

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18269

短时间高盐处理对脆江蓠光合生理生化指标的影响

徐涵^{1,2}, 李加琦^{2,3}, 薛素燕^{2,3}, 陈琼琳^{1,2}, 李阳^{1,2}, 蒋增杰², 毛玉泽^{2,3}, 方建光²

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237

摘要: 脆江蓠(*Gracilaria chouae*)藻体脆性大, 短时间高盐海水浸泡可使其软化, 有利于规模育苗生产。采用实验生态学方法研究短期高盐胁迫对脆江蓠光合生理及生化组成的影响, 以探讨高盐对其光合系统的损伤及其恢复效果。实验设置 5 个盐度梯度(40、45、50、55、60), 自然海水作为对照(盐度 33), 分析盐度处理 1 h 内脆江蓠的失水率及藻体软化程度; 同时研究了高盐处理 0.5 h 及不同恢复时间(12 h、24 h)对脆江蓠 pH 补偿点、光合作用荧光特性、光合作用产氧量(RO)和光合色素组成等光合生理生化指标的影响。结果表明, 脆江蓠在盐度 50~55 的海水中浸泡 0.5 h 效果较好, 此时藻体软化, 并且经过 24 h 恢复后, 藻体光合作用参数可恢复到对照组水平, 该处理条件可以用于脆江蓠生产。高盐(盐度 40~60)处理脆江蓠 0.5 h, 随盐度增加, 脆江蓠 RO 值呈波动下降($P<0.01$)、pH 补偿点和光合效率 $Y(II)$ 值逐渐降低($P<0.05$)。PE 含量随盐度增加而增加($P<0.01$); 恢复 24 h 后最大光合效率 F_v/F_m 和 $Y(II)$ 值基本恢复正常水平($P>0.05$), Chl a、Car、PE 和 PC 含量均恢复到与对照组无显著性差异水平($P>0.05$)。本研究旨在为提高脆江蓠规模化养殖育苗效率提供理论依据。

关键词: 脆江蓠; 高盐胁迫; 光合特性; 叶绿素荧光参数; 藻类育苗

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)04-0722-07

脆江蓠(*Gracilaria chouae*)是中国特有的大型红藻, 脆江蓠具有较高的生态、经济和药用价值^[1-4], 自然分布于中国东南沿海的低潮带或潮下带, 在福建沿海已经开展了规模化人工养殖。

海水渗透压在海岸线上变化较大, 自然海区海水高蒸发或降水时, 海水盐度变化范围可达 10~70^[5], 维持细胞内渗透压的稳定是藻类细胞行使正常生理功能的基础。盐胁迫破坏藻体类囊体膜结构和功能的完整性, 降低电子传递效率, 改变光合碳代谢途径, 从而影响光合作用。盐度胁迫下植物体内活性氧大量积累导致脂质过氧化, 质

膜选择透性增大, 破坏离子稳态造成代谢紊乱, 甚至改变染色体和染色质结构, 最终导致藻体生长受抑制, 甚至死亡^[6-7]。藻类进化出了一套独特的应对盐度胁迫的方法, 通过无机离子和有机亲物质的参与, 降低细胞液的渗透势。通过增强体内抗氧化酶活性, 清除体内过多的氧自由基。在分子水平上, 激活某些耐盐基因的表达, 以应对环境胁迫^[8-10]。

脆江蓠含水率高, 在实际育苗生产中极易折断, 且育苗不牢固, 放入海区后受到海流作用容易脱落, 不利于规模化生产。高盐海水浸泡后, 脆

收稿日期: 2018-08-07; 修订日期: 2018-10-17.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省联合基金项目(U1606404); 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室创新团队项目(LMEES-CTSP-2018-4); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2017HY-ZD0608); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费项目(20603022017002, 20603022017010).

