

DOI: 10.12264/JFSC2021-0236

光强对多肋藻小孢子体生长及抗氧化生理的影响

李国梁¹, 汪文俊¹, 李宝贤¹, 梁洲瑞¹, 鲁晓萍¹, 李晓捷²

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 山东东方海洋科技股份有限公司, 山东省海藻遗传育种与栽培技术重点实验室, 山东 烟台 264003

摘要: 在实验室条件下, 研究了多肋藻(*Costaria costata*)孢子体在不同光强下的生长、光合作用、营养成分以及抗氧化能力, 以期揭示多肋藻小孢子体对光强的适应性, 为多肋藻海区栽培提供参考。结果发现, 藻体在光照强度 30~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 均具有较快的生长速率, 其中 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下相对生长速率(RGR)和藻体 PSII 最大光化学量子产量(F_v/F_m)均最高。总光合速率(P_t)和最大表观光合速率($P_{n\text{max}}$)在培养前期(5 d)随光强增加而上升, 随着培养时间的延长(10 d)在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下最高; 在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下, 藻体呼吸速率(R_d)较低。叶绿素 a (Chl a)、岩藻黄素(Fucos)和类胡萝卜素(Car)的含量为低光组稍高于高光组($P>0.05$)。粗蛋白、脂肪和粗纤维的含量与光强具有一定的正相关性, 而碳水化合物含量则与光强呈负相关。结果表明, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 适宜多肋藻小孢子体的生长。在较低或较高光强下, 藻体呼吸作用均显著增强; 此外, 高光下, 可溶性蛋白含量显著上升, 低光下, 抗超氧阴离子自由基(ASAFR)、超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)比活力较高, 过氧化氢酶(CAT)比活力则在低光和高光下均下降, 这些生理响应对多肋藻小孢子体适应不同光强具有重要的调节作用。

关键词: 多肋藻; 光强; 相对生长速率; 光合作用; 抗氧化系统; 营养成分

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)12-1778-10

经济海藻的养殖已成为我国农业发展的重要组成部分, 开发具有潜力的新栽培物种是我国海藻栽培产业健康多样化发展的保障。多肋藻(*Costaria costata*)属于一年生的大型褐藻, 自然分布于美国阿拉加斯加到加利福尼亚沿岸、俄罗斯远东的鄂霍次克海和大彼得湾、朝鲜半岛东北部、日本北部沿岸海域^[1]。多肋藻的生活史、苗种繁育和栽培技术与裙带菜属(*Undaria*)和海带属(*Saccharina*)相似, 在韩国已成为继紫菜和海带之后的第三大养殖海藻^[2]。多肋藻是一种具有很大开发利用价值的经济褐藻, 其味道鲜美、风味独特, 含有丰富的蛋白质和矿物质等, 在日本具有悠久的食用历史^[3]。同时, 多肋藻富含褐藻多糖和岩藻黄素等多种活性物质, 在工业、医疗、饲料

等领域具有较大的开发利用潜力^[4-6]。多肋藻可分布于 0.5~20 m 水深处, 具有耐低光、广盐性、生长周期短等特性, 是建设海藻场的重要候选物种, 近年来成为我国发展多元化海藻栽培的新兴物种。为了建立多肋藻栽培产业, 首先得解决苗种问题。国内研究人员针对多肋藻配子体时期的生长发育调控开展了研究, 并初步建立了其人工繁育技术^[7]。但国内外针对多肋藻孢子体阶段的生态适应性研究仍然较少。

光是植物赖以生存的能量来源, 是调控植物生长、光合作用和物质代谢等生命活动的最关键因素之一。研究表明, 适宜的光强能够促进高等植物细胞的分裂、组织器官的分化、花芽的增加和果实的成熟^[8]; 光强对大型海藻的生长及化学

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-08-17.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目(2018YFD0901504); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-50); 中国水产科学研究院基本科研业务费“创新团队”项目(2020TD27).

作者简介: 李国梁(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为藻类资源与利用. E-mail: 898587535@qq.com

通信作者: 汪文俊, 研究员, 研究方向为藻类资源与利用. E-mail: wjwang@ysfri.ac.cn

组成具有显著影响^[9]; 同时, 光强也能改变潮间带海藻的形态, 并且影响大型海藻在潮间带的分布^[10]。植物对光的适应可分为 3 个阶段: 光限制、光适宜和光饱和。在一定光强范围内, 植物的光合作用随光强的增加而增强, 机体的各项生理指标处于正常状态; 当光强长时间处于光补偿点之下, 植物光合作用受到限制, 有机物消耗多于积累, 植株生长缓慢; 当光照强度超过光饱和点时, 光系统遭到破坏, 产生光抑制导致植株的生理障碍^[11]。

本研究就光强对多肋藻小孢子体的生长、光合作用、生化组成的影响及其抗氧化生理响应进行了初步研究, 探讨了其对光强的生理适应机制, 旨在为多肋藻的栽培及海藻场建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

多肋藻孢子体幼苗(5~20 cm)采自山东荣成栽培试验区(由东方海洋科技股份有限公司提供)。暂养条件: 温度 10 °C, 光照强度 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 光周期 12L : 12D, 营养盐(NO_3^- -N: 1 mg/L, PO_4^{3-} -P: 0.1 mg/L), 盐度 31。

1.2 实验方法

1.2.1 光强对多肋藻小孢子体生长的影响 每处理组挑选鲜重约 3 g 的健康完整藻体置于 2 L 锥形瓶中, 在光照培养箱中充气培养, 每实验组设置 3 个平行, 每隔 3 d 更换 1 次培养液。光强梯度为: 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 其他培养条件: 温度 10 °C, 光周期 12L : 12D, 营养盐(NO_3^- -N: 1 mg/L, PO_4^{3-} -P: 0.1 mg/L), 盐度 31。第 5 天、第 10 天分别称量藻体鲜重。第 10 天, 擦干藻体表面水分, 用液氮快速冷冻, 然后储存于-80 °C, 用于后续营养成分、光合色素及抗氧化指标的测定。相对生长速率(relative growth rate, RGR)的计算参考李国梁等^[12]。

