

浒苔在对虾养殖尾水中生长特性及其对氮磷去除效果的初步研究

吴嘉仪¹, 戚静杰¹, 向文洲², 王佳莹¹, 郑 诚¹, 王 政¹, 杨 文¹, 郑忠明^{1*}

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: 研究了不同温度下浒苔在对虾养殖尾水中的生长及其对 N、P 营养盐去除效果的影响。实验设置了 3 个温度梯度组(15、20、25 °C), 每个温度以自然海水(SW)及 f/2 海水培养基(F/2)为对照组, 对虾养殖尾水(WW)为处理组, 隔天测定各组中浒苔的生长状况及尾水组中 N、P 营养盐含量的变化。结果显示, 浒苔在 WW 组中生长较 SW 组好, 差异显著; 而与 F/2 组相比无显著性差异。20 °C 下浒苔生长最适宜, 特定生长率达 34.80%·d⁻¹。各组中 NH₄⁺最大去除率在温度为 15、20、25 °C 时分别为 96.91%、97.21%、98.18%; NO₂⁻和 NO₃⁻的去除率均大于 99%; PO₄³⁻和 TP 去除率在 25 °C 时达到最大, 分别为 97.87%、90.10%; 表明温度对浒苔生长及其吸收 WW 中 N、P 营养盐有一定影响。

关键词: 浒苔; 海水养殖尾水; 生长; 营养盐

中图分类号: Q149

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 05-0018-06

随着我国集约化海水养殖产业的迅速发展, 规模不断扩大^[1], 养殖过程产生的尾水也随之增多。尾水中含有残饵、养殖生物排泄物等营养物质, 未经处理直接排放必然会导致附近海域富营养化, 造成水质污染, 从而制约我国水产养殖业的健康发展^[2-3]。因此, 对养殖尾水进行必要的处理已势在必行。目前养殖尾水处理方法主要有物理、化学、生态等^[4-5], 其中物理和化学处理法存在成本高、操作复杂、产生二次污染等问题, 在应用中受到很大限制。而生态处理技术则由于其运行成本低、安全、无需添加化学试剂、能获得一定经济价值的产品等优势, 被广泛应用^[6]。生态处理法中有许多“工具生物”及众多的搭配方法, 而大型藻类能有效吸收利用养殖尾水中 N、P 等营养盐, 是目前公认最常用的“工具生物”之一。

浒苔(*Ulva prolifera*)是一种具有广温、广盐、耐干旱、自然繁殖能力特强的天然野生大型海藻^[7]。其藻体翠绿、味道鲜美, 富含维生素和生物活性物

质, 有较高的食用和药用价值^[8-9]。此外, 有研究发现^[10-11], 浒苔能有效地吸收和利用 N、P 营养盐。因此, 利用养殖尾水培养浒苔, 既能对养殖尾水进行处理, 缓解排放区的环境压力, 又能获得具有综合利用价值高的浒苔生物。

浒苔是潮间带大型海藻, 在生长过程中易受环境因子的影响。在诸多环境效应中, 温度是最重要的影响因素之一, 直接影响藻类的生长和对 N、P 等营养盐的吸收^[12-13]。适宜的温度能够促进浒苔的生长, 从而促使养殖尾水中 N、P 营养盐的快速下降。目前, 对浒苔的研究主要针对其对海域内或定量营养盐的吸收效果^[11-14], 而海水养殖尾水成分复杂, 并且高度富营养化, 浒苔能否在这样的环境中生长并吸收净化 N、P 营养盐, 其在处理尾水过程中如何适应温度的变化, 这些内容均未见报道。为此, 本文通过探究不同温度条件下, 浒苔在对虾养殖尾水中的生长状况, 分析其对尾水中 N、P 营养盐的吸收利用, 旨在评价浒苔作为海水养殖

收稿日期: 2017-10-27.