作者简介: 徐涵(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事海藻生物学研究. E-mail: m160111259@st.shou.edu.cn

通信作者: 毛玉泽, 研究员, 主要从事海藻生物学研究. E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn

江蓠藻体变软, 夹苗时不易折断, 夹苗更牢固不易脱落, 操作简单快捷。但最佳浸泡浓度、浸泡时间、高盐对藻体的损伤程度以及是否能在短期内得到恢复尚不清楚。本实验探讨了短期高盐胁迫对脆江蓠失水率、pH 补偿点、光合作用荧光特性、光合作用产氧量(RO)和光合色素组成等光合生理生化指标, 以及对光合作用、抗氧化作用相关酶活性(另文发表)的影响, 研究了高盐处理后脆江蓠藻体的短期恢复情况。研究结果为脆江蓠规模化夹苗技术提供理论依据, 也丰富了大型藻类耐盐机制的研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

脆江蓠采自山东荣成寻山爱莲湾养殖区, 低温运输, 去除表面附着物并洗净。GXZ 智能光照培养箱(宁波江南仪器厂)预培养 7 d, 培养密度为 1.0 g/L。培养液为过滤灭菌海水(盐度 33, pH 8.0, 无机氮浓度 56.9 $\mu\text{mol/L}$, 无机磷浓度 2.2 $\mu\text{mol/L}$), 温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 光照强度为 $(70 \pm 10) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光照周期为 12 L : 12 D。培养期间藻体每天更换一次培养液。

1.2 实验方法

将 NaCl 溶解于灭菌海水中, 分别调节水体盐度至 40、45、50、55 和 60。选取健康、生长一致的藻体, 无菌海水冲洗 3 次并吸干表面水分进行实验, 正常海水(35)作为对照。

最佳浸泡时间: 取 1 g 藻体分别置于上述不同盐度海水中, 每 5 min, 选取 2~3 cm 相同部位的藻枝, 弯折 90°, 记录藻体是否折断和实验前后藻体鲜重, 并计算失水率。失水率 $= (W_T - W_0) / W_T \times 100\%$ 。其中, W_T 是实验前藻体的鲜重(g), W_0 是实验结束时藻体的鲜重(g)。每组处理设置 4 个重复。

光合放氧速率: 不同盐度海水处理脆江蓠 0.5 h, 吸干表面水分, 取 1 g, 放入 1 L 灭菌海水中, 光照培养箱密封培养 2 h。使用 YSI (Multi 3420, WTW, Germany)测定实验前后水体溶解氧浓度(DO)。每个实验组设置 4 个重复, 计算脆江蓠光合产氧速率(RO)^[11]。

pH 补偿点: 不同盐度海水处理脆江蓠 0.5 h,

取 0.5 g 放入 25 mL 灭菌自然海水中, 光照培养箱连续密闭培养。每组处理 4 个重复, 每 2 h 测定一次水体 pH, 直至水体 pH 不再变化, 此时的 pH 即为藻体在该条件下的 pH 补偿点。

叶绿素荧光参数: 实验藻体暗适应处理后使用叶绿素荧光仪(DIVING-PAM, WALA, Germany)测定各叶绿素荧光参数, 并计算脆江蓠 PS II 的最大光合效率 F_v/F_m 和实际光化学效率 $Y(II)$ ^[12-13]。每组处理设置 3 个重复。

光合色素含量: 取实验后藻体 0.2 g, 加入适量石英砂、碳酸钙粉末和 80%丙酮或磷酸缓冲液(pH 7.2~7.4)冰浴研磨, 静置, 离心, 测定 663 nm、646 nm、510 nm、480 nm、645 nm、618 nm、592 nm、564 nm 和 455 nm 处吸光度, 并计算藻体叶绿素(Chl a)、类胡萝卜素(Car)、藻红蛋白(PE)和藻蓝蛋白(PC)的含量^[14-15]。

1.3 数据处理和统计学分析

实验数据使用软件 Excel 2013 进行数据处理; 采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 使用 Duncan 法进行多重比较, $P < 0.05$ 作为显著标准。

2 结果与分析

2.1 最佳浸泡时间的选择

盐度显著影响脆江蓠失水率($P < 0.01$)。不同盐度海水浸泡 0.5 h 后, 随盐度增加脆江蓠失水率明显升高(图 1)。盐处理脆江蓠 0.5 h 后, 藻体脆软情况见表 1。结果表明, 盐度 50、55、60 海水浸泡 0.5 h 后藻枝均不可折断, 而盐度 40、45 海水浸泡 1 h 后藻枝仍可折断。