1.2.2 光强对多肋藻小孢子体光合作用的影响 光强设置及其他培养条件同 1.2.1, 培养初始(0 h)及 12 h、1 d、3 d、5 d、7 d 和 9 d 后, 分别测定藻体 PSII 最大光化学量子产量(F_v/F_m)^[12]。培养 1 d、3 d、5 d 和 10 d 后分别测定藻体最大表观光合速

率(P_{max})、呼吸耗氧速率(R_d)和总光合速率(P_t)^[12]。

1.2.3 营养成分含量的测定 粗蛋白的测定采用凯氏定氮法^[13], 测定的含氮量乘以蛋白质换算系数 6.25 即可得到粗蛋白含量。脂肪的测定采用索氏提取法^[14]。灰分的测定采用灼烧法^[15]。水分的测定参照食品中水分测定方法^[16]。粗纤维的测定采用理化方法^[17]。碳水化合物的含量(%)为 100-水分-灰分-蛋白-脂肪。

1.2.4 色素含量的测定 参照 Wang 等^[18]的方法提取色素: (1) 称取 1 g 藻体置于 15 mL 离心管中, 用 4 mL 二甲基亚砜(DMSO)在室温下黑暗中提取 60 min, 将提取液置于 4 °C 保存待测。(2) 将上述 DMSO 处理完的藻体用超纯水冲洗两遍, 置于 4 mL 丙酮(100%)中, 在室温下黑暗中再提取 60 min, 将提取液置于 4 °C 保存待测。(3) 上述两种提取液分别用紫外可见分光光度计测定吸光度, 根据 seely 等^[19]提供的公式计算叶绿素 a (Chl a)、胡萝卜素(Car)和岩藻黄素(Fucox)浓度。

1.2.5 其他生化指标的测定 可溶性蛋白、丙二醛(MDA)、 H_2O_2 含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、抗超氧阴离子自由基(ASAFR)比活力分别使用对应的测试盒测定(南京建成生物公司)。

1.3 数据处理

采用 Excel 表对数据进行处理和制图, SPSS 18.0 统计软件进行方差分析和多重比较, $P < 0.05$ 作为显著性水平判断标准。

2 结果与分析

2.1 光强对多肋藻小孢子体生长及光合作用的影响

2.1.1 相对生长速率(RGR) 如图 1 所示, 第 5 天时, 多肋藻小孢子体 RGR 在光强 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最大, 但与其他组无显著性差异($P > 0.05$); 此时, 30 和 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组藻体较正常, 而 90 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组藻体顶端出现小面积泛白穿孔现象(图 2)。在第 10 天, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 RGR 显著高于 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P < 0.05$), 但与 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组无显著性差异($P > 0.05$); 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组次之, 但与其他 3 个光强组无显

著差异($P>0.05$)。总体上,随着培养时间的延长,各组 RGR 呈上升趋势。

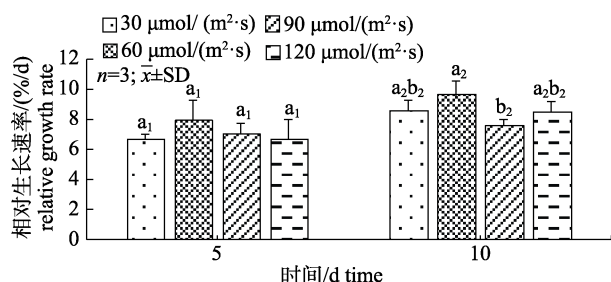


图 1 光强对多肋藻小孢子体相对生长速率的影响
柱状图上不同小写字母表示同一时间内不同实验组间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同时间段。

Fig. 1 Effects of light intensities on the relative growth rate of young sporophyte of *Costaria costata*

Different small letters on the histogram indicate significant difference between different experimental groups at the same time ($P<0.05$), and the numbers at the lower corner of the letters indicates different time periods.

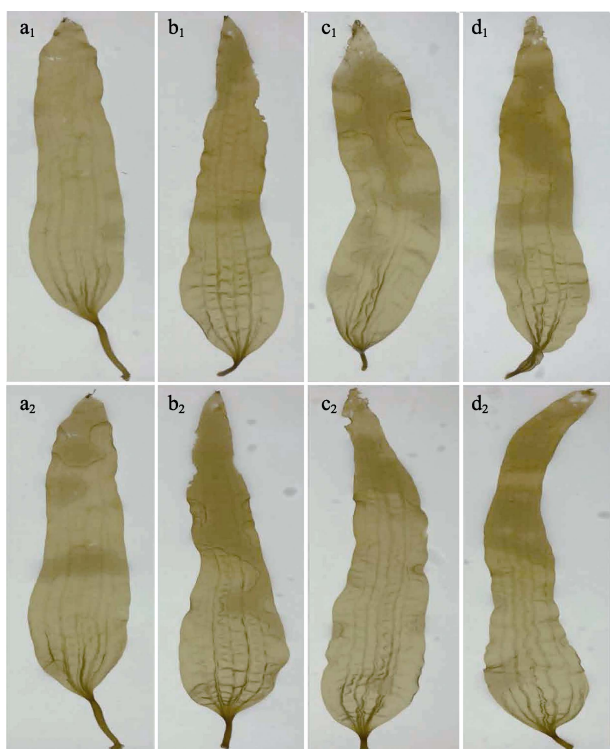


图 2 第 5 天及第 10 天不同光强下多肋藻小孢子体的生长情况

a. 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; b. 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; c. 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; d. 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. 字母右下角数字 1 表示第 5 天, 2 表示第 10 天。