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

基金项目: 浙江省公益技术研究计划(LGN18C190008); 宁波市海洋与渔业局项目(HK2015000047)。

第一作者: 吴嘉仪(1989—), 女, 广东清远人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 水产养殖生态。E-mail: wu13826479968@163.com

*通信作者: 郑忠明(1965—), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 水产养殖生态及水域生态。E-mail: zhengzhongming@nbu.edu.cn

尾水生态处理的“工具生物”的适用性, 为我国养殖尾水的处理和水产养殖健康持续发展提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验中使用的浒苔由象山旭文海藻开发有限公司于 2016 年 11 月经孢子发育而成. 在 20 °C 光照培养箱中用 f/2 海水培养基^[15]通气活化培养, 并从中挑取大小相近的藻株饥饿培养 3 d 后开始实验. 养殖尾水取自浙江省宁波市瞻岐椿琳对虾养殖场, 盐度为 25‰, pH 为 7.24, 4 °C 静置 24 h 去除沉淀物, 经 0.45 μm 孔径滤膜过滤直接用于实验. 实验用自然海水, 取自宁波市沿海, 盐度为 23‰(添加海盐补充至 25‰), pH 为 7.82, 温度为 15 °C, 其他理化因子见表 1.

1.2 实验设计

浙北地区对虾大棚养殖尾水处理时间主要集中在每年 5 月中旬至 7 月中旬以及 10 月初至 11 月中下旬, 而这段时间室外池塘海水温度变化大致为 15~25 °C, 因此本实验设置 15、20、25 °C 3 个温度梯度. 每个温度设置自然海水和 f/2 海水培养基作为对照, 养殖尾水组为处理组, 共设 9 个实验组, 每组 3 个平行. 将经饥饿培养的浒苔(约 0.100 g)接入装有 700 mL 培养基的 1 000 mL 锥形瓶中, 置于恒温光照培养箱(GXZ-260B, 宁波江南仪器公司), 光照强度为 7 000 lx, 光:暗周期为 12 h:12 h, 盐度为 25‰, 通气培养 12 d, 培养期间隔天测定其生长及养殖尾水组中的 N、P 营养盐含量.

1.3 生长测定

藻株培养周期内每天观察浒苔的生长状况, 隔天取出全部藻株测定其湿重, 并在每个实验组随机挑取 6 株藻株, 测量藻丝长度, 测定完的藻株立即放回锥形瓶继续培养.

湿重测定方法^[13]: 将锥形瓶中全部藻株捞出, 用去离子水清洗 3 遍, 滤纸沥干水分, 用电子天平(BS-124S, 赛多利科学仪器有限公司)称其湿重,

测定重复 3 次, 取均值. 其特定生长率计算公式为:

$$R_{SGR}=(\ln W_t-\ln W_0)/T\times 100,$$

式中: R_{SGR} 为特定生长率; W_t 为培养 t 天的藻株湿重; W_0 为间隔起始的藻株湿重; T 是取样间隔时间.

1.4 水质营养盐测定

实验周期内隔天测定水体中氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、活性磷含量, 培养周期前后测定水样 TP 含量. 采用磷钼蓝分光光度法测定 PO_4^{3-} 和 TP 含量. NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 的测定采用全自动间断化学分析仪(Smart-Chem 200, Brookfield France)^[16].

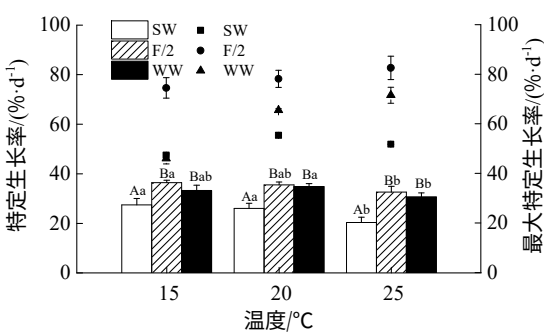
1.5 数据处理

用 SPSS 18.0 软件对实验数据进行统计分析, 数值以均值±标准偏差表示. 不同处理之间的指标值采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 以 $P<0.05$ 作为差异显著水平.

2 结果

2.1 浒苔生长状况

根据浒苔湿重计算各处理组浒苔的特定生长率和最大特定生长率, 结果如图 1 所示.



不同大写字母表示同一温度不同培养基生长差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示同一培养基不同温度生长差异显著.

