

光照强度与琼枝藻生长、光合色素和颜色值的相关性分析

童立豪^{1,2}, 吴翔宇¹, 黄良夫¹, 曾俊¹, 石耀华³, 唐贤明¹

(1. 海南省海洋与渔业科学院/海南省热带海水养殖技术重点实验室, 海南 海口 571126; 2. 广西科学院广西红树林研究中心/广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536007; 3. 海南大学海洋学院, 海南 海口 570228)

摘要: 文章探讨了不同光照强度 (1 000、3 000、5 000、7 000 和 9 000 lx) 下琼枝藻 (*Betaphycus gelatinae*) 的生长、光合色素及颜色变化, 基于 CSE-1 成像色度检测分析系统, 研究了琼枝藻颜色参数 $L^*a^*b^*$ (CIE 1976) 与光照强度、生长、光合色素的相关性。结果显示, 琼枝藻的相对生长速率和增重率均随光照强度的增加显著增大, 适宜生长的光照强度为 7 000~9 000 lx, 光照强度为 1 000 lx 时琼枝藻无明显生长。叶绿素 *a* (Chl-*a*)、类胡萝卜素 (Car)、藻红蛋白 (PE) 和藻蓝蛋白 (PC) 含量总体上随光照强度的增加呈下降趋势。随着光照强度的增加, 琼枝藻的颜色由红褐色逐渐变为绿色, 三刺激值 XYZ 在 CIE 1931 色度图上呈现明显的分布差异。光照强度与明度 (L^*) 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与红绿色度 (a^*) 呈极显著负相关 ($P<0.01$); 生长速率与 L^* 、黄蓝色度 (b^*) 均呈显著正相关 ($P<0.05$); Chl-*a* 与 L^* 呈显著负相关 ($P<0.05$), 与 a^* 呈显著正相关 ($P<0.05$); PE 和 PC 均与 a^* 呈显著正相关 ($P<0.05$)。

关键词: 琼枝藻; 光照强度; 生长; 光合色素; 颜色参数; 相关性分析

中图分类号: S 917.3

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Correlation analysis of light intensity and growth, photosynthetic pigment, color value of *Betaphycus gelatinae*

TONG Lihao^{1,2}, WU Xiangyu¹, HUANG Liangfu¹, ZENG Jun¹, SHI Yaohua³, TANG Xianming¹

(1. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences/Hainan Provincial Key Laboratory of Tropical Maricultural Technologies, Haikou 571126, China; 2. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences/Guangxi Key Laboratory of Mangrove Conservation and Utilization, Beihai 536007, China; 3. Ocean College, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: We investigated the growth, photosynthetic pigment and color change of *Betaphycus gelatinae* at different light intensities (1 000, 3 000, 5 000, 7 000 and 9 000 lx). Based on CSE-1 imaging chromaticity detection and analysis, we studied the correlation of color parameter $L^*a^*b^*$ (CIE 1976) with light intensity, growth and photosynthetic pigment. The results show that the relative growth rate and weight gain rate increased significantly with the increase of light intensity. The suitable light intensity for growth was 7 000–9 000 lx. However, when the light intensity was 1 000 lx, there was no obvious growth of *B. gelatinae*. With the increase of light intensity, the contents of chlorophyll *a*, carotenoids, phycoerythrin and phycocyanin generally decreased, and the color of *B. gelatinae* gradually changed from reddish brown to green. The tristimulus values (XYZ) showed a significant distribution difference on the CIE 1931 chromaticity diagram at different light intensities. Light intensity was significantly positively correlated with

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-03-19

资助项目: 海南省重点研发项目 (ZDYF2020176); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-50); 海南省科研院所技术研发专项; 国家海洋水产种质资源库项目

作者简介: 童立豪 (1992—), 男, 硕士, 研究实习员, 从事海水养殖技术与开发。E-mail: 1434505076@qq.com

通信作者: 唐贤明 (1979—), 男, 研究员, 从事热带海水养殖技术研究。E-mail: hn.tangxm@aliyun.com

lightness L^* ($P<0.05$), but significantly negatively correlated with red-green value a^* ($P<0.01$). There was a significant positive correlation between relative growth rate with lightness L^* and yellow-blue value b^* ($P<0.05$). Chlorophyll a was significantly negatively correlated with lightness L^* ($P<0.05$), but significantly positively correlated with red-green value a^* ($P<0.05$). Both phycoerythrin and phycocyanin were significantly positively correlated with the red-green value a^* ($P<0.05$).

