

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的生长、光合作用 及其对扇贝排泄氮磷的吸收

毛玉泽^{1, 2}, 杨红生^{1, *}, 周 毅¹, 胡宗福³, 袁秀堂¹, 游 奎¹, 王如才⁴

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071;

3. 内蒙古民族大学, 通辽 028042; 4. 中国海洋大学, 青岛 266003)

摘要:研究了不同温度、光照条件下大型藻类龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 的生长和光合作用特性, 及其对扇贝排泄氮、磷的吸收作用。结果表明温度与龙须菜的生长和光合作用显著相关, 在本实验条件下, 15 ~ 25 都适宜龙须菜生长, 其中 20 龙须菜具有较高的生长率 (SGR), 为 2.8 %/d; 光合作用速率随温度升高和光照的增加而升高, 30 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时最高, 最大光合作用速率 (P_{max}) 为 5.0 $\text{mg O}_2/(\text{g dw} \cdot \text{h})$ 。龙须菜对扇贝排泄氮、磷有较强的吸收作用, 其吸收率和去除效率与放养密度和养殖时间有关。对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的最大去除效率分别为 83.7 % 和 70.4 %, 最大吸收率分别为 9.9 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{h})$ 和 4.3 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{h})$ 。实验证明龙须菜生长温度范围和光照范围适合中国北方海区养殖, 并且能有效吸收和去除扇贝排泄氮、磷, 可以作为生物滤器与贝类及其他养殖动物进行综合养殖。

关键词:龙须菜; 生长; 光合作用; 氮; 磷; 吸收率; 去除效率; 扇贝

文章编号: 1000-0933(2006)10-3225-07 **中图分类号:** Q143, Q178.1, Q948.8, Q958 **文献标识码:** A

Studies on growth and photosynthesis characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* and its capacity to uptake ammonium and phosphorus from scallop excretion

MAO Yu-Ze^{1, 2}, YANG Hong-Sheng^{1, *}, ZHOU Yi¹, HU Zong-Fu³, YUAN Xiu-Tang¹, YOU Kui¹, WANG Ru-Cai⁴ (1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao 266071, China; 3. Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028042, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266003, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3225 ~ 3231.

Abstract: Growth and photosynthesis characteristics of high temperature tolerant macroalga, *Gracilaria lemaneiformis*, were studied at different temperature and light irradiance. Nutrient uptake rate and nutrient reduction efficiency of ammonium and phosphorus from scallop excretion were determined. Temperature significantly affected the growth and photosynthesis of this species. The algae could grow well when the temperature ranged 15 and 25, and reached the fastest growth rate (SGR) of 2.8 % per day at 20. The photosynthetic rate increased with the increasing temperature and light irradiance, reaching the maximum with 5.0 $\text{mg O}_2/(\text{g dw} \cdot \text{h})$ at 30 and 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. *G. lemaneiformis* can absorb efficiently the ammonium and phosphorus from scallop

基金项目: 国家重点基础研究规划资助项目 (G1999012012); 山东省自然科学基金资助项目 (Q2002D03); 国家自然科学基金资助项目 (30271021); 国家十五攻关资助项目 (2004BA526B0401); 山东省科技攻关资助项目; 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室开放课题资助项目

收稿日期: 2005-12-21; **修订日期:** 2006-09-21

作者简介: 毛玉泽 (1970 ~), 男, 内蒙古赤峰市人, 博士, 主要从事鱼类和贝类生理生态学研究。E-mail: maoyuze @263.net

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hshyang @ms.qdio.ac.cn

致谢: 莱阳农学院水产系 1998 级学生王丽丽和大连水产学院养殖系 1998 级学生马跃对本实验的完成做了部分工作; 以色列海洋与湖沼研究所国家海水养殖中心的 Muki Shpigel 教授润色英文摘要, 特此致谢!

Foundation item: The project was supported by National Key Foundational Research Project (No. G1999012012), Shandong Natural Science Foundation (No. Q2002D03), National Natural Science Foundation of China (No. 30271021), National Key Project (2004BA526B0401), and financial support from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences

Received date: 2005-12-21; **Accepted date:** 2006-09-21

Biography: MAO YuZe, Ph. D., mainly engaged in ecology and physiology of fish and shellfish. E-mail: maoyuze @263.net

excretion. The nutrient uptake rate and nutrient reduction efficiency of ammonium and phosphorus changed with cultivation density and period. The maximum reduction efficiency of ammonium and phosphorus were 83.7 and 70.4 percent, respectively. The maximum uptake rate of ammonium and phosphorus were $9.9 \mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{h})$ and $4.3 \mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{h})$. Results indicated that this seaweed can be cultivated in north China and is a suitable candidate for integrated mariculture of seaweed and bivalve. The integration can benefit economy and environment in a sustainable manner in warm seasons in coastal waters of north China.