图 1 不同温度组浒苔日均特定生长率和最大特定生长率

从图 1 可知, 在 3 种温度下浒苔的特定生长率和最大特定生长率均大于 SW 对照组($P<0.05$), 而与 F/2 组相比差异不显著. 尾水组 20 °C 培养下, 浒苔生长最快, 特定生长率达 $34.80\% \cdot d^{-1}$, 高于 15、

表 1 各实验组中初始氮、磷营养盐浓度 $mg \cdot L^{-1}$

组别	NO_2^--N	NO_3^--N	NH_4^+-N	$PO_4^{3-}-P$	TP
SW	0.063 ± 0.003	0.290 ± 0.095	1.179 ± 0.070	0.023 ± 0.001	0.035 ± 0.007
F/2	0.130 ± 0.010	5.035 ± 0.185	2.807 ± 0.042	0.598 ± 0.004	0.766 ± 0.112
WW	13.100 ± 0.184	15.963 ± 0.301	5.140 ± 0.046	0.815 ± 0.004	1.451 ± 0.017

25℃时特定生长率,但25℃中浒苔的最大特定生长率高达 $71.53\% \cdot d^{-1}$,高于20℃时最大特定生长率($65.48\% \cdot d^{-1}$).

培养周期内各温度养殖尾水组的浒苔均比SW对照组长2~3 cm,而比F/2组则短4~6 cm,差异明显(表2).在15℃和20℃下,尾水组浒苔生长无显著差异,藻丝长度几近一致,约为原始藻丝长度的5.8倍.而25℃下浒苔藻丝长度明显低于15℃和20℃,平均藻丝相差约2 cm.

表2 浒苔平均藻丝长度

组别	0 d 藻丝	12 d 藻丝长度/cm		
	长度/cm	15℃	20℃	25℃
SW	1.86 ± 0.27	10.82 ± 0.55^a	10.78 ± 1.10^a	7.37 ± 1.11^a
F/2	1.86 ± 0.27	18.87 ± 1.97^b	18.42 ± 1.40^b	14.71 ± 0.83^b
WW	1.86 ± 0.27	12.25 ± 1.27^{Ac}	12.55 ± 1.77^{Ac}	10.69 ± 1.02^{Bc}

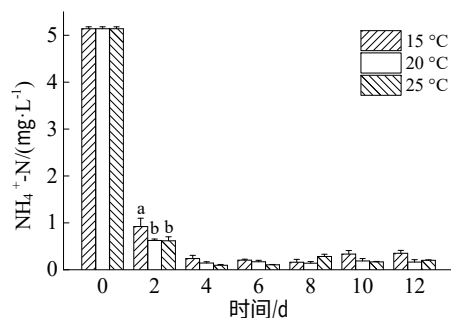
注:不同小写字母表示同一温度不同培养基下差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一培养基不同温度下差异显著.

2.2 浒苔对养殖尾水营养盐吸收效果

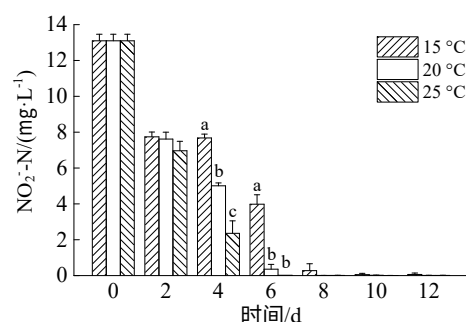
浒苔对养殖尾水中 NH_4^+ 的吸收很彻底且迅速,培养第2天各温度组去除率均超过80%(图2(a)).低温组(15℃)吸收速度略低于20、25℃组,培养后期水体中残留 NH_4^+ 含量均比20、25℃组高.15、20、25℃各组 NH_4^+ 去除率均在第4天达到最大,分别为96.91%、97.21%、98.18%,去除效果显著.