Key words: *Betaphycus gelatinae*; Light intensity; Growth; Photosynthetic pigment; Color parameters; Correlation analysis

琼枝藻 (*Betaphycus gelatinae*) 隶属于红藻门、真红藻纲、杉藻目、红翎菜科、琼枝藻属, 俗称琼枝麒麟菜, 主要分布于中国、菲律宾、日本、印度尼西亚等地, 在中国自然分布于海南岛、东沙群岛和台湾岛等热带和亚热带海区^[1-4]。自然界中琼枝藻主要附着在近岸岩礁、珊瑚礁等基质上生长, 藻体背、腹面颜色差异明显, 分别呈紫红色和黄绿色, 枝扁平, 分枝上有疣状突起。

作为中国海南特有土著海藻种类, 琼枝藻具有重要的生态价值及较高的经济价值, 被广泛应用于食品加工、卡拉胶提取等领域^[5-7]。研究表明, 琼枝藻藻体所含生物活性物质具有广谱病毒抑制^[8-9]、抗凝血和抗血栓^[8,10]、抗真菌^[11]、抗炎和抗肿瘤^[12]等功效, 可作为医药开发的良好材料。

当前琼枝藻野生资源极尽枯竭, 呈现显著萎缩的趋势^[13], 而人工养殖是解决原材料来源的主要途径^[14]。数据显示, 近年来琼枝藻养殖产量持续下降, 2018 年仅 1 820 t, 比 2017 年 (5 629 t) 减少 67.67%^[15], 这与海洋生态环境破坏、海域使用空间减少以及研究基础薄弱等因素有关。我国早在 1960 年就开始了琼枝藻栽培研究, 建立了较为成熟的养殖模式和种植技术^[16], 但目前有关琼枝藻的研究仍较少, 仅有营养成分^[6]、卡拉胶提取^[7]、药用价值^[17]、环境因子对其生长的影响^[14,16,18-19]等少量报道。因此, 开展相关的基础研究, 支撑和服务于养殖产业发展显得尤为重要。

光是影响植物生长发育、生理生化和形态建成等方面的重要影响因子, 大型海藻在长期的自然进化过程中, 形成了不同的光适应机制, 不同种海藻对光照强度的需求不同。如石花菜 (*Gelidium amansii*) 幼孢子体的适宜生长光照强度为 2 200~4 400 lx^[20]; 条斑紫菜 (*Porphyra yezoensis*) 的适宜生长光照强度为 6 600 lx^[21]; 瓦氏马尾藻 (*Sargassum vachellianum*) 的适宜生长光照强度为 1 100 lx^[22]。方哲等^[18]以卤钨灯为光源研究了光照强度与琼枝藻生长的关系, 认为琼枝藻在光照强度为 3 000 lx 时日生长率最高。童立豪等^[23]研究了光质对琼枝藻生长和生理

特性的影响, 认为紫光和蓝光更有利于琼枝藻的生长。本文在前期工作的基础上, 通过 CSE-1 成像色度检测分析系统, 对光照强度与琼枝藻生长等生理指标的相关性进行了量化分析和探讨, 以期对琼枝藻生物学研究及人工种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

琼枝藻取自海南省海洋与渔业科学院琼海科研基地 (110°40'07.2"E、19°21'58.2"N), 挑选颜色正常、生长旺盛的藻体洗净, 于自然海水中暂养 7 d 后开始实验。暂养温度 28 ℃, 盐度 28, 光照强度 5 000 lx, 光周期为 12 L : 12 D。

1.2 实验设置

挑选健康无溃烂的琼枝藻 2~3 g (湿质量) 培养于 1 L 玻璃烧杯中。设置 1 000、3 000、5 000、7 000 和 9 000 lx 共 5 个光照强度, 每个光照强度设置 3 个重复; 采用多排密集日光灯管提供光照, 通过距离远近调节光照强度。温度、盐度和光周期与暂养条件相同。每 7 d 换 1 次海水并称质量, 实验持续 35 d。

1.3 生长速率和增重率计算

每 7 d 测量琼枝藻的湿质量, 称量前用吸水纸快速吸干藻体表层水。根据以下公式计算增重率 (Weight gain rate, WGR, %) 和相对生长速率 (Relative growth rate, RGR, %·d⁻¹):

$$WGR = [(M_t - M_0) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$RGR = \left[\ln \left(\frac{M_t}{M_0} \right) / t \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: t 为培养时间 (d); M_0 为初始湿质量 (g); M_t 为 t 天后的湿质量 (g)。