Key words: *Gracilaria lemaneiformis*; growth; photosynthesis; ammonium; phosphorus; nutrient uptake rate; nutrient reduction efficiency; scallop

清洁生物(贝类、大型藻类及某些沉积食性动物)的综合养殖近年来得到长足发展,尤其大型藻类的生态养殖模式得到国内外学者的重视,普遍认为养殖大型海藻是净化养殖废水、控制水域富营养化、提高水域利用率和保护生态环境的有效措施^[1~4]。海带是我国北方海区养殖的重要的大型经济海藻,其与贝类的间养已经有很长的历史。但海带属低温型大型藻类,高温季节前大多已经收获,收获后海区中缺乏其他大型藻类的养殖,而在我国北方海域,环境恶化和病害发生主要发生在高温季节,养殖耐高温大型藻类可能是解决这一问题的有效途径之一^[5,6]。

龙须菜 *Gracilaria lemaneiformis* 是一种大型海藻,系红藻门,杉藻科,江蓠属,自然分布区为山东半岛,具有生长快、琼胶含量高、能适应较高温度等特点被广泛养殖,具有很高的经济价值和生态作用^[7],但其作为生物过滤器在北方海区养殖鲜有报道。于2002年4月从福建移植该藻在中国北方重要养殖海区——山东荣成桑沟湾进行养殖试验,并对其生长和光合作用特性进行了现场研究^[5],本文在实验室条件下研究了龙须菜在不同温度和光照条件下的生长和光合作用特性,测定了其对扇贝排泄氮、磷的吸收作用,力图为龙须菜在北方海区养殖及其生物过滤作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 龙须菜的采集和暂养

实验所用龙须菜采集于桑沟湾实验海区,选择健康的藻体,冷藏运回实验室。反复清洗,去除可见附着物,在过滤的自然海水中暂养一周,暂养期水温(20 ± 1),光照强度 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,盐度 32,光周期 13L 11D,每天换水 1 次。

1.2 温度对龙须菜生长的影响

选择藻体的主枝剪成 3~4cm 长的藻段,暂养在消毒海水(煮沸后持续 10min)中备用。称取(1 ± 0.005)g 藻段放入 500ml 培养瓶中,内装有 400ml f/2 型加富培养液(消毒过滤海水配制,含 $20 \mu\text{mol NH}_4\text{NO}_3$, $2.5 \mu\text{mol KH}_2\text{PO}_4$, $0.5 \mu\text{mol NaHCO}_3$)。

设置 10、15、17、20、25 和 30 6 个温度梯度,光照、盐度和光周期等与暂养时相同,每个处理 3 重复,测定不同温度下龙须菜的生长速率。实验在 GXZ-300C 型自动控温的生化培养箱中进行,共培养 14d,每 3d 更换 1 次培养液,每天摇瓶 3 次。实验中期(7d)和实验结束(14d)称量藻体湿重,根据公式 $\text{SGR} = [(W_t/W_0)^{1/t} - 1] \times 100$ 计算特定生长率(SGR),式中, W_t 为实验中期或结束时藻体鲜重, W_0 指实验开始时藻体鲜重, t 为培养时间。

1.3 光照对龙须菜生长的影响

设置 20, 40, 60, 80, 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 6 个光照梯度,其它条件与暂养时相同,每个处理 3 个重复,测定不同光照条件下龙须菜的生长速率。培养瓶放置在不同光照的生化培养箱中培养 14d。日常管理和生长率的测定方法同上。

培养箱为外置日光灯光源,通过灯管的数量和距离灯管的远近调解光照强度,实验前用 Li-250 型量子/辐射/照度计定位不同光照点。实验时每天 3 次测量光照,以校正光照,实际光照强度为培养瓶四周光照强度的平均值。