实验开始后各温度组 NO_2^- 含量均急剧下降,在培养第2天分别降低了40.88%、41.81%、46.84%(15、20、25℃),三者之间无显著差异(图2(b)).培养第4~8天 NO_2^- 含量下降速度随着温度的升高而增大.培养第6天20℃和25℃实验组下降开始趋于平缓,去除率分别达97.25%、99.83%,而低温组第6天去除率仅为69.59%,直至第8天去除率才达99%.同样,3个温度组均在0~8 d中显著降低了该尾水中的 NO_3^- 浓度(图2(c)),与 NO_2^- 变化趋势相近.在各温度实验组中,15℃培养浒苔尾水中硝酸盐浓度下降最为缓慢,0~2 d去除率为34.76%,直至培养第8天去除率才达99%.20℃培养前6 d内尾水中 NO_3^- 含量下降速度高于25℃,而到第6天两组去除率相近,分别为99.46%和99.43%.

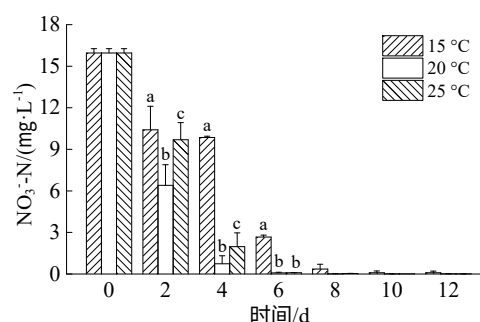
各温度浒苔对尾水中 PO_4^{3-} 的吸收效果如图2(d)所示.各处理组1~2 d内均无明显的快速吸收阶段,低温组中 PO_4^{3-} 含量从第2天开始逐步下降,



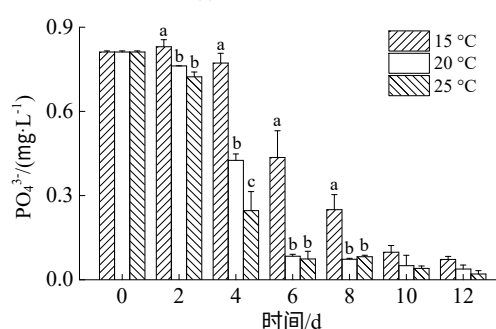
(a) 表示 NH_4^+-N 含量



(b) 表示 $NO_2^- - N$ 含量



(c) 表示 $NO_3^- - N$ 含量



(d) 表示 PO_4^{3-} 含量

不同小写字母表示同一培养天数不同温度含量差异显著($P < 0.05$).

图2 养殖尾水组中各温度组4种无机营养盐含量变化到第10天去除率达到91.16%.20、25℃组中 PO_4^{3-} 含量在2~6 d内急速下降,且下降趋势几近一致,去除率高达89.31%和89.92%.培养周期最后一天15、20、25℃处理组中 PO_4^{3-} 去除率分别达92.76%、94.73%和97.87%.浒苔对TP的吸收效果显著(表

3). 25 °C时, 浒苔对 TP 去除率最大, 为 90.10%, TP 质量浓度从 $(1.451 \pm 0.016) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $(0.143 \pm 0.017) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降低了 $1.307 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 15 °C和 20 °C时, TP 的质量浓度分别下降了 $1.274 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.164 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 80.23%和 87.82%.

表 3 各温度养殖尾水中 TP 含量的变化

处理组 温度/°C	TP/(mg·L ⁻¹)		去除率/ %
	0 d	12 d	
15	1.451±0.016	0.286±0.008	80.23 ^a
20	1.451±0.016	0.177±0.032	87.82 ^b
25	1.451±0.016	0.143±0.017	90.10 ^b

注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$).

3 讨论

N、P 营养盐是海水集约化养殖系统中造成水体富营养化、危害养殖对象的主要因素. 大型海藻作为海洋生态系统中的重要成员, 能够吸收水体中的 N、P 等营养盐供其生长代谢. 目前利用大型海藻去除养殖尾水中 N、P 营养盐已成为国内外学者研究热点, 学者们一致认为利用大型海藻进行养殖尾水的处理是净化水体、延缓水体富营养化的重要措施之一^[17]. 有研究表明^[17-19], 孔石莼(*Ulva pertusa*)、针叶蕨藻(*Caulerpa sertularioides*)、江蓠(*Gracilaria* sp.)等大型海藻都能有效去除养殖尾水中的 N、P 营养盐. 本研究中浒苔吸收利用了养殖尾水中营养盐用于生长, 日均特定生长率高于 Li 等^[20]正常条件培养浒苔的生长(约为 $20\% \cdot \text{d}^{-1}$). 本实验浒苔对尾水中 N、P 营养盐的去除均可达 90%, 培养后期对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的去除甚至高达 99%. 由此可见, 浒苔可用于处理养殖尾水, 具有作为“生物滤器”的可能性. 浒苔对尾水中 PO_4^{3-} 和 TP 的去除率最高分别为 97.87%、90.10%, 处理后的尾水达到浙江省水产养殖废水排放标准($\text{PO}_4^{3-} < 0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 无要求)^[21].