1.4 色素和藻胆蛋白的提取和分析

实验第 35 天提取和分析藻体色素和藻胆蛋白质量分数。

叶绿素 a (Chl- a) 和类胡萝卜素 (Car) 采用无水甲醇提取法测定。根据 Porra^[24] 的公式计算 Chl- a 的质量分数; 根据 Parsons 等^[25] 的公式计算 Car 的质量分数。

藻红蛋白 (PE) 和藻蓝蛋白 (PC) 采用磷酸缓冲液提取法测定。根据 Beer 和 Eshel^[26] 的公式计算 PE 和 PC 的质量分数。

1.5 颜色参数的测量与计算

实验第 35 天, 用相机 (佳能 EOS6D, 日本) 对藻体进行无差别图片采集, 后将待测图片导入 CSE-1 成像色度检测分析系统中, 随机选取 5 个点, 获得其相应的颜色参数 $L^*a^*b^*$ (CIE 1976) 和三刺激值 XYZ (CIE 1931) (L^* 为明度, 数值介于 0~100, a^* 指红绿色度, $+a^*$ 为红, $-a^*$ 为绿; b^* 指黄蓝色度, $+b^*$ 为黄, $-b^*$ 为蓝; X、Y、Z 分别指红、绿、蓝三原色值, 表示颜色的光色度特性)。计算各处理组 $L^*a^*b^*$ 和 XYZ 的平均值, 分别作为该藻体颜色参数和三刺激值, 根据下列公式计算色品坐标 x 、 y 以及不同光照强度间藻体色差 ΔE_{ab} :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (3)$$

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{[(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]} \quad (4)$$

式中: 明度差为 $\Delta L = L_1^* - L_2^*$; 色度差为 $\Delta a = a_1^* - a_2^*$, $\Delta b = b_1^* - b_2^*$; L_1^* 、 a_1^* 和 b_1^* 是一个光照强度下藻体颜色各参数平均值, L_2^* 、 a_2^* 和 b_2^* 是另一个光照强度下藻体颜色各参数平均值。

1.6 统计分析

利用 Excel 2019 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理及统计分析。采用 One-way ANOVA (Turkey) 和 t 检验分析显著性差异 ($P < 0.05$)。光照强度、RGR、Chl- a 、Car、PE、PC 与 $L^*a^*b^*$ 之间采用 Pearson 相关性分析 (显著水平为 $P < 0.05$)。

2 结果

2.1 光照强度对琼枝藻生长的影响

光照强度为 1 000~9 000 lx 时, 琼枝藻的 RGR 总体上随光照强度的增加而增大。光照强度为 1 000 lx 时, 琼枝藻的 RGR 仅为 $(0.12 \pm 0.01) \% \cdot d^{-1}$, 远低于其他光照强度组; 光照强度为 7 000 与 9 000 lx 时, RGR 达到最大 (约 $1.2 \% \cdot d^{-1}$) 且无显著差异 ($P > 0.05$, 图 1)。

光照强度为 1 000 lx 时, 琼枝藻的 WGR 在实验期间无明显增加; 其余各处理组生长变化趋势基本一致, 实验前 14 d 生长较缓慢, 第 14—21 天增长较明显, 之后趋于稳定, WGR 均随时间的延长逐渐上升。光照强度 7 000 和 9 000 lx 组的增重率变化曲线基本重合 (图 2)。

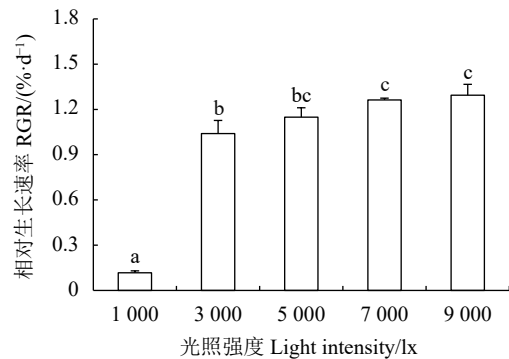


图1 不同光照强度对琼枝藻相对生长速率的影响
不同小写字母间表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Figure 1 Effects of different light intensities on RGR of *B. gelatiniae*

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

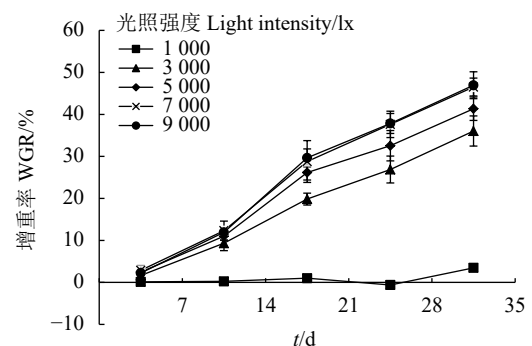


图2 不同光照强度下琼枝藻增重率随时间的变化

Figure 2 Change of WGR for *B. gelatiniae* at different light intensities along with time