1.4 温度和光照双因子对龙须菜光合作用的影响

实验设置 5 个不同的温度,即 10、15、20、25、30 和 3 个光照强度分为 40、80 μmol/(m²·s) 和 120 μmol/(m²·s),每个处理均设置 3 个重复。另设黑暗对照组(瓶壁用黑塑料袋包裹,3 个重复)测定呼吸作用。500 ml 培养瓶中加入(1 ±0.005) g 藻体,用虹吸法加满消毒海水,同时加入 1ml NaHCO₃ 以提供光合作用所需要的碳源,瓶口用封口膜密封。培养瓶放置在光照培养箱中培养 3 h 后取出,用虹吸法取水样。测定实验开始和结束时培养瓶中溶解氧(DO)的变化,碘量法测定 DO。光合作用速率通过产氧计算:光合作用速率 $P_{O_2} = (O_2' - O_2) \times V_0 / W_0 / t$,式中, P_{O_2} 是光合作用速率[mg/(gdw·h)], O_2' 是实验结束时培养瓶内 O₂ 的浓度(mg/l), O_2 是对照瓶内 O₂ 的浓度(mg/l), V_0 是培养瓶的体积(l), W_0 是干重(g), t 是实验时间(h)。另取若干实验藻体样品(3 个平行)用纱布吸干水分测量湿重,并于 202 型电热干燥箱 65℃ 下烘干 24h 至恒重,计算样品干湿比,换算藻体的干重。

1.5 龙须菜对扇贝排泄氮磷的吸收作用

2002 年 10 月 1 日至 10 月 21 日,用 15 个 3m³ (直径 1.8m,装水 2.8m³) 的圆柱型聚乙烯玻璃缸进行贝藻混养实验。龙须菜和栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 均来自桑沟湾贝藻养殖海区,龙须菜运输和暂养方法同上;栉孔扇贝清洗去除表面可见附着物,保温箱加冰运至实验室,在自然海水中暂养 1 周,每天换水 1 次,早晚各投喂螺旋藻粉 1 次。

实验设置 5 个处理,每个处理 3 个重复。每个缸内均放置相同规格(壳长(57.0 ±4.9)mm, $n = 200$) 的栉孔扇贝 50 个,总湿重(1196 ±42)g($n = 15$),装入养殖笼悬挂在水中。龙须菜采用夹苗法悬挂于栉孔扇贝养殖笼周围,设置 5 个不同密度,不加龙须菜的玻璃缸水槽作为对照,每个密度 3 个重复(见表 1)。每个水槽内放置 4 个气石,24h 充气;养殖期间不换水,仅补充由于蒸发减少的水;每天早、晚投喂螺旋藻粉各 5 g。每天检查扇贝的活动情况,及时捞出死亡个体。实验进行 3 周,每周测定 1 次 NH₄-N、PO₄-P 的浓度和龙须菜的湿重。

实验海水为过滤海水,实验期间温度范围为 20~13℃,平均值为(16.5 ±3.7)℃。pH 值为 7.8~8.2,盐度为 31.8~32.2,光照为自然光照,水面光照范围为 70~201μmol/(m²·s)。

表 1 不同处理栉孔扇贝和龙须菜的放养密度(湿重,g/m³)

Table 1 Polyculture density of <i>C. farreri</i> and <i>G. lemaneiformis</i> in different treatment (ww, g/m ³)										
组别 Group	对照 Control		处理 1 Treatment 1		处理 2 Treatment 2		处理 3 Treatment 3		处理 4 Treatment 4	
	扇贝 Scallop	龙须菜 Seaweed	扇贝 Scallop	龙须菜 Seaweed	扇贝 Scallop	龙须菜 Seaweed	扇贝 Scallop	龙须菜 Seaweed	扇贝 Scallop	龙须菜 Seaweed
A	406.5	0.0	428.6	67.3	441.6	144.4	429.2	272.1	443.6	352.4
B	411.9	0.0	444.5	66.9	417.5	137.4	432.9	255.4	437.3	338.7
C	405.4	0.0	453.4	73.9	417.7	135.6	423.1	262.9	413.8	351.7
Mean	407.9	0.0	442.2	69.3	425.6	139.1	428.4	263.5	431.6	347.6
比例 Ratio			6.38 1		3.06 1		1.63 1		1.24 1	

SGR 测定方法同上,用公式 $NUR = (C_t - M_t) V / WW / t$ 计算吸收率(Nutrient uptake rate,NUR), $NRE(\%) = (C_t - M_t) / C_t \times 100$ 计算去除效率(Nutrient reduction efficiency,NRE)。式中, W_0 、 W_t 指实验开始和养殖一段时间后藻体的湿重(ww,g); C_t 和 M_t 分别指养殖一段时间后对照组和实验组营养盐浓度(μmol/L); t 指养殖时间(d)。经方差分析各个玻璃钢槽中实验初始时的 NH₄-N 和 PO₄-P 的浓度差异不显著(F 值分别为 0.036 和 1.293),故初始值的影响忽略不计。