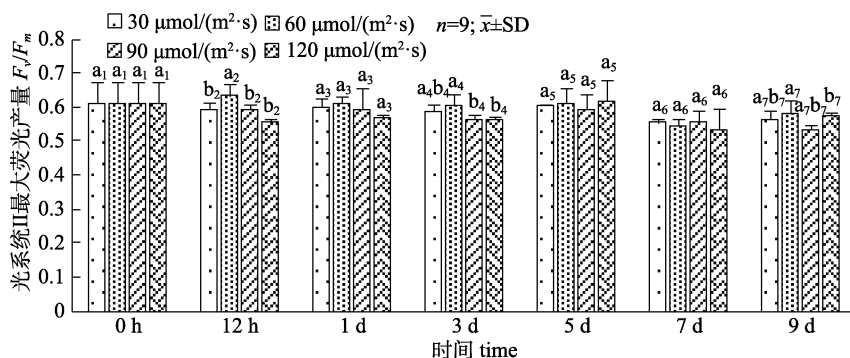
Fig. 2 The growth of young sporophytes of *Costaria costata* under different light intensities on day 5 and day 10

a. 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; b. 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; c. 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; d. 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. The number at the lower right corner of the letters indicates different time periods (1 denotes 5 d; 2 denotes 10 d).

2.1.2 F_v/F_m 如图 3 显示, 在培养前期(3 d), 从 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 到 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, F_v/F_m 随光强增高而上升; 从 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 到 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, F_v/F_m 则随着光强的增加明显下降。即 F_v/F_m 在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最大, 在 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最小。其中, 在 12 h, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组显著高于其他光强组($P<0.05$); 1 d 时, 各光强组间无显著差异($P>0.05$); 3 d 时, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组显著高于高光组[90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]($P<0.05$), 但与低光组差异不显著($P>0.05$)。5 d 时, 60 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组的 F_v/F_m 最大, 但各光强组间无显著差异($P>0.05$)。而在第 7 天, 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 F_v/F_m 降到最低值, 但与其他组间差异不显著($P>0.05$)。9 d 时, 小孢子体 F_v/F_m 值在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下最大, 显著高于 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组($P<0.05$), 但与其他组间无显著差异($P>0.05$)。同一光强下, 随着培养时间延长, 30 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 F_v/F_m 出现上下波动, 并在第 7 天为最低值, 显著低于对照组(0 h, $P<0.05$); 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组在培养 12 h 后, F_v/F_m 显著上升, 高于对照组(0 h, $P<0.05$), 总体上也呈上下波动趋势。90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 F_v/F_m 随培养时间延长, 呈线性下降趋势, 在第 9 天显著低于对照组(0 h, $P<0.05$), 但与其他组间无显著差异($P>0.05$)。

2.1.3 光合速率 如图 4a 所示, 第 1 天时, 总光合速率(P_t)在 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下最高, 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 次之, 但各组间差异不显著($P>0.05$)。在第 3 天随着光强的增强, 藻体 P_t 呈线性上升趋势, 其中, 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 P_t 最高, 显著高于 30 和 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P<0.05$), 但与 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 无显著差异($P>0.05$)。在第 5 天, 藻体 P_t 最高值在 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 90 和 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组次之, 3 组间无显著差异($P>0.05$), 但均显著高于 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P<0.05$)。第 10 天, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 P_t 最高, 但与其他组间无显著差异($P>0.05$)。同一光强下, 90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 P_t 在培养 5 d 后下降($P>0.05$); 10 d 时, 60~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 P_t 均显著下降($P<0.05$), 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 随培养时间延长也呈下降趋势, 但差异不显著($P>0.05$)(图 4a)。

第 1 天, 藻体最大表观光合速率($P_{n\max}$) 在 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最高, 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组次之, 但各

图 3 光强对多肋藻小孢子体 F_v/F_m 的影响

柱状图上不同小写字母表示同一时间内不同光强组间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同时间段。

Fig. 3 Effects of light intensities on F_v/F_m of young sporophyte of *Costaria costata*

Different small letters on the histogram indicate significant difference between different experimental groups at the same time ($P<0.05$), and the numbers at the lower right corner of the letters indicates different time periods.

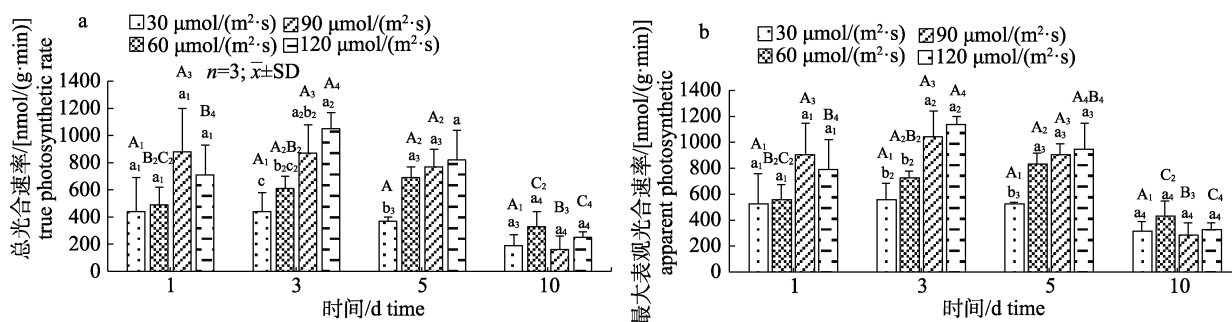


图 4 光强对不同培养时间段多肋藻小孢子体光合速率的影响

柱状图上不同小写字母表示同一时间内不同光强组间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同时间段;

不同大写字母表示同一光强组在不同时间段间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同光强处理组。

Fig. 4 Effects of light intensities on photosynthetic rate of young sporophyte of *Costaria costata* in different culture periods

Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity at the same time ($P<0.05$), and the numbers at the lower right corner of the letters indicates different time periods. Different capital letters indicate significant difference between different time periods in the same experimental group ($P<0.05$), and the numbers at the lower right corner of the letters indicates different light intensity treatments.