海藻生活在多变的海洋环境中, 其生长和生理特性都易受光照强度、盐度、温度等环境因素的影响. 温度更是控制着藻细胞内众多同化过程的反应速率, 影响藻体内酶活性. 已有研究表明^[22], 温度通过影响藻细胞内硝酸还原酶的活力, 调节藻类对 N 营养盐的吸收, 从而对藻类的生长产生影响. 本研究中, 尾水组浒苔在 20 °C时特定生长

率达到最大. 25 °C时浒苔虽生长旺盛, 最大特定生长率高于 20 °C时, 但生长期较短, 且培养后期生物量有所下降, 其原因可能是培养后期体系中营养盐被耗尽, 浒苔进入稳定期后逐渐衰亡. 浒苔在 15 °C时生长较缓慢, 这与文献^[23-24]的研究结果相一致, 低温影响浒苔新陈代谢的各个步骤, 从而限制其生长速率, 导致生长缓慢. 因此可以认为浒苔在尾水培养中最适温度为 20 °C左右.

植物对营养盐的吸收是一个非常复杂且连续的过程, 理化和生物等环境因子都会直接或间接地影响植物体内的生理生化过程, 从而影响植物对营养盐的吸收^[25]. 本研究中浒苔在处理养殖尾水时对低温(15 °C)的适应性较差. 培养第 6 天, 15 °C下浒苔对 NO_2^- 与 NO_3^- 的去除率分别为 (69.60%、83.31%), 而 20、25 °C组高达 97%以上. 这可能是在较低温时硝酸盐还原酶活性低, 因此还原硝氮盐能力也相应下降^[21], 导致其去除效果偏低. 本实验中 20 °C组与 25 °C组相比, 浒苔对尾水中 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 的最终处理效果虽无显著性差异, 但在培养中期其去除率随温度上升而增强, 因此适当的高温能促进浒苔对营养盐的吸收. Lundberg 等^[26]研究发现, 石莼在高氮环境中对磷酸盐的吸收不明显, 而本实验 15 °C组浒苔对 NO_2^- 与 NO_3^- 的吸收较差, 培养体系中 N 营养盐的残留量较高, 推测浒苔在该温度下对 PO_4^{3-} 的吸收也不明显, 因此培养前期的去除效率远低于其他 2 个温度组. 随着培养时间增加, 尾水中 N 营养盐含量消耗, 浒苔对 PO_4^{3-} 的吸收也逐渐增强, 最终与 20、25 °C组去除率相近. 另外, 实验中 3 个温度组的浒苔对 NH_4^+ 的吸收差异不明显, 这可能是由于海藻对氨氮的吸收是以 NH_4^+ 的形式顺化学势梯度, 属于被动吸收, 无需消耗能量^[27].

3 个温度组中, F/2 对照组的平均藻丝长度明显高于尾水组(表 2), 而两组间的特定生长率却没有显著性差异(图 1), 说明尾水培养的浒苔藻丝要比 F/2 对照组更为粗壮, 藻丝丰度更大. 刘金福等^[28]指出营养盐是影响长胞藻(*Dolichospermum*)藻丝丰度的主要影响因子, 同时 f/2 海水培养基中培养体系较稳定, 不仅有合适氮磷比, 还含有 Fe 和 Mn 等微量元素. 通常认为合适氮磷比和 Fe、Mn 等元素能直接或者间接地影响藻类的生长^[29-30]. 另外, 实

验中测定的 SW 对照组 NH_4^+ 的含量较高(表 1), 其原因可能是由于对照组海水取回后在实验室放置过久; 再者宁波地处东海, 是我国赤潮高发海区, 导致采集到的海水氨氮含量较高. 有文献报道^[31], 夏季东海氮营养盐分布以氨氮为主, 春季则以硝态氮为主.