1.6 统计分析

采用 SPSS 统计软件进行方差分析(ANOVA),用 S-N-K 法多重比较, $p < 0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果

2.1 温度对龙须菜生长的影响

温度对龙须菜生长的实验结果如图 1 所示。在整个实验期间(14d),SGR 随着温度的升高逐渐增加,20 时达到最大值,为 2.79 %/d,10 和 30 均较低,分别为 1.04 %/d 和 1.14 %/d。方差分析(ANOVA)结果表明,不同温度 SGR 差异极显著($F = 16.653, p < 0.001$)。S-N-K 多重比较表明,6 个实验温度分为两个子集,10 和 30 为一个子集,两者差异不显著,其余 4 个温度为一个子集,差异不显著。从图中还可以看出,实验第 1 周和第 2 周的生长特性不同,实验第 1 周,SGR 在 17 时达到最大值,为 2.95 %/d,而第 2 周 25 时最大,为 3.96 %/d。可见,龙须菜在 15~25 都具有较高的生长率,并且其对温度具有一定的适应性,随着养殖时间的延长,其对高温的适应能力逐渐增强,但温度达到 30 时,其 SGR 一直较低,且变化不大,可能是其生长温度的上限。

2.2 光照对龙须菜生长的影响

由图 2 可见,在实验光照内养殖 7d 和 14d,其 SGR 不同。养殖 7d 的 SGR 明显高于养殖 14d,平均值分别为 3.29 和 1.67 %/d。同时观察到养殖 10d 以后,藻体的颜色发生变化,呈现透明现象,部分个体两端出现腐烂,这可能是导致其养殖后期生长率下降的主要原因,但藻体颜色变化及腐烂的原因尚需进一步实验研究。

ANOVA 分析表明,本实验光照条件下培养 7d 和 14d 龙须菜生长差异均不显著(F 值分别为 1.611 和 0.598),但有一定的趋势,即在 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时生长率最大分别为 3.64 %/d 和 1.84 %/d。

2.3 温度与光照对龙须菜光合作用的影响

图 3 示温度和光照两个因子对龙须菜光合作用速率的影响。龙须菜的光合作用速率大体上随着温度的升高和光照的增加而增加。温度 30 和光照 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时光合作用速率最大,为 $5.0 \text{ mg O}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$; 10 和 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时光合作用速率最低,为 $1.3 \text{ mg O}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$ 。相同温度下,随着光照强度的增加,其光合作用速率也增加。相同光照强度下,光合作用速率的总体趋势随着温度的升高而逐渐升高。方差分析结果表明,温度和光照对其光合作用速率影响差异均显著(F 值分别为 33.487 和 25.301, $p < 0.001$),两者不存在交互作用($F = 2.085, p = 0.063 > 0.05$)。

2.4 龙须菜对扇贝排泄氮磷的吸收作用

2.4.1 不同处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的变化

不同处理氮、磷浓度的变化见表 2,从表中可以看出对龙须菜能够显著吸收和去除扇贝排泄氮、磷。养殖 3 周,各处理水槽中氨氮的浓度发生明显变化,对照组(不加龙须菜) $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度随着养殖时间的延长持续增加;处理 1 增加与对照组的规律相似,但增加的幅度有所降低,其他各组浓度前期减少,后期增加,养殖结束时浓度在

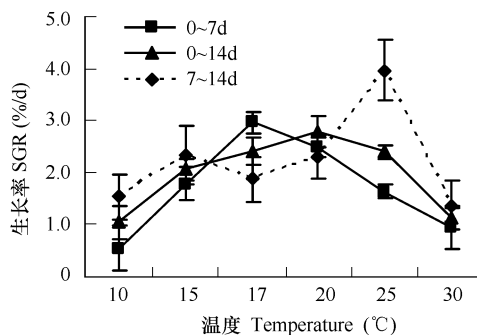


图 1 温度对龙须菜生长的影响

Fig. 1 The effect of temperature on the special growth rate of *G. lemaneiformis*