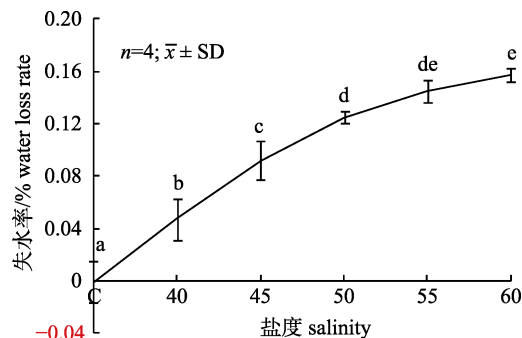


图1 盐度对脆江蓠失水率的影响

Fig. 1 Effects of salinities on *Gracilaria chouae* water loss rate

表 1 不同浸泡时间下脆江蓠藻枝的脆软程度
Tab. 1 Brittleness of the branches under different soaking times on *Gracilaria chouae*

浸泡时间/min soaking time	脆软程度 brittleness				
	40	45	50	55	60
5	√	√	√	√	√
10	√	√	√	√	√
15	√	√	√	√	√
20	√	√	√	√	√
25	√	√	√	√	×
30	√	√	×	×	×
60	√	√	×	×	×

注: √表示可折断, ×表示不可折断。
Note: √ means branches can be broken; × means branches cannot be broken.

2.2 盐度对脆江蓠光合生理参数的影响

盐处理 0.5 h 脆江蓠光合产氧速率 RO 变化如图 2。盐度显著影响脆江蓠光合产氧速率($P<0.01$), 随盐度升高 RO 呈锯齿状变化, 除盐度 55 组外其余各处理组与对照组间 RO 差异极显著($P<0.01$); 脆江蓠 pH 补偿点随盐度增加先升高后减小($P<0.05$), 盐度 55 时达最小值(图 3)。

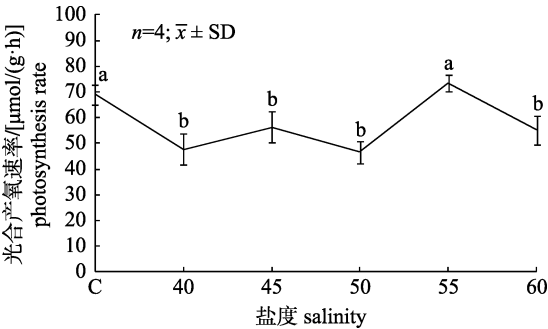


图 2 盐度对脆江蓠光合产氧速率的影响
Fig. 2 Effects of different salinities on the oxygenic photosynthesis (RO) of *Gracilaria chouae*

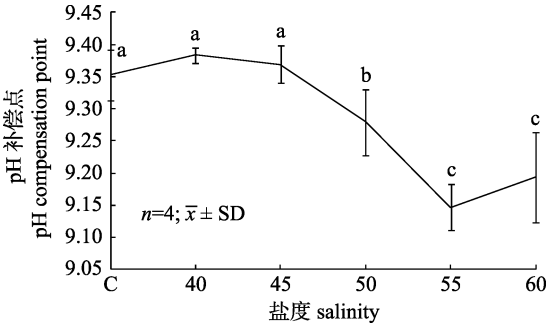


图 3 盐度对脆江蓠 pH 补偿点的影响
Fig. 3 pH compensation point of *Gracilaria chouae* under different salinities

盐处理 0.5 h 及恢复 12 h、24 h 脆江蓠的实际光合效率 $Y(II)$ 和最大光合效率 F_v/F_m 如图 4 所示。盐水浸泡 0.5 h 后 $Y(II)$ 随盐度增加逐渐降低($P<0.05$)。随恢复时间的增加, $Y(II)$ 、 F_v/F_m 逐渐回升, 恢复 12 h, 各盐处理组间 $Y(II)$ 无显著性差异($P>0.05$)。恢复 24 h, 各盐度处理组间 F_v/F_m 值升高至与对照组无显著性差异水平($P>0.05$)。