组间无显著差异($P>0.05$)(图 4b)。在第 3 天和第 5 天, 藻体 P_{nmax} 随光强增强呈上升趋势, 其中, 在 90 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时 P_{nmax} 最高, 但二者无显著差异($P>0.05$)。在第 10 天, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 P_{nmax} 最高, 但与其他组间无显著差异($P>0.05$)。在同一光强下, P_{nmax} 随着培养时间的延长呈先上升后下降, 其中, 90 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组下降最显著(图 4b)。

2.1.4 光合色素含量 随着光强升高, 多肋藻小孢子体 Chl a、Fucox 和 Car 含量呈小幅波动, 在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下最高, 其次为 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组最低, 但各组间无显著差异(图 5, $P>0.05$)。

2.1.5 呼吸速率(R_d) 第 1 天 R_d 在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最低, 但各光强组间的无显著差异($P>0.05$)(图 6)。

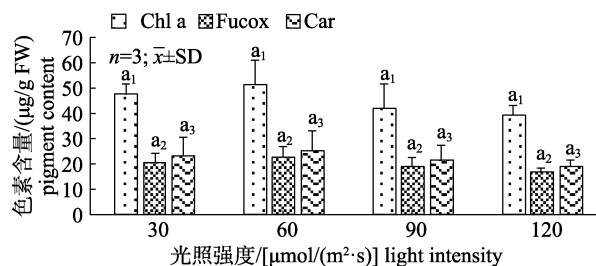


图 5 光强对多肋藻小孢子体光合色素含量的影响

柱状图上小写字母表示不同实验组间差异显著($P<0.05$),

下标相同数字代表相同光合色素。

Fig. 5 Effect of light intensities on photosynthetic pigment content of young sporophyte of *Costaria costata*

Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity at the same time ($P<0.05$), and the same numbers at the lower right corner of the letters indicates the same photosynthetic pigment.

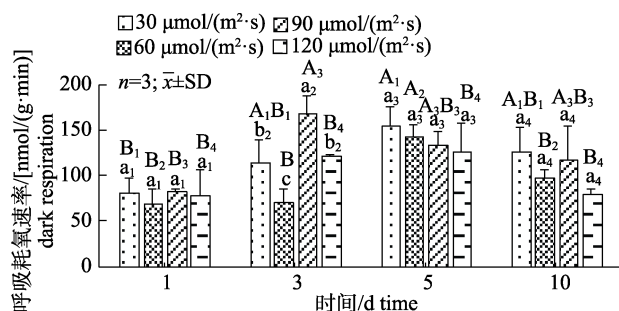


图 6 光强对多肋藻小孢子体呼吸速率的影响
柱状图上不同小写字母表示同一时间内不同光强组间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同时间段; 不同大写字母表示同一光强组在不同时间段间差异显著($P<0.05$), 字母右下角数字表示不同光强处理组。

Fig. 6 Effects of light intensities on the dark respiration rate of young sporophytes of *Costaria costata*
Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity at the same time ($P<0.05$), and the numbers at the lower right corner of the letters indicates different time periods.
Different capital letters indicate significant difference between different time periods in the same experimental group ($P<0.05$), and the numbers at the lower right corner of the letters indicates different light intensity treatments.

第 3 天, $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 R_d 显著低于其他组($P<0.05$), $90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 显著高于其他组($P<0.05$), 30 和 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组间差异不显著($P>0.05$)。在第 5 天, 小孢子体 R_d 随光强增高呈下降趋势, 但各组间无显著差异($P>0.05$)。第 10 天, $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 R_d 最低, $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组次之, 但各组间差异不显著($P>0.05$)。

2.2 不同光强下多肋藻小孢子体的生理响应

2.2.1 可溶性蛋白

高光组 [$120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] 可溶性蛋白含量显著高于低光组 [$30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] ($P<0.05$), 但与 $90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组差异不显著($P>0.05$)。在 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时可溶性蛋白含量达最低值, 但与 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组无显著差异 ($P>0.05$), 而显著低于 $90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 ($P<0.05$) (图 7)。

2.2.2 H_2O_2 和 MDA 含量

在 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下, 多肋藻小孢子体的 H_2O_2 含量显著高于 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 ($P<0.05$), 但与 $90\sim120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 差异不显著 ($P>0.05$)。小孢子体 MDA 含量在 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下最高, 但各组间无显著差异 ($P>0.05$) (图 8)。

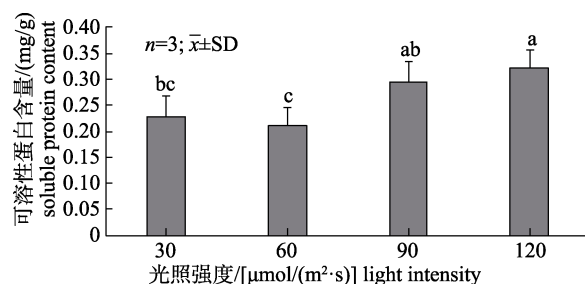


图 7 光强对多肋藻小孢子体可溶性蛋白含量的影响
柱状图上不同小写字母表示不同实验组间差异显著性($P<0.05$)。

Fig. 7 Effect of light intensities on soluble protein content in young sporophytes of *Costaria costata*
Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity ($P<0.05$).

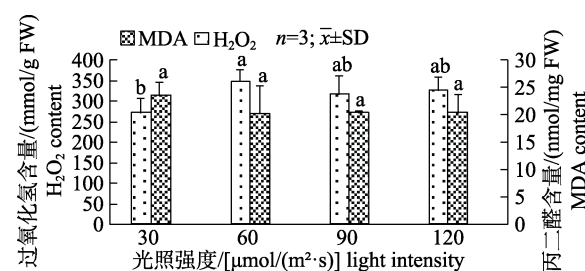


图 8 光强对多肋藻小孢子体过氧化氢及丙二醛含量的影响

柱状图上不同小写字母表示不同光强组间差异显著 ($P<0.05$), 字母右下角数字 1 表示 H_2O_2 , 2 表示 MDA。

Fig. 8 Effect of light intensities on H_2O_2 and MDA content in young sporophytes of *Costaria costata*
Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity ($P<0.05$), and the number 1 and 2 at the lower right corner of the letters indicates H_2O_2 and MDA respectively.