本研究培养周期为 12 d, 浒苔对养殖尾水 NH_4^+ 及 NO_3^- 去除率在培养第 4 天就高于 90%, NO_2^- 、 PO_4^{3-} 和 TP 去除率则在培养第 6 天达到近 90%. 在大规模应用中, 养殖尾水处理滞留时间越短越好, 较短的尾水处理周期可节省大量的人力和物力, 降低了尾水处理的成本. 因此, 选择合适的尾水处理时间, 有助于提高养殖尾水处理效率.

4 结论

本实验研究了不同温度下浒苔在对虾养殖尾水中生长情况及其对养殖尾水 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP 的吸收变化, 以探索浒苔对养殖尾水的净化能力. 结果表明, 在 20 °C 时浒苔生长最快; 各温度组(15、20、25 °C)浒苔对尾水 N、P 去除效果明显, 且随温度的增加去除效率增强. 说明浒苔在对虾养殖尾水中既能良好生长, 又能有效地吸收养虾尾水中的氮、磷营养盐, 控制适宜的温度对养殖尾水的处理有一定的帮助.

参考文献:

- [1] Cao L, Naylor R, Henriksson P, et al. China's aquaculture and the world's wild fisheries[J]. Science, 2015, 347(6218): 133-135.
- [2] Tovar A, Moreno C, Mánuelvez M P, et al. Environmental impacts of intensive aquaculture in marine waters[J]. Water Research, 2000, 34(1):334-342.
- [3] 刘道玉, 吴伟. 水产养殖水体污染及微生物修复的研究[J]. 现代农业科技, 2011(17):253-256.
- [4] Lin S H, Wu C L. Electrochemical removal of nitrite and ammonia for aquaculture[J]. Water Research, 1996, 30(3): 715-721.
- [5] Buhmann A, Papenbrock J. Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives[J]. Environmental & Experimental Botany, 2013, 92(92):122-133.
- [6] 蔡继哈, 沈奇宇, 郑向勇, 等. 氨氮污染对水产养殖的危害及处理技术研究进展[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2010, 29(2):167-172.
- [7] 张必新, 王建柱, 王乙富, 等. 大型绿藻浒苔藻段及组织块的生长和发育特征[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 421-430.
- [8] Higashi O K, Otani S Y. Potent suppressive effect of a Japanese edible seaweed, *Enteromorpha prolifera* (Sujiao-nori) on initiation and promotion phases of chemically induced mouse skin tumorigenesis[J]. Cancer Letters, 1999, 140(2):21-25.
- [9] Hiraoka M, Oka N. Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new 'germling cluster' method[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(1):97-102.
- [10] 何洁, 刘瑀, 张立勇, 等. 三种大型海藻吸收营养盐的动力学研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(1):1-5.
- [11] Zhou Y, Tan L, Pang Q, et al. Influence of nutrients pollution on the growth and organic matter output of *Ulva prolifera* in the southern Yellow Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1):107-114.
- [12] 李婷, 徐安敏, 孙成波, 等. 生态因子对缘管浒苔、磷吸收速率的影响[J]. 热带生物学报, 2010, 1(3):197-201.
- [13] Xiao J, Zhang X, Gao C, et al. Effect of temperature, salinity and irradiance on growth and photosynthesis of *Ulva prolifera*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(10):114-121.
- [14] Luo M B, Liu F, Xu Z L. Growth and nutrient uptake capacity of two co-occurring species, *Ulva prolifera* and *Ulva linza*[J]. Aquatic Botany, 2012, 100(7):18-24.
- [15] Guillard R R L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates culture of marine invertebrate animals[M]. New York: Springer, 1975:29-60.
- [16] 伍华雯, 陆开宏, 钱伟, 等. 固定化微生物联合大型水生植物净化养殖废水的实验研究[J]. 中国水产科学, 2013, 20(2):316-326.
- [17] 郑兴, 崔云亮, 刘傲东, 等. 针叶蕨藻对养殖废水中氮盐的净化[J]. 热带生物学报, 2016, 7(1):43-47.
- [18] 孙琼花, 闫慧, 沈淑芬, 等. 孔石莼对养虾废水营养盐吸收的研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2013, 29(4):109-113.
- [19] Yang Y F, Fei X G, Song J M, et al. Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters[J]. Aquaculture, 2006, 254(1/4):248-255.
- [20] Li H, Zhang Y, Han X, et al. Growth responses of *Ulva prolifera* to inorganic and organic nutrients: Implications for macroalgal blooms in the southern Yellow Sea, China [EB/OL]. [2017-07-20]. <https://www.researchgate.net/publication/303544417>.

