (PO₄³⁻-P) in the overlying water was measured periodically. The main results were given as follows: There were significant differences between the nutrient content caused by the biomass of *Cladophora* sp. ($P < 0.05$), and their content increased first and decreased with a peak in 6~24 h. The maximum concentration of TN, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, NH₄⁺-N, TP, PO₄³⁻-P was that the amount of algae was 0.5~4.5 g/L. The content of each nutrient gradually decreased, and reached the minimum value when the culture time was more than 24 h. When the biomass was 8.5 g/L, the absorption of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N was the best; the biomass of 0.5 g/L was the best for the absorption of NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P. Therefore, high biomass (8.5 g/L) *Cladophora* sp. can reduce NO₃⁻-N and NO₂⁻-N content in overlying water, but low biomass (0.5 g/L) *Cladophora* sp. can effectively absorb NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P in overlying water.

(本文编辑: 梁德海)