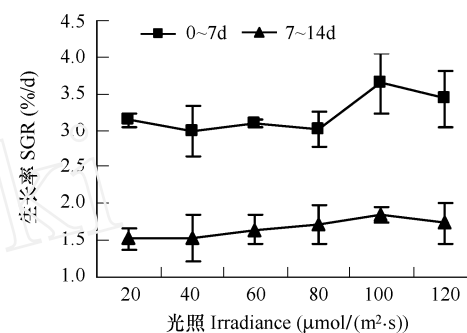


图 2 光照对龙须菜生长的影响

Fig. 2 The effect of light irradiance on the Special Growth Rate of *G. lemaneiformis*

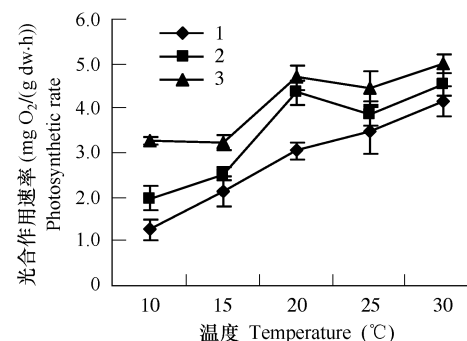


图 3 温度和光照对龙须菜光合作用的影响

Fig. 3 The effect of temperature and light on photosynthetic rate of *G. lemaneiformis*

1, 2, 3 的光照强度分别为 $40, 80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 1: $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 2: $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 3: $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

5.5 到 6.5 $\mu\text{mol/L}$ 之间,远远低于对照组。各实验组对氨氮的去除效率(Ammonia Reduction Efficiency)随着养殖时间的延长而下降,分别从第 1 周的 48.0%,76.9%,81.7%和 83.7%下降到第 3 周的 22.6%,55.1%,52%,46.6%。ANOVA 分析表明养殖 3 周后,各处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度变化差异显著 ($F = 55.542, p < 0.001$),S-N-K 多重比较分为 3 个子集,处理 2、3 和 4 为相同子集,对照组和处理 1 分别为一个子集(相同子集之间差异不显著,不同子集之间差异显著)。

表 2 不同处理氮、磷浓度的变化(Mean $\pm$ SD)

Table 2 The variance of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in different treatments						
项 目 Item	养殖时间(周) Time (week)	对照 Control	处理 1 Treatment 1	处理 2 Treatment 2	处理 3 Treatment 3	处理 4 Treatment 4
$\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度($\mu\text{mol/L}$)						
Ammonium concentration	1	2.92 $\pm$ 0.42	3.00 $\pm$ 0.08	2.94 $\pm$ 0.21	2.99 $\pm$ 0.32	2.97 $\pm$ 0.05
	2	9.26 $\pm$ 0.38	4.82 $\pm$ 0.09	2.14 $\pm$ 0.05	1.69 $\pm$ 0.06	1.51 $\pm$ 0.03
	3	11.57 $\pm$ 0.47	8.43 $\pm$ 0.15	4.28 $\pm$ 0.10	3.39 $\pm$ 0.12	3.02 $\pm$ 0.06
$\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度($\mu\text{mol/L}$)						
Phosphorus concentration	1	0.69 $\pm$ 0.06	0.62 $\pm$ 0.03	0.59 $\pm$ 0.04	0.62 $\pm$ 0.07	0.64 $\pm$ 0.02
	2	0.84 $\pm$ 0.05	0.62 $\pm$ 0.03	0.48 $\pm$ 0.05	0.47 $\pm$ 0.03	0.43 $\pm$ 0.01
	3	1.89 $\pm$ 0.12	1.25 $\pm$ 0.06	0.91 $\pm$ 0.09	0.93 $\pm$ 0.05	0.77 $\pm$ 0.02
		5.87 $\pm$ 1.01	3.54 $\pm$ 0.63	2.03 $\pm$ 0.24	1.75 $\pm$ 0.22	2.79 $\pm$ 0.39

$\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的变化趋势与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相似。实验结束时,对照组 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度最高,然后依次是处理 1,4,2 和 3。但对磷的去除效率与氨氮稍有不同,随着养殖时间的延长,各实验组对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的去除效率分别从第 1 周的 25.9%,42.8%,43.7%和 49.2%增加到第 3 周的 40.0%,65.5%,70.4%和 58.4%,其原因可能是养殖初期水体中磷的含量较低引起的。ANOVA 分析表明各处理之间 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度变化差异显著 ($F = 16.275, p < 0.001$)。