2.2 光照强度对琼枝藻光合色素质量分数的影响

随着光照强度的增加, 琼枝藻的 Chl- a 质量分数逐渐下降。光照强度 1 000 和 3 000 lx 组的 Chl- a 质量分数显著高于 9 000 lx 组 ($P < 0.05$), 其余处理组间无显著差异 ($P > 0.05$)。光照强度 9 000 lx 组的 Car 质量分数显著低于 3 000 lx 组 ($P < 0.05$), 其余处理组间无显著差异 ($P > 0.05$), 且 1 000、5 000 和 7 000 lx 组的 Car 质量分数基本一致 (图 3)。

光照强度为 1 000 lx 时, 琼枝藻的 PE 质量分数显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 且随光照强度的增加逐渐下降, 光照强度 3 000 lx 组的 PE 质量分数显著高于 5 000、7 000 和 9 000 lx 处理组 ($P < 0.05$), 后 3 个处理组间均无显著差异 ($P > 0.05$)。各光照强度下的 PC 质量分数均较低, 1 000 lx 组较其他组高且差异显著 ($P < 0.05$, 图 4)。

2.3 光照强度对琼枝藻颜色的影响

实验材料初始颜色均为红褐色。经 35 d 实验后, 光照强度 1 000 lx 下琼枝藻颜色未发生变化,

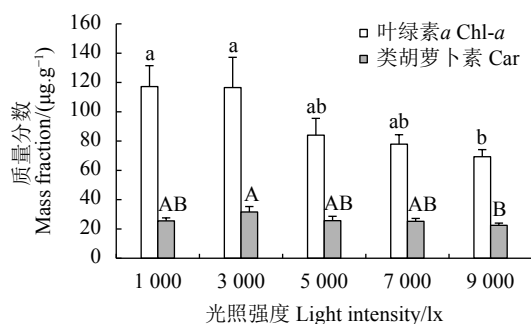


图3 不同光照强度下琼枝藻的色素质量分数
不同小写字母间表示差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母间表示差异显著 ($P<0.05$); 图4 同此。

Figure 3 Pigment mass fraction of *B. gelatinae* at different light intensities

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

Different capital letters indicate significant difference ($P<0.05$).

The same case in Figure 4.

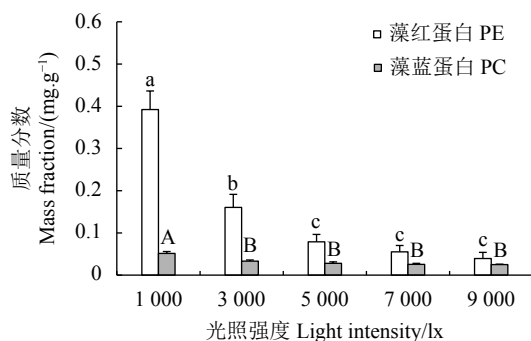


图4 不同光照强度下琼枝藻的藻胆蛋白质量分数

Figure 4 Phycobiliprotein mass fraction of *B. gelatinae* at different light intensities

仍呈红褐色, 与实验前藻体颜色无明显差异; 光照强度 3 000 和 5 000 lx 下琼枝藻颜色呈浅红色, 并逐渐偏向绿色; 而光照强度 7 000 和 9 000 lx 下琼枝藻的颜色无明显差异, 均为绿色 (图 5)。

本研究显示, 经 35 d 实验后, 颜色均一的琼枝藻随光照强度的增加 L^* 和 b^* 总体上呈增大趋势, 而 a^* 则呈显著减小趋势 (表 1)。 L^* 介于 26.14~50.64, 光照强度为 9 000 lx 时, L^* 最大; 光照强度为 1 000 lx 时, L^* 最小。 a^* 介于 -10.28~28.24, 光照强度为 7 000 和 9 000 lx 时, 色度均为绿色 ($-a^*$); 其余光照强度下, 色度为红色 ($+a^*$)。 b^* 介于 12.49~34.25, 各处理组的色度均为黄色 ($+b^*$); 光照强度为 1 000 lx 时 b^* 最小, 光照强度为 7 000 lx 时 b^* 最大。

不同光照强度下琼枝藻颜色的三刺激值 XYZ 集中在 CIE 1931 色度图上 x 为 0.354~0.519、 y 为 0.313~0.471。光照强度为 1 000 lx 时, 主要分布在红原色区域, 偏暗红色; 光照强度为 3 000 和 5 000 lx 时分布在红原色和绿原色过渡区, 偏向黄色; 光照强度为 7 000 和 9 000 lx 时则主要分布在绿原色区域, 偏亮绿色 (图 6)。