2.2.3 ASAFR、SOD、CAT、APX 比活力

ASAFR 和 SOD 比活力对光强的响应一致, 在光强 $60\sim120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 随光强增强显著下降 ($P<0.05$), 在 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最高, 显著高于 90 和 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 ($P<0.05$); $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 次之, 显著高于 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 ($P<0.05$); $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组藻体的 ASAFR 和 SOD 比活力最低 (图 9a, 9b)。在 $60\sim90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 多肋藻小孢子体 CAT 比活性较高, 显著高于 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组 ($P<0.05$), 但与 $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组无显著差异 ($P>0.05$) (图 9c)。在光强 $30\sim120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 多肋藻小孢子体 APX 比活力随光强的上升显著下降 ($P<0.05$), $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最高, $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最低。 $30\sim60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 小孢子体 APX 比活力显著高于 $90\sim120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

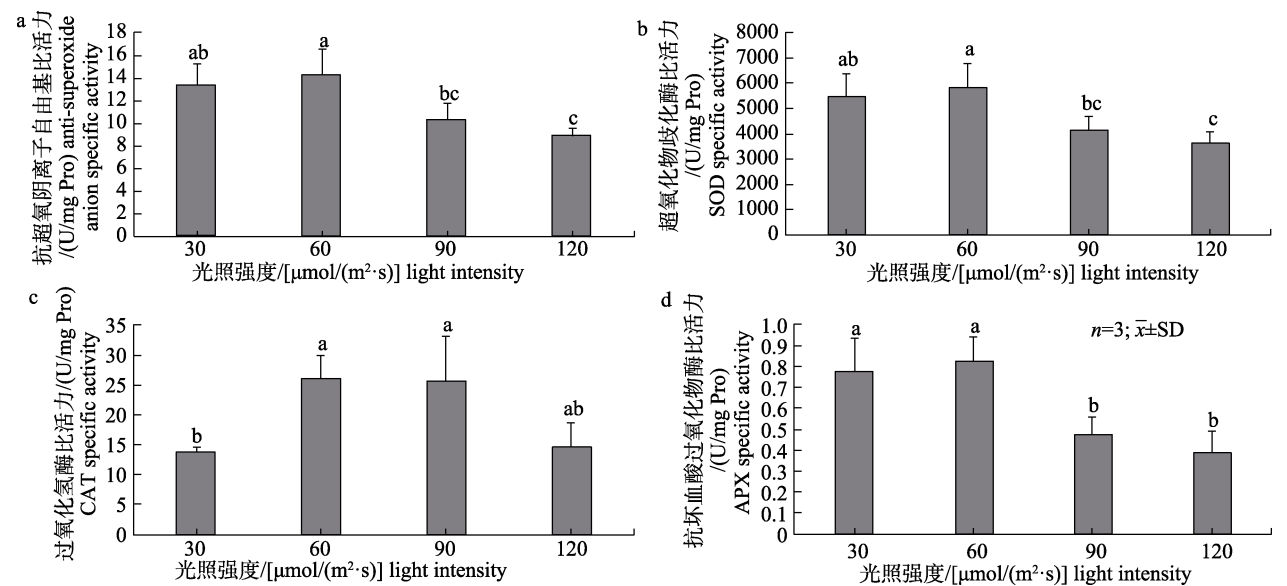


图 9 光强对多肋藻小孢子体抗氧化酶比活力的影响
柱状图上不同小写字母表示不同实验组间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 9 Effect of light intensities on antioxidantase activity in the young sporophyte of *Costaria costata*
Different small letters on the histogram indicate significant difference between different light intensity group ($P<0.05$).

组($P<0.05$)(图 9d)。

2.3 光强对多肋藻小孢子体营养成分含量的影响

如表 1 所示, 碳水化合物含量最高, 灰分次之, 脂肪量占比最小。粗蛋白、脂肪、灰分、碳水化合物在各光强组间无显著性差异($P>0.05$)。其

中粗蛋白和脂肪含量在 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最高, 灰分含量在 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时最低; 碳水化合物含量随光强升高呈下降趋势; 粗纤维含量随光强升高而上升, 高光强[90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]组显著高于低光强组[30~60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]($P<0.05$)。

表 1 光强对多肋藻小孢子体营养成分含量的影响

Tab. 1 Effects of light intensities on nutrient content young sporophyte of *Costaria costata*

光强/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$	粗蛋白 crude protein	脂肪 fat	灰分 ash	碳水化合物 carbohydrate	粗纤维 crude fibre
30	1.10 $\pm$ 0.37	0.10 $\pm$ 0.00	5.80 $\pm$ 0.26	7.67 $\pm$ 0.50	0.90 $\pm$ 0.10 ^a
60	0.98 $\pm$ 0.12	0.15 $\pm$ 0.07	5.67 $\pm$ 0.21	7.50 $\pm$ 0.26	0.87 $\pm$ 0.29 ^a
90	1.20 $\pm$ 0.03	0.15 $\pm$ 0.07	5.83 $\pm$ 0.15	6.60 $\pm$ 0.36	1.27 $\pm$ 0.21 ^b
120	1.20 $\pm$ 0.23	0.20 $\pm$ 0.10	5.50 $\pm$ 0.26	6.57 $\pm$ 1.08	1.50 $\pm$ 0.10 ^b

注: 不同小写字母上标表示不同光强组间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different superscript letters indicate significant difference between different light intensity groups ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 光强对多肋藻小孢子体生长的影响