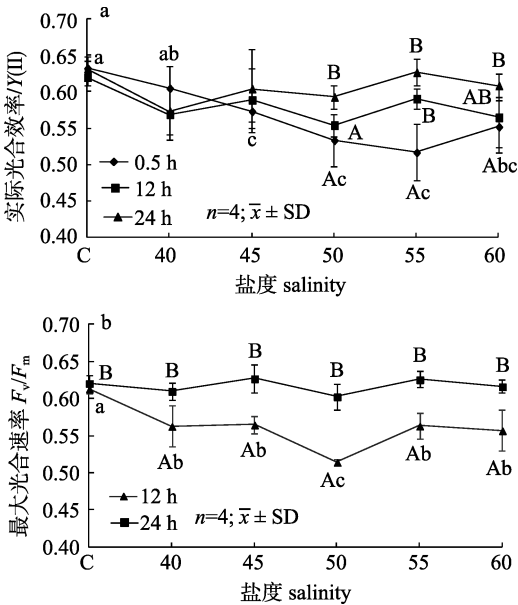


图 4 盐度对脆江蓠 $Y(II)$ 和 F_v/F_m 的影响
小写字母表示同一处理时间下不同盐度处理组间差异显著 ($P<0.05$); 大写字母表示同一盐度处理组在不同处理时间时有显著性差异 ($P<0.05$)。

Fig. 4 $Y(II)$ and F_v/F_m of *Gracilaria chouae* at different salinities
Different lowercases indicate significant difference ($P<0.05$) among different groups at the same time; different uppercases lowercases indicate significant difference ($P<0.05$) at different time points in the same group.

2.3 盐度对脆江蓠光合色素含量的影响

单因素方差分析结果表明(图 5~图 7), 盐处理脆江蓠 0.5 h 及恢复 12 h、24 h 后各盐度处理组间 Chl a 和 Car 含量均无显著性差异($P>0.05$)。盐处理 0.5 h, 随盐度增加 Chl a 含量波动增加, Car 含逐渐降低。

盐处理 0.5 h 及恢复 12 h、24 h 脆江蓠体内藻红蛋白和藻蓝蛋白含量变化如图 8~图 10。盐处理 0.5 h、恢复 12 h 不同盐处理组间脆江蓠 PE 含量差异显著($P<0.05$), 随盐度升高而增加, 盐度 55 时达最大值; 恢复 24 h, 各处理组间 PE、PC 含量无显著性差异($P>0.05$)。

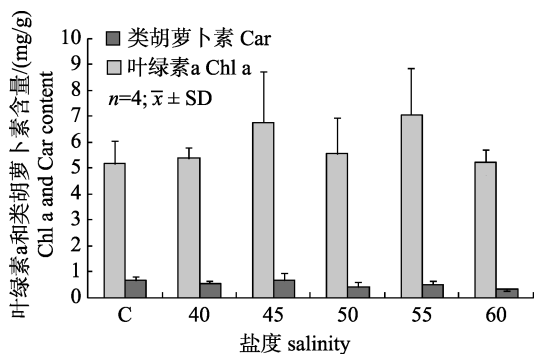


图5 盐度处理 0.5 h 后脆江蓠 Chl a、Car 的含量变化

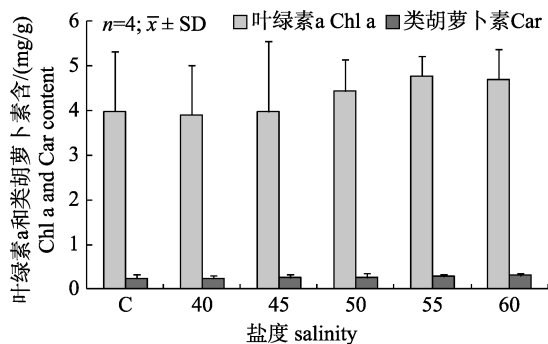
Fig. 5 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* after 0.5 h