不同光照强度下各处理组间琼枝藻颜色的色差 ΔE_{ab} 最小为 11.22, 最大为 50.57, 且随光照强度差异的增大而增加 (表 2)。

2.4 琼枝藻颜色变化与光照强度、生长、光合色素的相关性

光照强度与 L^* 呈显著正相关 ($R=0.922$, $P<$

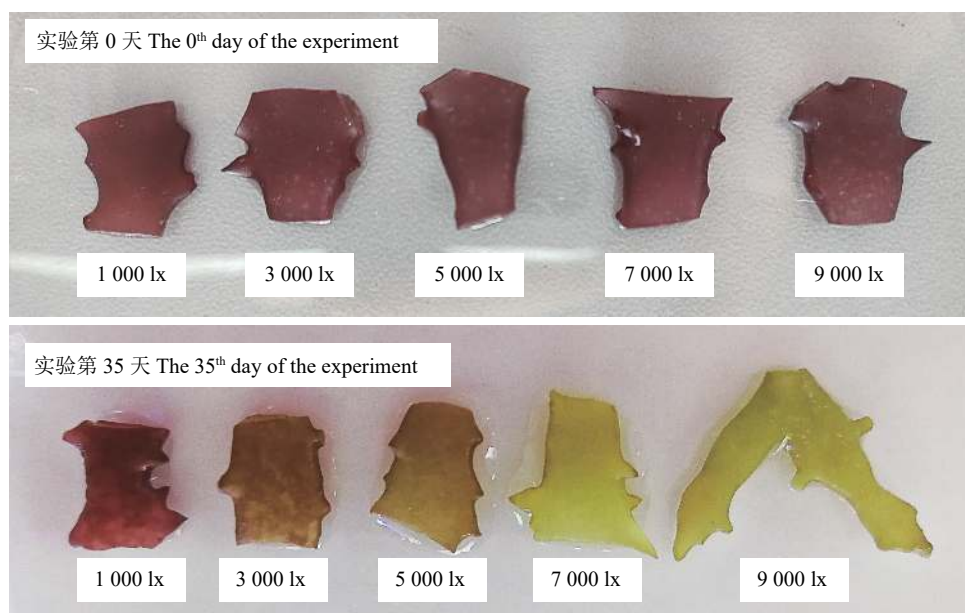


图5 不同光照强度下琼枝藻的颜色变化

Figure 5 Color change of *B. gelatinae* at different light intensities

表1 不同光照强度下琼枝藻的明度、红绿色度和黄蓝色度
Table 1 $L^*a^*b^*$ values of *B. gelatiniae* at different light intensities

光照强度 Light intensity/lx	数量 Number	明度 L^* Lightness value	红绿色度 a^* Red-green value	黄蓝色度 b^* Yellow-blue value
1 000	15	26.14±5.10 ^a	28.24±5.98 ^a	12.49±3.68 ^a
3 000	15	37.73±6.37 ^b	16.88±2.17 ^b	29.67±3.75 ^{bc}
5 000	15	45.57±8.98 ^{cd}	6.21±3.06 ^c	26.97±4.68 ^b
7 000	15	43.31±2.56 ^{bc}	-1.29±3.99 ^d	35.01±4.51 ^d
9 000	15	50.64±4.58 ^d	-10.28±2.41 ^e	34.25±5.74 ^{cd}

注：同列不同字母间存在显著性差异 ($P<0.05$)。
Note: Values with different letters within the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

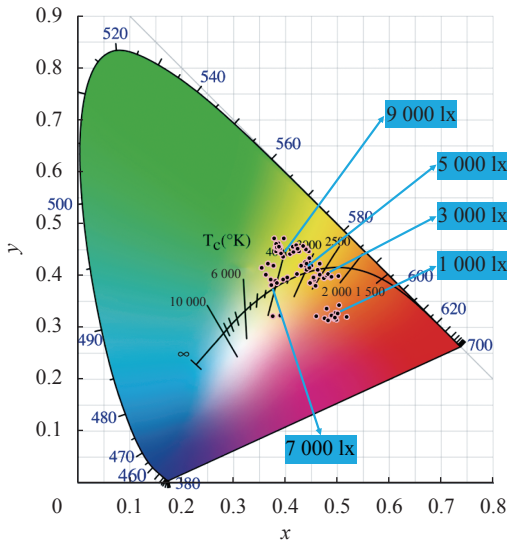


图6 不同光照强度下琼枝藻的颜色色度图分布
Figure 6 Distribution of XYZ on CIE color diagram for *B. gelatinum* at different light intensities