光强作为海藻光合作用的驱动能源因子, 与温度、盐度和营养盐等共同影响海藻的生长、发育及垂直分布^[20]。相关研究表明, 植物长期暴露在强光下时, 过量的光能远超过 CO_2 同化所需, 电子传递链被过度还原而导致光能转换效率降低, 甚至使 PSII 失活, 形成光抑制现象^[21]。姚海芹等^[22]研究表明, 掌状海带(*Laminaria digitata*)小孢子体

在 20~80 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内, RGR 随光强上升而增高, 但在 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时发生光抑制现象, RGR 显著降低。当光能不充分时, 植物利用光能效率降低, 生长缓慢, 长期处于弱光下, 甚至会导致细胞类囊体系统的解体^[23]。卢晓等^[24]探究了光照对脆江蓠(*Gracilaria chouae*)生长的影响, 研究发现, 在低光强[40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]下, 藻体呈负增长。超出植物光适应范围, 无论强光或弱光都会导致植物正常生理活动受阻。本研究发现, 在

30~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内, 在整个培养周期中, 多肋藻小孢子体在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下 RGR 最大, 与低光组[30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]和高光组[120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]无显著差异, 但在 90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下, 藻体稍部出现小面积的白化、穿孔现象, 表明此时藻体受到一定光胁迫。凌晶宇等^[25]研究表明, 巨藻(*Macrocystis pyrifera*) 在 90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下 RGR 显著下降。总体上, 所有实验组随培养时间延长, RGR 增大。

同时, 在实验周期内(10 d), 多肋藻小孢子体在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下 F_v/F_m 都高于其他组, 表明此时小孢子体相对于其他组具有更高的最大光合潜力, 与该光强下所测最高相对生长速率一致。其他光强下 F_v/F_m 虽然随时间呈现一定的波动, 但总体上呈下降趋势, 表明藻体在 30、90 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下光合系统遭到轻微程度的胁迫。在培养前期(5 d), 多肋藻小孢子体 P_t 和 $P_{n\max}$ 均随光强增加而上升, 到第 10 天, P_t 和 $P_{n\max}$ 在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最高; 培养周期内, 在光强 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下藻体 R_d 处于较低水平。表明短时光或高光胁迫对藻体光合系统的影响较小, 长期低光或高光对 PSII 产生一定胁迫, R_d 在胁迫响应过程发挥了一定的保护作用。可能是由于低光抑制了光合酶基因的表达及酶活性^[26], 而高光则可能导致 D1 蛋白结构发生变化, PSII 系统发生光抑制^[27]。Chl a 作为反应中心色素, 是光合作用中主要成分之一, 而 Fucox 及 Car 为辅助色素, 是褐藻进行光合作用不可或缺的成分。植物为维持正常生长, 在低光下通过自身调节机制, 积极响应低光而积累光合色素, 以提高光合效率^[28]。本研究也发现这一特点, Chl a、Fucox 和 Car 含量在 30~60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时较高, 高光照下(90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 较低。总体上, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组色素含量略高于其他组, 为最大 RGR 的获取提供支持。从生长和光合作用两方面均表明在实验条件下, 多肋藻小孢子体在 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 生长最佳, 这与 Park 等^[29] 研究结果较为一致。

3.2 多肋藻小孢子体对不同光强的抗氧化生理响应

植物细胞内氧化应激的程度取决于产生的

ROS 种类及含量。藻体内抗氧化酶系统如 ASAFR、SOD、CAT 和过氧化物 APX 等活性的平衡对于清除 ROS 至关重要。徐严等^[30]研究发现, 在高盐(110)胁迫下, 坛紫菜叶状体内 CAT、APX 的活性和 GSH 含量均随胁迫时间延长呈现先上升后下降的变化趋势; 低盐(0)胁迫下, SOD 的活性不断增强, GSH 含量增加, 而 CAT 和 APX 的活性则随胁迫时间延长先上升后下降。凌晶宇等^[31]也研究表明, 掌状海带(*Laminaria digitata*) 幼苗在响应温度胁迫时, SOD、CAT 酶活在不同胁迫时间段呈上下波动变化。藻体应对胁迫时, 抗氧化酶活性呈现不同的变化趋势, 与 ROS 的生成以及 H_2O_2 的不断积累、清除有关。基于 RGR、光合参数指标、外观来看, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 最有利于多肋藻小孢子体的生长, 高光和低光对小孢子体均产生轻微胁迫, 但并未检测到 H_2O_2 、MDA 的积累。在高光[90~120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]下, 可溶性蛋白的含量显著升高, 在低光下, ASAFR、SOD 和 APX 比活力显著上升, CAT 酶在 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下显著降低, 说明这些酶在维持藻体内 ROS 动态平衡时发挥积极作用。

3.3 不同光强下多肋藻小孢子体营养成分组成

光强不仅影响海藻的光合作用及生长, 也会影响藻体内营养成分的积累及消耗^[32]。本研究发现随着光强增加, 粗蛋白和脂肪含量呈上升的趋势。相关研究表明, 在 50~150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内, 巨藻蛋白质含量与光强呈正相关^[33]; 高型盒藻(*Biddulphia regia*) 在较高光强下则会将多余的光能转化为化学能, 以脂质形式存储起来^[34]。碳水化合物是藻类光合作用的直接产物, 在很大程度上受到光强的影响。如在一定光强范围内, 巨藻^[33] 和鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)^[9] 碳水化合物含量随光照强度上升而升高。在本实验光强范围内, 多肋藻小孢子体的碳水化合物含量与光强呈负相关, 但结构性碳水化合物粗纤维含量随着光强上升显著增加。光限制或过饱和条件下, 海藻的碳需求超过光合固定碳, 其非结构性碳水化合物(蔗糖和淀粉)可作为碳源和能源被利用, 以支持藻体的生长^[35]; 同时非结构性碳水化合物的消耗与转移在海藻应对环境胁迫过程中也会起到关键作用^[36]。