2.4.2 龙须菜对扇贝排泄氮、磷的吸收率 龙须菜对扇贝排泄氨氮吸收速率如图 4 所示。龙须菜对氨氮的吸收与贝藻混养密度和养殖时间有关,随着养殖密度的增加,其对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收率逐渐降低。养殖两周时各实验组对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收率均最高,分别为 9.9,9.6,6.2 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{d})$ 和 5.4 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{d})$,养殖 3 周后吸收率有所下降。

龙须菜对扇贝排泄磷的吸收速率如图 5 所示。龙须菜对磷的吸收同样与贝藻混养密度和养殖时间有关,随着养殖密度的增加,其对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收率逐渐降低。但其随养殖时间变化的规律略有不同,随着养殖时间的增加,对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收率逐渐增加,养殖 3 周时对磷的吸收率最大。

3 讨论

3.1 龙须菜的生长和光合作用特性

龙须菜原产于我国山东省,但由于生长率低而没有大面积推广养殖,后经中国科学院海洋研究所选育,在中国南方海区养殖成功,具有生长快、琼胶含量高、能适应较高温等特点被广泛养殖,并且具有很高的经济价值和生态作用^[7]。于 2002 年从福建莆田移植龙须菜到山东省荣成市桑沟湾海区进行养殖试验,取得较好的养殖效果,平均日生长率(SGR)达 3.9%/d,一个养殖周期的增重比达 90 倍左右^[5],比在南方养殖略有降低(4.9%/d)。本文进一步在实验室条件下研究了不同温度

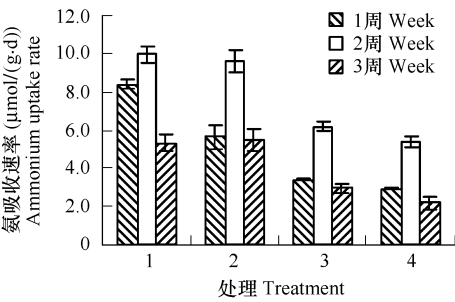


图 4 龙须菜对扇贝排泄氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)的吸收速率

Fig. 4 The uptake rates of ammonium from scallop of *G. lemaneiformis*

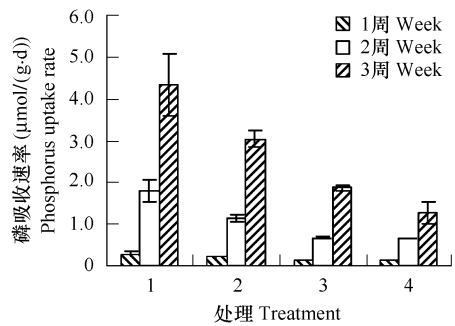


图 5 龙须菜对扇贝排泄磷($\text{PO}_4\text{-P}$)的吸收率

Fig. 5 The uptake rates of phosphorus from scallop of *G. lemaneiformis*

和光照条件下其生长和光合作用的特性。结果表明,龙须菜经过南方养殖的锤炼,其适应温度有所增加,在 15~25 都具有较高的生长率(原产地的适应温度为 11~22^[8]),且随着养殖时间的延长,其对高温的适应能力逐渐增强,养殖第 1 周其 SGR 在 17 时最高,为 2.9%/d,养殖第 2 周 SGR 在 25 时最高,为 4.0%/d,其生长率和现场的研究结果相似(116d 的养殖,平均 SGR 为 3.9%/d)。同时在不同的光照范围内,其 SGR 的差异不显著,说明光照可能不是其生长的限制因素。

温度和光照是影响海藻的光合作用速率的主要因素,本实验研究了不同温度和光照条件下龙须菜的光合作用速率,表明其光合作用速率随温度和光照的升高而增加,最大光合作用速率发生在温度 30 和光照 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,为 5.0 $\text{mgO}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$ 。比现场的研究结果低($P_{\max}$ 为 14.4 $\text{mgO}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$,平均为 7.3 $\text{mgO}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$),这可能是实验室条件和现场条件不同所致,现场研究能较准确的反映研究生物在特定水域特定环境条件下的生理、生态学特性。本研究中龙须菜的光合作用速率与刘思俭等报道的细基江蓠 *G. tenuistipitata* 和江蓠 *G. verrucosa* 的结果相似^[9],但较毛兴华等研究的江蓠 *G. verrucosa* 的光合作用产氧 2.0 $\text{mgO}_2/(\text{gdw} \cdot \text{h})$ 要高^[10]。