0.05), 与 a^* 呈极显著负相关 ($R=-0.997$, $P<0.01$)。RGR 与 L^* 呈显著正相关 ($R=0.933$, $P<0.05$), 与 b^* 呈极显著正相关 ($R=0.968$, $P<0.01$)。Chl- a 与 L^* 呈显著负相关 ($R=-0.883$, $P<0.05$), 但与 a^* 呈显著正相关 ($R=0.952$, $P<0.05$); Car 与颜色参数 $L^*a^*b^*$ 均无显著相关性。PE 和 PC 均仅与 a^* 呈显著正相关 ($P<0.05$, 表 3)。

表3 琼枝藻的颜色参数 (明度、红绿色度、黄蓝色度) 与光照强度、相对生长速率、光合色素的相关性
Table 3 Correlation between $L^*a^*b^*$ values with light intensity, RGR and photosynthetic pigment

参数 Parameter	光照强度 Light intensity	相对生长速率 RGR	叶绿素a Chl- a	类胡萝卜素 Car	藻红蛋白 PE	藻蓝蛋白 PC
明度 L^* Lightness value	0.922 [*]	0.933 [*]	-0.883 [*]	-0.389	-0.863	-0.857
红绿色度 a^* Red-green value	-0.997 ^{**}	-0.868	0.952 [*]	0.558	0.910 [*]	0.908 [*]
黄蓝色度 b^* Yellow-blue value	0.848	0.968 ^{**}	-0.712	-0.087	-0.682	-0.686

注：* 显著差异 ($P<0.05$); ** 极显著差异 ($P<0.01$)。
Note: *. Significant difference ($P<0.05$); **. Very significant difference ($P<0.01$).

表2 不同光照强度下琼枝藻颜色的色差 ΔE_{ab}
Table 2 ΔE_{ab} values of *B. gelatiniae* at different light intensities

光照强度 Light intensity/lx	1 000	3 000	5 000	7 000
3 000	23.63			
5 000	32.75	13.51		
7 000	40.92	19.75	11.22	
9 000	50.57	30.42	18.72	11.62

3 讨论

3.1 琼枝藻生长对光照强度的响应

植物通过光合作用合成有机物, 满足自身生长的能量需要, 而光照强度直接影响植物的光合生长, 在长期的进化过程中, 不同植物对光照强度有着不同的适应机制^[27-28]。光照强度过低时会导致光合作用不足, 影响藻类植物的正常生长, 过高则会导致藻体产生过多的单线态氧 (1O_2), 破坏藻体的光合色素和光合组织结构, 最终影响其正常生长^[29-31]。研究发现, 长心卡帕藻 (*Kappaphycus alvarezii*) 绿色品系和红色品系对光照强度的需求差异明显, 最适生长光照强度分别为 8 300 和 1 600 lx^[32]; 真江蓠 (*Gracilaria verrucosa*) 随光照强度的增大生长速率逐渐增加, 当光照强度为 5 000 lx 时生长速率最

高^[33]；芋根江蓠 (*G. blodgettii*) 的最适生长光照强度为 9 000 lx^[34]。本研究中琼枝藻的生长速率随光照强度的增加而增大，当光照强度达到 5 000 lx 后生长速率没有显著增加，表明琼枝藻在 5 000~9 000 lx 光照强度下均能快速生长。方哲等^[18] 研究显示光照强度为 3 000 lx 时，琼枝藻的日生长速率最高。造成这种差异的原因，可能是由于实验条件如材料处理、温度、盐度、光质等不同所致。方哲等^[18] 的研究用卤钨灯作为光源，而本研究以日光灯为光源，这也可能会影响同一光照强度下藻体的生长速率。

3.2 琼枝藻光合色素质量分数对光照强度的响应

红藻植物光合色素主要由 Chl-*a* 和藻胆蛋白组成，藻胆蛋白主要包括 PE、PC 和别藻蓝蛋白^[35]。Chl-*a* 和藻胆蛋白是光合作用的反应中心和捕光系统，藻胆蛋白捕获光能并传递给光系统 II，光能依次通过 PE、PC、别藻蓝蛋白传递至 Chl-*a*^[36]。Chl-*a* 和藻胆蛋白受环境因子尤其是光照强度的影响，在一定范围内，随着光照强度的增加，Chl-*a*、藻胆蛋白的含量下降^[37]。本研究符合这一规律，经 35 d 培养后琼枝藻在低光照强度条件下 Chl-*a*、类胡萝卜素和藻胆蛋白质量分数较高，并随着光照强度的增加而逐渐下降，这可能是琼枝藻应对不同光照强度的一种自我调节，通过增加光合色素含量，使其在光照强度不足时提高光能利用率，尽可能地满足自身生长对能量的需要。在方哲等^[18] 的研究中，Chl-*a* 和藻胆蛋白含量总体变化与本研究相似，但其 Chl-*a* 含量显著低于本研究，而藻胆蛋白尤其是 PE 含量却远高于本研究，这种差异可能是由实验材料处理方法和实验光源不同造成，也可能是提取方法不同所致。