综上, 多肋藻小孢子体在 $30\sim 120\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 均具有较快的生长速率, 其中以 $60\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 左右为最适光强。光强正向调节多肋藻小孢子体内粗蛋白、脂肪和粗纤维含量, 而碳水化合物含量则与光强呈负相关。在低光下, 藻体光合色素含量有所上升以加强对光能的吸收维持光合作用。以 $60\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 为对照, 在较低或较高光强下, 藻体呼吸作用均显著增强; 此外, 高光下, 可溶性蛋白含量显著上升, 低光下, ASAFR、SOD 和 APX 比活力较高, CAT 比活力则在低光和高光下均下降, 推测这些生理响应对多肋藻小孢子体适应不同光强具有重要的调节作用。

参考文献:

- [1] Yoshida T. Marine Algae of Japan[M]. Tokyo: Uchida Roka-kuho Publishing, 1998: 25-1222.
- [2] Sohn C H. Developments on two newly cultivated species *Capsosiphon Fulvescens* and *Costaria Costata* in Korea[J]. Journal of Phycology, 2010, 39(s1): 53-54.
- [3] Tanaka J, Nakamura T. A Photographic Guide for Japanese Seaweeds[M]. Japan: Heibonsha Press, 2004, 99-100.
- [4] Hernandez-Carmona G, Camacho O. Phenology and alginates of two *Sargassum* species from the Caribbean coast of Colombia[J]. Ciencias Marinas, 2012, 38(2): 381-393.
- [5] Li D T, Chen G D, Zhang L L, et al. Study on extraction, isolation of fucoxanthin of *Undaria pinnatifida* and the effect of inhibition proliferation of HepG2[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 383-389. [李丹彤, 陈国栋, 张玲丽, 等. 裙带菜岩藻黄素的提取分离及对人肝癌细胞 HepG2 的抑制作用研究[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 383-389.]
- [6] Kawakami T, Tsushima M, Katabami Y, et al. Effect of β -carotene, β -echinenone, astaxanthin, fucoxanthin, vitamin A and vitamin E on the biological defense of the sea urchin *Pseudocentrotus depressus*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1998, 226(2): 165-174.
- [7] FU G, Liu J D, Wang G G, et al. Early development of *Costaria costata* (C. Agardh) saunders and cultivation trials [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(4): 731-737.
- [8] Küster A, Schaible R, Schubert H. Light acclimation of photosynthesis in three *Charophyte* species[J]. Aquatic Botany, 2004, 79(2): 111-124.
- [9] Jiang H B, Tian X L, Dong S L, et al. Effects of temperature and light intensity on the growth and biochemical composition of *Sargassum thunbergii*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 185-189. [姜宏波, 田相利, 董双林, 等. 温度和光照强度对鼠尾藻生长和生化组成的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 185-189.]
- [10] Breeman A M, Hoopen A T. Ecology and distribution of the subtidal red alga *Acrosyphyton purpuriferum* (J.A.G.) Sjst. (Rhodophyceae, Cryptonemiales)[J]. Aquatic Botany, 1981, 11: 143-166.
- [11] Wang Q H, Dong S L, Tian X L, et al. The effects of light intensity on the growth and chemical constituents of *Ulva pertusa*[J]. Marine Sciences, 2010, 34(8): 76-80. [王巧晗, 董双林, 田相利, 等. 光照强度对孔石莼生长和藻体化学组成的影响[J]. 海洋科学, 2010, 34(8): 76-80.]
- [12] Li G L, Wang W J, Li B X, et al. Effects of temperature on young sporophyte growth and antioxidant physiology of *Costaria costata*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(9): 1300-1311. [李国梁, 汪文俊, 李宝贤, 等. 温度对多肋藻小孢子体生长及抗氧化生理的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(9): 1300-1311.]
- [13] Standardization Administration of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China. National Food Safety Standard Determination of Protein In Foods: GB 5009.5-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010. [中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.]
- [14] Standardization Administration of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of fat in foods: GB/T 5009.6-2003[S]. Beijing: China Standard Press, 2003. [中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中脂肪的测定: GB/T 5009.6-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.]
- [15] Standardization Administration of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of ash in foods: GB/T 5009.6-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010. [中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中灰分的测定: GB 5009.4-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.]
- [16] Standardization Administration of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of moisture in foods: GB/T 5009.6-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010. [中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.]