从其生长的适宜温度范围可以看出,该种适宜在我国北方大部分黄渤海海域高温季节养殖(夏季最高温度通常低于 26,5~8 月份平均温度为 22^[11]),尤其是在我国北方以海带为主的养殖海湾(例如桑沟湾),当海带收获以后,海区环境发生较大变化^[12],养殖相对耐高温大型藻类可能是缓解富营养化压力、调控水域生态平衡、维持贝类养殖可持续发展的有力措施之一。

3.2 龙须菜对营养盐的吸收率和去除效率

大型藻类通常具有强烈的氮吸收能力,使其即使在养殖环境中氮营养元素缺乏时,也能利用体内储存的氮库来满足机体生长需要的氮元素,利用这种氮吸收机制可以用来去除养殖废水中的氨氮,而且大型藻类对氨的吸收较少的依赖于光,更有利于其对富营养水体中氨的去除和吸收。

大型藻类可以减少水产养殖排放废水中的营养物质^[13~17]。本文研究表明,龙须菜对氨氮也具有较高的吸收率和去除效率,能去除混养系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的 46.6%~83.7%,这与石莼等大型藻类处理精养鱼塘排出废水的结果相似^[15]。其对系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收率为 5.4~9.9 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{d})$,介于掌状红藻对鲍鱼代谢 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收率之间(0.34~16.3 $\mu\text{mol}/(\text{g ww} \cdot \text{d})$)^[16]。水生生物多为排氨动物,龙须菜对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的高去除率和吸收率,为其与养殖动物的综合养殖创造了条件。

衡量大型藻类对营养盐吸收的指标主要包括营养吸收率(Nutrient uptake rate)和营养去除效率(Nutrient reduction efficiency),两者对描述大型藻类的生物修复作用和其生态功能中具有不同的意义。营养吸收率是指在单位时间单位面积(或重量)的养殖海藻使水体中营养盐的减少量。营养去除效率是指水体中营养盐浓度减少的百分数^[18]。单位面积营养盐丰富的水体,藻类通常具有较高的吸收率,相反可能具有较低的去除效率,所以大量的营养盐仍将滞留于水体中。当藻体处于低营养水平或处于营养饥饿的条件下,藻体通常具有较高的去除效率。影响大型藻类对营养盐吸收的因素较多,包括温度,光照和营养盐浓度等^[19]。本文研究表明,龙须菜对氨氮的吸收率和去除效率与混养比例和养殖时间有关。氨氮去除率随着养殖时间的延长而降低,随着混养密度的增加而增加,但到一定时间后去除率明显下降,这可能与养殖后期龙须菜的生长减慢和藻体组织氮含量增加有关。其对氨氮的吸收率也与贝藻混养比例和养殖时间有关,贝藻混养比例越小,其对氨氮的吸收率越高,其吸收率在养殖开始时随着时间的延长而增加,但养殖一段时间后又开始下降。在应用大型藻类进行生物修复和环境调控时,不同类型的富营养化水体,具有不同的处理要求,例如陆基养殖系统排除的废水要求具有较小的营养盐含量,以减轻养殖污水对环境的影响,此时通过大型藻类对营养盐的吸时来净化水质,要求具有较高的去除效率,这可以通过增加大型藻类的养殖密度来实现。对于浅海开放水域,营养盐含量并不很高,应使大型藻类的养殖密度控制在一定的范围内,以提高其对营养盐的吸收率,从而满足植物生长,从而提高营养盐利用率,达到对环境的生态调控作用。

实验证明龙须菜生长温度范围和光照范围适合中国北方海区养殖,并且能有效吸收和去除扇贝排泄氮、磷,可以作为生物滤器与贝类及其他养殖动物进行综合养殖。

References :