3.3 光照强度对琼枝藻颜色的影响及相关性分析

经 35 d 培养，肉眼观察和三刺激值 XYZ 在 CIE 1931 色度图中的散点图分析均显示，随着光照强度的增加，琼枝藻由红原色经黄色而最终趋于绿原色，光照强度对藻体的颜色有显著影响，与方哲等^[18] 的研究描述基本一致。本文采用颜色参数 $L^*a^*b^*$ 和 CIE 1931 色度图分析，更精准地体现了颜色差异与光照强度的关系。相关性分析显示，光照强度与 L^* 呈显著正相关，而与 a^* 呈极显著负相关；RGR 与 L^* 、 b^* 均呈显著正相关；藻体颜色参数变化与光照强度、RGR 具有较强的相关性和规律性，可通过测定藻体的颜色参数值来分析和判断

藻体的生长状况，具有一定的准确性和科学性。颜色是色素等呈色物质的种类、数量和分布的综体现，使植物显现出不同颜色^[38-39]，这既与物种的遗传组成有关，也受光照等环境因子的影响^[40]。琼枝藻的色素和藻胆蛋白含量变化可能是其在不同光照强度下呈现出不同颜色的重要因素。本研究显示，不同光照强度下琼枝藻颜色参数 $L^*a^*b^*$ 与 Chl-*a* 以及藻胆蛋白质量分数显著相关，表现颜色的变化是琼枝藻内部色素作用的结果，通过对藻体颜色参数分析，可对藻体内色素的组成、含量等作出一定的判断。

参考文献:

- [1] 曾呈奎, 毕列爵. 藻类名词及名称 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2005: 53.
- [2] 钱树本. 海藻学 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013: 244-246.
- [3] 刘涛. 南海常见大型海藻图鉴 [M]. 北京: 海洋出版社, 2017: 88.
- [4] 匡梅, 曾呈奎, 夏邦美. 中国麒麟菜族的分类研究 [J]. 海洋科学集刊, 1999(41): 168-189.
- [5] 秦晓娟. D-半乳糖-6-硫酸化酶的分离纯化及 κ-卡拉胶改性机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014: 7-10.
- [6] 李继伟, 杨贤庆, 潘创, 等. 琼枝麒麟菜的营养成分分析与评价 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 265-269.
- [7] 邓春梅, 吴祖件, 何兰珍, 等. 碱法预处理琼枝麒麟菜提取卡拉胶的工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 178-183.
- [8] 王晨, 赵小亮, 李国云, 等. 不同来源麒麟菜多糖的提取分离和结构比较 [J]. 中国海洋药物, 2017, 36(2): 7-14.
- [9] 邹沐平, 董栋, 王怀玲, 等. 琼枝麒麟菜多糖抗呼吸道病毒活性研究 [J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 15-20.
- [10] 余华军, 伍俊, 吴尚, 等. 麒麟菜多肽对血小板聚集及角叉菜胶诱导的小鼠尾部血栓形成的影响 [J]. 解放军医学杂志, 2018, 43(2): 96-100.
- [11] SAITO H, TAMRIN M L. Antimycotic activity of seaweed extracts (*Caulerpa lentillifera* and *Eucheuma cottonii*) against two genera of marine oomycetes, *Lagenidium* spp. and *Haliphthoros* spp. [J]. Biocontrol Sci, 2019, 24(2): 73-80.
- [12] SUDIRMAN S, CHANG H W, CHEN C K, et al. A dietary polysaccharide from *Eucheuma cottonii* downregulates proinflammatory cytokines and ameliorates osteoarthritis-associated cartilage degradation in obese rats [J]. Food Funct, 2019, 10(9): 10-39.
- [13] 何翠翠, 张文, 魏志远, 等. 海南省海藻产业发展形势与对策 [J]. 热带农业科学, 2019, 39(9): 107-113.
- [14] 方哲, 刘敏, 梁磊, 等. 海水相对密度对琼枝麒麟菜的生长及其卡拉胶、色素含量的影响 [J]. 热带生物学报, 2012, 3(3): 204-207.
- [15] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 23.