- [21] DB33/T 453-2006. 水产养殖废水排放要求[S].
- [22] 陈月红. 温度、光照对浒苔生长及其硝酸还原酶活力的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [23] 丁雁雁. 温度、光照对东海几种典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [24] 于萍, 张前前, 王修林, 等. 温度和光照对两株赤潮硅藻生长的影响[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(1):38-40.
- [25] Flynn K J, Fasham M J R. A short version of the ammonium-nitrate interaction model[J]. Journal of Plankton Research, 1997, 19(12):1881-1897.
- [26] Lundberg P, Weich R G, Jensen P, et al. Phosphorus-31 and nitrogen-14 NMR studies of the uptake of phosphorus and nitrogen compounds in the marine macroalgae *Ulva lactuca*[J]. Plant Physiology, 1989, 89(4):1380-1387.
- [27] 兰岚. 带形蜈蚣藻(*Grateloupia turuturu* Yamada)对 N 的吸收、利用和转化的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [28] 刘金福, 胡韧, 段雪珂, 等. 长孢藻(*Dolichospermum*)丝体长度与丰度的变化关系及其水华指示作用[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3):496-502.
- [29] Wernerand E E, Anholt B R. Ecological consequences of the trade-off between growth and mortality rates mediated by foraging activity[J]. The American Naturalist, 1993, 142(2):242-272.
- [30] Rosenberg G, Probyn T A, Mann K H. Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: Response to continuous and single additions of ammonium[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 1984, 80(2): 125-146.
- [31] 米铁柱, 姚庆祯, 孟佳, 等. 2011 年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 678-688.

A study on growth and treatment efficiency of nitrogen and phosphorus nutrients of *Ulva prolifera* cultured by shrimp fishery wastewater

WU Jia-yi¹, QI Jing-jie¹, XIANG Wen-zhou², WANG Jia-ying¹, ZHENG Cheng¹,
WANG Zheng¹, YANG Wen¹, ZHENG Zhong-ming^{1*}

(1.School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the influence of different temperatures on both the growth of *Ulva Prolifera* cultured by shrimp fishery wastewater and the removal of nitrogen and phosphorus nutrients in the culture. In the present study, *U. Prolifera* was cultivated at three different temperatures (15, 20, 25 °C), with seawater (SW) and f/2 seawater medium (F/2) being set up as control. The growth of *U. Prolifera* and the contents of N, P nutrient in aquaculture wastewater (WW) of each group were determined every other day. The results showed that the growth of *U. Prolifera* in shrimp fishery wastewater was better than SW, the difference was significant. But there was no significant difference as compared with the F/2. The optimal growth was observed at 20 °C, with the specific growth rate (SGR) being 34.80%·d⁻¹. The removal rate of NH₄⁺ reached the maximum to 96.91%, 97.21% and 98.18%, respectively (15, 20, 25 °C). The removal rate of NO₂⁻ and NO₃⁻ in each test group exceeded 99%. Meanwhile, the removal rate of PO₄³⁻ and total phosphorus were both the highest at 25 °C, which was 97.87% and 90.10% respectively. Based on these data, temperature was suggested to have some effect on the growth of *U. Prolifera* and its removal rate of N and P in the aquaculture wastewater. Thus, the application of *U. Prolifera* in purifying aquaculture wastewater could have a great significance for the healthy and sustainable development of aquaculture in China.

Key words: *Ulva prolifera*; marine aquaculture wastewater; growth; nutrients

(责任编辑 史小丽)