- [1] Troell M, Halling C, Neori A, Chopin T, *et al.* Integrated mariculture : asking the right questions. *Aquaculture*, 2003, 226 : 69 ~ 90.
- [2] Neori A, Chopin T, Troell M, Buschmann A H, *et al.* Integrated aquaculture : rationale , evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 2004, 231 : 361 ~ 391.
- [3] Fei X G. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation. *Hydrobiologia*, 2004, 512 : 145 ~ 151.
- [4] Mao Y Z, Yang H S, Wang R C. Bioremediation capability of large-sized seaweed in integrated mariculture ecosystem: A review. *J Fishery Science of China*, 2005, 12(2) : 225 ~ 231.
- [5] Yang H S, Zhou Y, Mao Y Z, *et al.* Growth character and photosynthetic capacity of *Gracilaria lemaneiformis* as a biofilter in a shellfish farming area in Sanggou Bay, China. *J Applied Phycology*, 2005, 17 (3) : 199 ~ 206.
- [6] Zhou Y, Yang H S, Hu H Y, *et al.* Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China. *Aquaculture*, 2006, 252(2-4) : 264 ~ 276.
- [7] Tang K X, You X P, Lin Y S, *et al.* A study on bioremediation of eutrophication of mariculture waters by *Gracilaria lemaneiformis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (12) : 3044 ~ 3051.
- [8] Yin Z H. Growth characteristic and the cultivation technique of *Gracilaria lemaneiformis*. *Marine Fisheries*, 2003, 25(3) : 153 ~ 154.
- [9] Liu S J, Xiang S G, Lin B S, *et al.* Study on photosynthesis of *Gracilaria* . Effect of various light intensity on photosynthesis. *Journal of Fisheries of China*, 1985, 9(1) : 29 ~ 35.
- [10] Mao X H, Zhu M Y, Yang X L. The photosynthesis and productivity of benthic macrophytes in Sanggou bay. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(1) : 25 ~ 29.
- [11] Sui Z Y. Study of the benthic marine algae on the Liaoning Huanghai and Bohai sea coasts. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005, 105 (3) : 57 ~ 65.
- [12] Liu H, Fang J G, Dong S L, *et al.* Annual variation of major nutrients and limiting factors in Laizhou Bay and Sanggou Bay. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(3) : 227 ~ 234.
- [13] Langdon C, Evans F, Demetropoulos C. An environmentally-sustainable, integrated, co-culture system for dulse and abalone production. *Aquacultural Engineering*, 2004, 32(1) : 43 ~ 56.
- [14] Schuenhoff A, Shipigel M, Lupatsch I, *et al.* A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. *Aquaculture*, 2003, 221(1-4) : 167 ~ 181.
- [15] Cohen I, Neori A. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents . Ammonia uptake kinetics and nitrogen content. *Bot. Mar.*, 1991, 34 : 475 ~ 482.
- [16] Buschmann A H, Mora O A, G3n3lez P, *et al.* *Gracilaria chilensis* outdoor tank cultivation in Chile : use of land-based salmon culture effluents. *Aquac. Eng.*, 1994, 13 : 283 ~ 300.
- [17] Yang H S. Cleaner production : A new model for mariculture sustainable development. *World Sci-tech R&D*, 2000, 23(1) : 62 ~ 65.
- [18] Buschmann A H, Troell M, Kautsky N. Integrated algal farming : a review. *Cah. Biol. Mar.*, 2001, 42 : 83 ~ 90.
- [19] Evans F, Langdon C J. Co-culture of dulse *Palmaria mollis* and red abalone *Haliotis rufescens* under limited flow conditions. *Aquaculture*, 2001, 185 : 137 ~ 158.

参考文献 :

- [4] 毛玉泽, 杨红生, 王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用. *中国水产科学*, 2005, 12(2) : 225 ~ 231.
- [7] 汤坤贤, 游秀萍, 林亚森, 等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复. *生态学报*, 2005, 25(11) : 3044 ~ 3051.
- [8] 严志洪. 龙须菜生物学特性及筏式栽培技术规程. *海洋渔业*, 2003, 25(3) : 153 ~ 154.
- [9] 刘思俭, 向曙光, 林本松, 等. 江蓠的光合作用研究: 不同光照强度对光合作用的影响. *水产学报*, 1985, 9(1) : 29 ~ 35.
- [10] 毛兴华, 朱明远, 杨小龙. 桑沟湾大型底栖植物的光合作用和生产力的初步研究. *生态学报*, 1993, 13(1) : 25 ~ 29.
- [11] 隋战鹰, 黄, 渤海辽宁海区底栖海藻的研究. *海洋与湖沼通报*, 2005, 105 (3) : 57 ~ 65.
- [12] 刘慧, 方建光, 董双林, 等. 莱州湾和桑沟湾养殖海区主要营养盐的周年变动及限制因子. *中国水产科学*, 2003, 10(3) : 227 ~ 234.
- [17] 杨红生. 清洁生产: 海水养殖业持续发展的新模式. *世界科技研究与发展*, 2000, 23(1) : 62 ~ 65.