图6 恢复 12 h 后脆江蓠 Chl a、Car 的变化

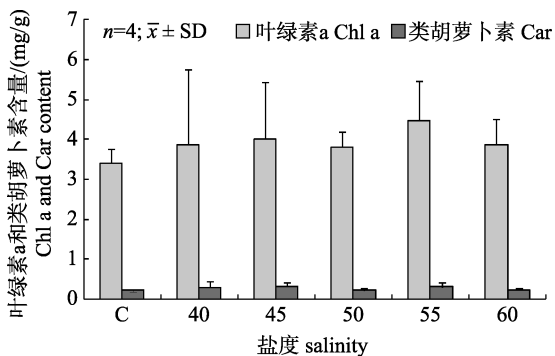
Fig. 6 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* after 12 h recovery

图7 恢复 24 h 后脆江蓠 Chl a、Car 的变化

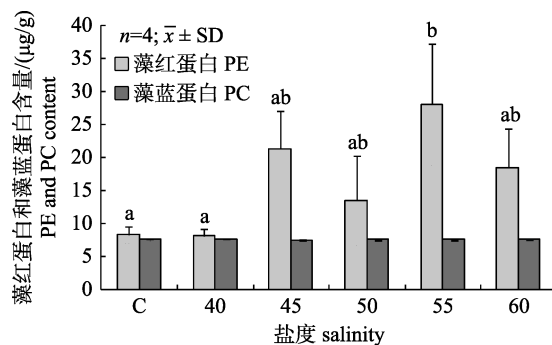
Fig. 7 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* after 24 h recovery

图8 盐度处理 0.5 h 脆江蓠 PE、PC 的变化

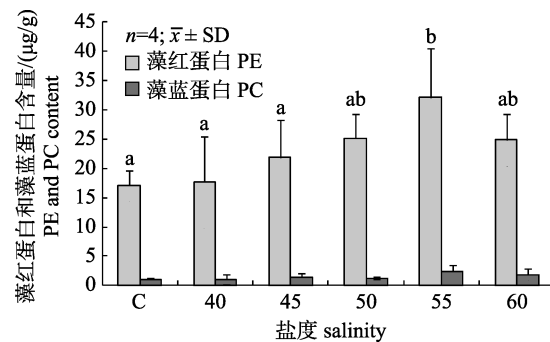
Fig. 8 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* under 0.5 h treatment

图9 恢复 12 h 后脆江蓠 PE、PC 的变化

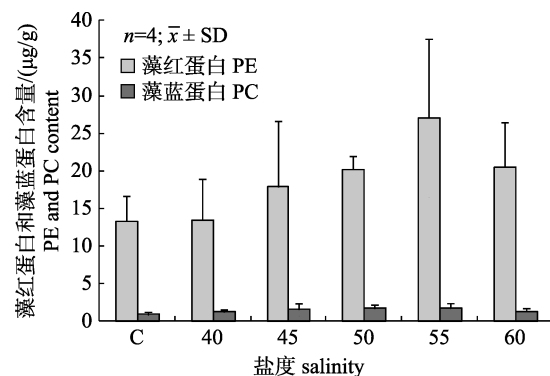
Fig. 9 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* after 12 h recovery

图10 恢复 24 h 后脆江蓠 PE、PC 的变化

Fig. 10 Effects of different salinities on photosynthetic pigment contents of *Gracilaria chouae* after 24 h recovery

3 讨论

3.1 最佳浸泡时间和盐度的选择

根据实验结果, 采用盐度 50~55 时处理脆江蓠 0.5 h, 脆江蓠能在短时间内恢复生理特性。盐度胁迫引起藻类细胞内水含量的改变, 进而会破坏细胞结构和膜完整性, 直接影响细胞的代谢反

应和光合生理特性, 严重阻碍植物的生长发育^[16]。本实验条件下高盐处理 0.5 h, 藻体光合生理等发生了改变, 但未出现死亡且经过 24 h 的恢复, 各项光合生理指标恢复到正常水平, 说明脆江蓠对短期的高盐处理具有一定的调节能力。研究认为, 藻类可以通过合成或者运输有机渗透压调节物质来维持细胞内的水分和离子平衡, 以应对外界盐度变化^[17]。