- [17] Standardization Administration of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard determination of crude fiber in vegetable foods: GB/T 5009.6-2003[S]. Beijing: China Standard Press, 2003. [中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB 5009.10-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.]
- [18] Wang W J, Wang G C, Zhang M, et al. Isolation of fucosanthin from the rhizoid of *Laminaria japonica* Aresch[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(8): 1009-1015.
- [19] Seely G R, Duncan M J, Vidaver W E. Preparative and analytical extraction of pigments from brown algae with dimethyl sulfoxide[J]. Marine Biology, 1972, 12(2): 184-188.
- [20] Tew K S, Meng P J, Leu M Y. Factors correlating with deterioration of giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Laminariales, Heterokontophyta) in an aquarium setting[J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(5): 1269-1277.
- [21] Ort D R, Baker N R. A photoprotective role for O₂ as an alternative electron sink in photosynthesis?[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2002, 5(3): 193-198.
- [22] Yao H Q, Liang Z R, Liu F L, et al. Preliminary studies on the photosynthetic and respiration rate of young sporophyte of a new *Saccharina* variety "Haitian No.1" using liquid-phase Oxygen measurement system[J]. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(1): 140-147. [姚海芹, 梁洲瑞, 刘福利, 等. 利用液相氧电极技术研究"海天 1 号"海带(*Saccharina japonica*)幼孢子体光合及呼吸速率[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(1): 140-147.]
- [23] Sheath R G, Hellebust J A, Sawa T. Changes in plastid structure, pigmentation and photosynthesis of the conchocelis stage of *Porphyra leucosticta* (Rhodophyta, Bangiophyceae) in response to low light and darkness[J]. Phycologia, 1977, 16(3): 265-275.
- [24] Lu X, Li M Z, Xu Z G, et al. Impact of light intensity on growth and levels of photosynthetic pigments of *Gracilaria choui*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 145-150. [卢晓, 李美真, 徐智广, 等. 光照对脆江蓠生长及光合色素含量的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 145-150.]
- [25] Ling J Y, Liang Z R, Sun X T, et al. Primary investigations on the photosynthesis and respiration of *Macrocystis pyrifera* [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(6): 820-828. [凌晶宇, 梁洲瑞, 孙修涛, 等. 巨藻幼苗光合、呼吸作用的初步研究[J]. 水产学报, 2014, 38(6): 820-828.]
- [26] Bi H G, Wang M L, Jiang Z S, et al. Impacts of suboptimal temperature and low light intensity on the activities and gene expression of photosynthetic enzymes in cucumber seedling leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2894-2900. [毕焕改, 王美玲, 姜振升, 等. 亚适温弱光对黄瓜幼苗光合酶活性和基因表达的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2894-2900.]
- [27] Critchley C, Russell A W. Photoinhibition of photosynthesis *in vivo*: The role of protein turnover in photosystem II[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 92(1): 188-196.
- [28] Duke C S, Litaker W, Ramus J. Effects of temperature, nitrogen supply, and tissue nitrogen on ammonium uptake rates of the chlorophyte seaweeds *Ulva curvata* and *Codium decorticateum*[J]. Journal of Phycology, 2010, 25(1): 113-120.
- [29] Park S K, Heo J S, Kim B Y, et al. Comparison on the growth of *Costaria costata* and *Undaria pinnatifida* sporophytes in culture and their field populations[J]. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 44(1): 71-77.
- [30] Xu Y, Wang W L, Xu K, et al. Effect of different saline stress on physiological indexes of *Pyropia haitanensis*[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(3): 380-386. [徐严, 王文磊, 许凯, 等. 不同盐度胁迫对坛紫菜叶状体生理指标的影响[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(3): 380-386.]
- [31] Ling J Y, Liang Z R, Wang F J, et al. Effects of temperature stress on the growth, antioxidant system, and chlorophyll fluorescence of *Laminaria digitata*[J]. Marine Sciences, 2015, 39(12): 39-45. [凌晶宇, 梁洲瑞, 王飞久, 等. 温度胁迫对掌状海带幼苗生长、抗氧化系统及叶绿素荧光的影响[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 39-45.]
- [32] Lin Z X, Gong X Z, Li D P. Effects of light and the stress of nutrients deficiency on the growth and levels of chemical constituents of *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Marine Sciences, 2007, 31(11): 22-26. [林贞贤, 宫相忠, 李大鹏. 光照和营养盐胁迫对龙须菜生长及生化组成的影响[J]. 海洋科学, 2007, 31(11): 22-26.]
- [33] Lu W W, Wang Q H, Gong Q L. Effects of light and temperature on growth and biochemical composition of a marine Macroalga (*Macrocystis pyrifera*) young sporophyte[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(1): 40-48. [芦薇薇, 王巧晗, 宫庆礼. 光照强度和温度对巨藻幼孢子体的生长和生化组成的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 40-48.]
- [34] Li W Q, Zheng A R. Effects of environmental factors on the growth and biochemical composition of *Biddulphia regia*[J]. Haiyang Xuebao, 1996, 18(2): 50-56. [李文权, 郑爱榕. 环境因子对高盒形藻生长及其生化组成的影响[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 50-56.]
- [35] Serrano O, Mateo M A, Renom P. Seasonal response of *Posidonia oceanica* to light disturbances[J]. Marine Ecology Progress Series, 2011, 423(10): 29-38.
- [36] Leoni V, Vela A, Pasqualini V, et al. Effects of experimental reduction of light and nutrient enrichments (N and P) on seagrasses: a review[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2008, 18(2): 202-220.

Effects of light intensity on young sporophyte growth and antioxidant physiology of *Costaria costata*

LI Guoliang¹, WANG Wenjun¹, LI Baoxian¹, LIANG Zhourui¹, LU Xiaoping¹, LI Xiaojie²

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Key Laboratory of Genetic Improvement and Efficient Culture of Marine Algae of Shandong Province, Shandong Oriental Ocean Science-Technology Co., Ltd., Yantai 264003, China

Abstract: *Costaria costata* is a potential economic kelp. Light intensity is one of the key factors that regulates the growth, photosynthesis, and metabolism of seaweeds, and is also the main factor affecting the morphology and vertical distribution of seaweeds. Therefore, it is important to study the tolerance of *C. costata* to light intensity for commercial farming. The growth, photosynthesis, nutrient composition, and antioxidant capacity of young sporophytes of *C. costata* were studied under different light intensities of 30–120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ under laboratory conditions to reveal the adaptability of *C. costata* sporophytes to light intensity and support the cultivation of this species in marine areas. The results showed that the young sporophytes grew fast at 30–120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, and both the relative growth rate (RGR) and F_v/F_m were the highest at 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. The total photosynthetic rate and the maximum apparent photosynthetic rate increased with light intensity at the early stage (5 d), and reached the highest at 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ at the late stage (10 d). The respiration rate (R_d) was significantly lower at 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ than at the other light intensities. The contents of chlorophyll a, fucoxanthin, and carotenoid did not differ significantly among the varying light intensities. The content of crude protein, fat, and crude fiber was positively correlated with light intensity, while the content of carbohydrate was negatively correlated with light intensity. The results indicated that light intensity of 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ was suitable for the growth of young sporophytes of *C. costata*. Furthermore, the content of soluble proteins increases under high light intensities while the activities of ASAFR, SOD, APX were higher under low light intensities. Moreover, the alga had the same response mechanism, namely enhanced respiration, under either low light or high light stress.

Key words: *Costaria costata*; light intensity; relative growth rate; photosynthesis; antioxidant system; nutrient composition

Corresponding author: WANG Wenjun. E-mail: wjwang@ysfri.ac.cn