- [16] 梁磊, 方哲, 黄惠琴, 等. 温度对琼枝麒麟菜生长及色素含量的影响 [J]. 海洋科学, 2014, 38(3): 87-90.
- [17] 邹沐平, 董栋, 王怀玲, 等. 琼枝麒麟菜多糖抗单纯疱疹病毒 2 型活性研究 [J]. 中国海洋药物, 2015, 34(4): 13-18.
- [18] 方哲, 刘敏, 梁磊, 等. 光照强度对琼枝麒麟菜生长及色素含量的影响 [J]. 水产养殖, 2012, 33(10): 44-46.
- [19] 杨湘勤, 丁敬敬, 黄勃, 等. 琼枝麒麟菜养殖方式及其效益分析 [J]. 渔业现代化, 2015, 42(6): 16-19.
- [20] 杨红岩, 宋新伟, 闫昊, 等. 光强、温度和 N、P 浓度对石花菜幼孢子体生长的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2020(5): 164-169.
- [21] 邵飞, 费岚, 吴海龙, 等. 环境因子及藻体密度对条斑紫菜生长与氮磷去除效率的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6164-6171.
- [22] 张建伟, 刘媛媛, 吴海龙, 等. 环境因子对瓦氏马尾藻生长及光合作用的影响 [J]. 中国水产科学, 2014, 21(6): 1227-1235.
- [23] 童立豪, 吴翔宇, 曾俊, 等. 光质对琼枝生长和生理特性的影响 [J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(6): 40-46.
- [24] PORRA R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b[J]. Photosynth Res, 2002, 73(1/2/3): 149-156.
- [25] PARSONS T R, STRICKLAND J D H. Discussion of spectrophotometric determination of marine plankton pigments, with revised equations of ascertaining chlorophyll a and carotenoids[J]. J Mar Res, 1963, 21(3): 155-163.
- [26] BEER S, ESHEL A. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae[J]. Aust J Mar Freshw Res, 1985, 36(6): 785-792.
- [27] AI X Z, GUO Y K, MA X Z, et al. Photosynthetic characteristics and ultrastructure of chloroplast of cucumber under low light density in solar-greenhouse[J]. Agric Sci Chin, 2004, 37(2): 129-135.
- [28] DASILVA M F, CASAZZA A A, FERRARI P F, et al. A new bioenergetic and thermodynamic approach to batch photoautotrophic growth of *Arthrospira (Spirulina) platensis* in different photobioreactors and under different light conditions[J]. Biore-sour Technol, 2016, 207: 220-228.
- [29] 陈伟洲, 钟志海, 刘涛, 等. 光照强度和温度对智利江蓠生长及生化组分的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 28-34.
- [30] IBRAHIM M H, JAAFAR H Z E, KARIMI E, et al. Allocation of secondary metabolites, photosynthetic capacity, and antioxidant activity of *Kacip Fatimah (Labisia pumila Benth)* in response to CO₂ and light intensity[J]. Sci World J, 2014(1): 1-13.
- [31] LOCKHART B R, GARDINER E S, HODGES J D, et al. Carbon allocation and morphology of cherrybark oak seedlings and sprouts under three light regimes[J]. Ann For Sci, 2008, 65(8): 801.
- [32] 赵素芬, 何培民. 光照强度和盐度对长心卡帕藻生长的影响 [J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 74-79.
- [33] 霍元子, 徐姗姗, 张建恒, 等. 真江蓠杭州湾海域栽培试验及生态因子对藻体生长的影响 [J]. 海洋科学, 2010, 34(8): 23-28.
- [34] 黄中坚, 宋志民, 杨晓, 等. 生态因子对芋根江蓠的生长及生化组分的影响 [J]. 南方水产科学, 2014, 10(1): 27-34.
- [35] 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.
- [36] 李映霞. 三种红藻光合作用色素系统的比较研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 2007: 2-4.
- [37] BEALE S I, APPLEMAN D. Chlorophyll synthesis in *Chlorella*: regulation by degree of light limitation of growth[J]. Plant Physiol, 1971, 47(2): 230-235.
- [38] TANAKA Y, SASAKI N, OHMIYA A. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids[J]. Plant J, 2008, 54(4): 733-749.
- [39] MILLER R, OWENS S J, RORSLETT B. Plants and colour: flowers and pollination[J]. Optics Laser Technol, 2011, 43(2): 282-294.
- [40] 李红秋, 刘石军. 光强度和光照时间对色叶树叶色变化的影响 [J]. 植物研究, 1998(2): 3-5.