3.2 盐度对脆江蓠光合作用的影响

盐度胁迫能明显抑制脆江蓠的光合产氧速率, pH 补偿点总体随盐度升高而降低。本实验条件下, 各盐度下 pH 补偿点均大于 9, 说明脆江蓠既可以直接利用水体中 CO_2 , 又可以利用水体中的 HCO_3^- 。盐度 40 时脆江蓠 pH 补偿点升高, 说明轻微的盐度刺激有利于 HCO_3^- 的吸收, 盐度继续升高 HCO_3^- 的利用效率明显降低^[18]。这可能是因为盐胁迫下 RUBP 羧化酶羧化效率下降, 从而降低了 RUBP 及 Pi 的再生等, 影响了碳还原循环。有报道表明, 盐胁迫会降低植物对 CO_2 的利用, 进而降低光合碳同化效率^[19]。

F_v/F_m 的变化极小, 藻类约为 0.65^[20], 当受到胁迫时, 其值显著下降^[21], 是反应海藻生活环境是否良好的一个稳定参数。随盐度增加脆江蓠 F_v/F_m 、Y(II) 值整体呈下降趋势, 说明盐度胁迫对脆江蓠光合电子传递产生了影响, 可能是因为盐度胁迫破坏了叶绿体机构, 使 PS II 反应中心受损, 抑制光合作用的原初反应^[22]。随恢复时间的增加, 脆江蓠 F_v/F_m 、Y(II) 逐渐回升, 24 h 后 F_v/F_m 和 Y(II) 值基本恢复正常水平, 说明脆江蓠的光合生理特性基本恢复正常。梁洲瑞等^[23]研究也表明, 用盐度胁迫鼠尾藻嫩 9 h, 对光系统 II 有明显影响, 24 h 恢复后, 除了较高盐度组(60)以外, 其他盐度组的叶绿素荧光参数均可基本恢复正常。

盐处理 0.5 h, 藻体 Chl a、PE 含量随盐度升高而增加, 色素蛋白含量增加可提高藻体光合作用并清除氧自由基^[24], 这是藻体对短期高盐胁迫的应激反应。钟志海等^[25]对异枝江蓠(*G. bailinae*)影的研究也表明, 较高盐度胁迫有利于异枝江蓠光合色素的积累; Car 随盐度增加逐渐被氧化, 发挥抗光敏化、淬灭自由基作用^[26], 从而降低叶绿素分子的氧化程度。胁迫停止, Chl a、Car、PE 和 PC 含量下降, 这可能是高盐胁迫引起光合作用基本系统的损伤, 从而使藻体光合色素含量下降。另外, 由于高盐下光合作用受到抑制, 藻体必须通过加强呼吸作用来维持正常生理功能, 需要消耗大量积累的有机物, 也刺激藻体蛋白合成。胁迫停止, 经过 24 h 恢复, 光合色素含量趋于稳定并恢复到与对照无显著性差异水平。

值得注意的是, 高盐胁迫下脆江蓠各光合作用参数在盐度 55 时明显高于或低于其他各处理组, 其原因需要进一步研究。Kumar 等^[9]也发现, 江蓠(*G. corticata*)在盐度 45 时能够维持细胞内 Na^+/K^+ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 在一个最适的水平, 并将 Na^+ 排出液泡, 同时增加多酚、脯氨酸和光合色素尤其是藻红蛋白含量, 作为抵御盐度胁迫的策略。可以看出, 生物对环境胁迫有一定适应范围, 在这一范围内机体可以通过各个系统协调合作共同抵御外界不良环境。综合以上光合作用参数以及高盐对脆江蓠抗氧化酶活性影响的研究(另文发表)表明, 短期高盐胁迫对脆江蓠机体的损伤基本可在 24 h 左右得到恢复, 可以采用这种方法处理脆江蓠用于育苗生产。

参考文献:

- [1] Li H, Li M Z, Xu Z G, et al. Effect of nutrient supply on nitrogen and phosphorus uptake and growth in three species of macroalgae[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(3): 462-470. [李恒, 李美真, 徐智广, 等. 不同营养盐浓度对 3 种大型红藻氮、磷吸收及其生长的影响[J]. 中国水产科学, 2012, 19(3): 462-470.]
- [2] Xu Y, Dong S L, Jin Q. Study on inhibitory effects of nine macroalgae on the growth of *Heterosigma akashiwo*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(3): 475-477. [许妍, 董双林, 金秋. 几种大型海藻对赤潮异弯藻生长抑制效应的初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 475-477.]
- [3] Shi S Y, Zhang Y X, Liu W Q, et al. The seasonal variation in yield, physical properties and chemical composition of agar from *Gracilaria verrucosa*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(3): 272-278. [史升耀, 张燕霞, 刘万庆, 等. 江蓠琼胶产率、物理性质和化学组成的季节变化[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(3): 272-278.]
- [4] Ju Y Y, Ye T W, Xie F, et al. Antitumor activity *in vivo* and mechanism of action of *Gracilaria chouae* polysaccharides[J]. Journal of Food Science, 2016, 37(5): 208-213. [鞠瑶瑶, 叶天文, 谢飞, 等. 脆江蓠多糖体内抗肿瘤活性及其作用机制[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 208-213.]
- [5] Graham L E, Wilcox L W. Algae[M]. New York: Prentice Hall, 2000.
- [6] Wu H Y. Study on the responses of the growth and photosynthetic functions of marine macroalgae to diverse light environments[D]. Guangzhou: South China University of

- Technology, 2016. [武焕阳. 大型海藻生长和光合功能对不同光环境条件的响应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.]
- [7] Guy R D, Reid D M, Krouse H R. Factors affecting $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of inland halophytes. I. Controlled studies on growth and isotopic composition of *Puccinellia nuttalliana*[J]. Canadian Journal of Botany, 1986, 64(11): 2693-2699.
- [8] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(5): 441-445.
- [9] Kumar M, Kumari P, Gupta V, et al. Biochemical responses of red alga *Gracilaria corticata* (Gracilariales, Rhodophyta) to salinity induced oxidative stress[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, 391(1): 27-34.
- [10] Zhao X Q. Advances in studies on the molecular mechanism of plant's salt tolerance[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(17): 7844-7849. [赵祥强. 植物耐盐性分子机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 7844-7849.]
- [11] Sui H D. Studies on the impact of carbon dioxide and other environmental factors on photosynthetic characteristics and growth of *Gracilaria chouae*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [隋海东. CO_2 和其他环境因子对脆江蓠光合固碳和生长影响的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [12] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 1989, 990(1): 87-92.
- [13] Kitajima M, Butler W L. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, 1975, 376(1): 105-115.
- [14] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 144(3): 307-313.
- [15] Beer S, Eshel A. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae[J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1985, 36(6): 785-792.
- [16] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 239-250.
- [17] Liu G H. Research progress in mechanism of plant resistance to salt stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(23): 6111-6112. [刘国花. 植物抗盐机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(23): 6111-6112.]
- [18] Huang J. Inorganic carbon utilization and environmental regulation of carbonic anhydrase in *Nitzschia closterium minutissima*[D]. Shantou: Shantou University, 2008. [黄瑾. 小新月菱形藻的无机碳利用机制及其碳酸酐酶的环境调控[D]. 汕头: 汕头大学, 2008.]
- [19] Ma J H, Zheng H L, Zhao Z Q, et al. Progress in mechanisms of plant resistance to salt stress[J]. Life Science Research, 2001, 5(s1): 175-179, 226. [马建华, 郑海雷, 赵中秋, 等. 植物抗盐机理研究进展[J]. 生命科学研究, 2001, 5(s1): 175-179, 226.]
- [20] Kolber Z, Zehr J, Falkowski P. Effects of growth irradiance and nitrogen limitation on photosynthetic energy conversion in photosystem II[J]. Plant Physiology, 1988, 88(3): 923-929.
- [21] Xu D Q, Zhang Y Z, Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants[J]. Plant Physiology Communications, 1992, 28(4): 237-243. [许大全, 张玉忠, 张荣铨. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 237-243.]
- [22] Masojidek J, Torzillo G, Kopecký J, et al. Changes in chlorophyll fluorescence quenching and pigment composition in the green alga *Chlorococcum* sp. grown under nitrogen deficiency and salinity stress[J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12(3-5): 417-426.
- [23] Liang Z R, Wang F J, Sun X T, et al. Effects of light intensity, temperature and salinity on newborn branches of *Sargassum thunbergii* evaluated with chlorophyll fluorescence assay[J]. Marine Sciences, 2011, 35(12): 21-27. [梁洲瑞, 王飞久, 孙修涛, 等. 利用叶绿素荧光技术揭示光照、温度和盐度对鼠尾藻嫩芽的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(12): 21-27.]
- [24] Zhou Z P, Chen X L, Chen C, et al. Effect of apoprotein on antioxidant activity of phycobiliproteins[J]. Marine Sciences, 2003, 27(5): 77-81. [周站平, 陈秀兰, 陈超, 等. 藻胆蛋白脱辅基蛋白对其抗氧化活性的影响[J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 77-81.]
- [25] Zhong Z H, Huang Z J, Chen W Z. Effects of various environmental factors on growth and biochemical components of *Gracilaria bailinae*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(3): 98-104. [钟志海, 黄中坚, 陈伟洲. 不同环境因子对异枝江蓠的生长及生化组分的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(3): 98-104.]
- [26] Zhou L, Liang X Y, Li J R. Research progress on antioxidant properties of carotenoids[J]. Food Research and Development, 2003, 24(2): 21-23. [周丽, 梁新乐, 励建荣. 类胡萝卜素抗氧化作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2003, 24(2): 21-23.]

Effects of a short period of high-salinity stress on photosynthetic characteristics of *Gracilaria chouae*

XU Han^{1,2}, LI Jiaqi^{2,3}, XUE Suyan^{2,3}, CHEN Qionglin^{1,2}, LI Yang^{1,2}, JIANG Zengjie², MAO Yuze^{2,3}, FANG Jianguang²

1. College of Fishers and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-environment; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: To verify the feasibility of the high-salinity seawater pretreatment method and to ascertain the optimum conditions for production, the effect of high-salinity stress on the photosynthesis of *Gracilaria chouae* was studied using methods from experimental ecology. In this study, branches of *G. chouae* were incubated at five high salinity levels (40, 45, 50, 55, and 60 psu) for 30 min, with natural seawater (33 psu) as a control. Afterwards, these incubated branches of algae were transferred to natural seawater to recover for 12 h and 24 h, respectively. pH compensation point, chlorophyll fluorescence parameters, oxygenic photosynthesis, and the contents of photosynthetic pigments were measured at different salinity levels and recovery times. After algae were incubated at 40 psu for 30 min, the pH compensation point increased slightly, while RO and F_v/F_m decreased significantly. When salinity was higher than 40 psu, the pH compensation point and $Y(II)$ decreased, while RO decreased with increasing salinity level above 40 psu. The Chl a/Car value was significantly different among the different salinity treatment levels ($P<0.01$), while no significant difference was found between different incubation times within the same level of salinity. Significant changes in PE content ($P<0.01$) were observed, especially at 45 and 55 psu. After 12 h recovery, the overall F_v/F_m value of stressed algae was still significantly lower than of control algae ($P<0.05$), however, the value of $Y(II)$ began to increase. After 24 h recovery, the photosynthetic indices of stressed algae including F_v/F_m , $Y(II)$, Chl a, Car, PE, PC, and Chl a/Car were close to fully recovered. This study indicated that the algae can adjust its photosynthetic characteristics under high-salinity stress, and as a result its photosynthetic parameters are able to return to a normal level after 24 h recovery. In conclusion, the pretreatment method is feasible, and exposure to salinity of 50–55 psu for 30 minutes is a suitable treatment condition.

Key words: *Gracilaria chouae*; high-salinity stress; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters; seedling

Corresponding author: MAO Yuze. E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn