

坛紫菜新品系 WO144-3 的主要经济性状分析

赵蕊^{1,2,3}, 徐燕^{1,2,3}, 许凯^{1,2,3}, 王文磊^{1,2,3}, 纪德华^{1,2,3},
陈昌生^{1,2,3}, 谢潮添^{1,2,3}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省水产生物育种与健康养殖工程研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 农业农村部东海海水健康与养殖重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 对杂交选育的坛紫菜新品系(WO144-3)的生长性状、耐高温性能、叶绿素含量、藻胆蛋白含量等指标进行了测定,并与一个野生型品系(WT)进行了对比分析。结果表明:1)经过20 d培养,WO144-3品系叶状体长度从4 cm增加到138 cm,平均日增长率为17.59%,是WT品系的1.92倍;叶状体厚度为 $(17.41 \pm 0.33) \mu\text{m}$,约为WT品系的70%。培养开始时,WO144-3品系长宽比约为WT品系的2倍,20 d后增加到5倍。但WO144-3品系的平均日增重率与WT品系没有显著差异。2)在30℃高水温培养10 d后,WO144-3品系叶状体的长度是WT品系的1.70倍;此外,高温处理对WO144-3品系的 F_v/F_m 没有显著影响,而WT品系的显著降低了59%。3)WO144-3品系的藻胆蛋白、藻红蛋白和藻蓝蛋白的含量分别为WT品系的2.05、2.74和1.42倍,但在叶绿素 a 和别藻蓝蛋白的含量上两品系没有显著差异。由此可得出:WO144-3是一个窄/薄片品系,具有生长速度快、耐受高温胁迫、藻胆蛋白含量高等优点,具备应用于生产的潜力。

[关键词] 坛紫菜;生长性状;耐高温性能;藻胆蛋白

[中图分类号] S 968.43

Analysis of Main Economic Traits of *Pyropia haitanensis* Strain WO144-3

ZHAO Rui^{1,2,3}, XU Yan^{1,2,3}, XU Kai^{1,2,3}, WANG Wenlei^{1,2,3}, JI Dehua^{1,2,3},
CHEN Changsheng^{1,2,3}, XIE Chaotian^{1,2,3}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Engineering Research Center of Aquatic Breeding and Healthy Aquaculture, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen 361021, China)

Abstract: Trait analysis is the core work of *Pyropia haitanensis* breeding. Therefore, the growth rate, high temperature resistance, chlorophyll and phycobiliprotein contents of the hybrid-selected strain of *P. haitanensis* (WO144-3) were measured in this study and compared with a wild-type strain(WT). The results suggested that: 1) After 20 days of culture, the length of thalli of WO144-3 strain increased from 4 cm to 138 cm; the thallus thickness was $(17.41 \pm 0.33) \mu\text{m}$, which was about 70% of that of WT strain. The average daily growth rate was 17.59%, which was 1.92 times that of WT. At the beginning of the incubation, the thallus length/width ratio of the WO144-3 strain was about twice that of the WT strain, increasing to 5 times after 20 d. But no significant

[收稿日期] 2021-11-16

[基金项目] 国家重点研发项目(2018YFD0901500);福建省科技重大专项(2019NZ08003);现代农业产业技术体系MDF和MARA项目(CARS-50)

[作者简介] 赵蕊(1995—),女,硕士生,从事水产生物遗传育种方向研究。通信作者:谢潮添(1977—),男,教授,博导,从事海藻生物技术方向研究。E-mail:ctxie@jmu.edu.cn

difference was found between WO144-3 and WT on the average daily weight rate. 2) The thalli length of WO144-3 strain was 1.70 times that of WT strain after cultured with high temperature at 30 °C for 10 days to simulate high temperature stress. In addition, the high temperature had no significant effect on the F_v/F_m of WO144-3, but decreased the F_v/F_m of WT by 59%. 3) The contents of phycobiliprotein, phycoerythrin and phycocyanin of WO144-3 strain were 2.05, 2.74 and 1.42 times those of WT strain, respectively. There were no significant differences between WO144-3 and WT on chlorophyll *a* and allophycocyanin contents. The above results indicated that WO144-3 was a narrow-leaf strain / thin thalli strain with the advantages of rapid growth, tolerance to high temperature stress and high content of phycobiliprotein, and had the potential to be used in aquaculture.

Keywords: *Pyropia haitanensis*; growth characters; high temperature resistance; phycobiliprotein

0 引言

坛紫菜 (*Pyropia haitanensis*) 和条斑紫菜 (*Pyropia yezoensis*) 富含营养且味道鲜美, 是紫菜属中最具经济价值的两个栽培种^[1-2]。其中, 坛紫菜是我国特有的暖温带性种类, 主要在福建、浙江南部和广东北部沿海广泛栽培, 产量约占中国紫菜总产量的 75% 左右^[3-4]。坛紫菜还富含无机化合物、蛋白质、维生素、不饱和脂肪酸和矿物质等成分, 在食品和医药等领域具有广泛的用途^[5-7]。近年来, 随着全球气候变化和坛紫菜栽培规模的日益扩大, 坛紫菜种质出现了退化现象, 主要表现为耐高温能力差、育苗效率低、生长速度慢等, 严重制约了坛紫菜栽培业的健康和可持续发展^[8]。

21 世纪以来, 坛紫菜育种工作者通过选择、诱变和杂交等育种方法, 选育出多个具有高产、耐高温和壳孢子放散量大等特点的坛紫菜新品种 (系), 其中“申福 1 号”“闽丰 1 号”“申福 2 号”“浙东 1 号”和“闽丰 2 号”已经通过全国水产原种与良种审定委员会的审定^[9-13]。但是, 由于我国海域辽阔, 各坛紫菜栽培海区的光、温度、营养盐等环境因素差异较大, 且市场需求也在不断改变, 现有品种无法满足规模庞大的坛紫菜栽培产业的需要, 急需选育出更多新品种以满足市场和生产的需求。当前市场偏好具有窄叶、薄叶、产量高、耐高温和藻胆蛋白含量高等特点的优良品系^[14-17]。为此, 本研究针对利用杂交和选育培育出的坛紫菜新品系 WO144-3, 对其生长、长宽比、耐高温和色素含量等性状进行了定量比较分析。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

WO144-3 品系由集美大学坛紫菜种质改良与应用实验室通过杂交选育获得。父本为 DH115-2 品系, 具有叶状体易成熟、窄叶、薄叶等特点; 母本为 W28 品系, 具有生长快、生长周期长等优良特性。用作对照的野生栽培品系 (WT) 来自福建省漳州市东山岛。WO144-3 品系和 WT 品系以丝状体形式保存于福建省坛紫菜种质资源库中。

1.2 实验方法

1.2.1 生长性状测定

随机挑选长度为 (4.0 ± 0.2) cm 的健康叶状体, 在 1 L 锥形瓶中进行充气培养。每瓶放两株叶状体, 培养 20 d, 培养温度为 (21 ± 1) °C, 光照强度为 $(50 \sim 60)$ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光暗周期为 12 L: 12 D。每 3 d 更换 2/3 培养液, 每 5 d 测量藻体长度、宽度和鲜重。

1.2.2 叶状体耐高温性能评价

将叶状体在 30 °C 水温下静置培养 10 d, 光照和温度条件同 1.2.1。用叶绿素荧光仪 (DIVING-PAM, Walz 公司, 德国) 对叶状体高温处理前后的最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 进行测定。实验设置 3 个生物学重复。

1.2.3 叶绿素和藻胆蛋白测定

称取叶状体组织 0.01 g (鲜重 W_F), 4 °C 下在 90% (体积分数) 丙酮中充分研磨。将研磨液转

移到 50 mL 磨口瓶中,用锡箔纸包住磨口瓶,室温下避光提取 24 h,使叶绿素充分溶于丙酮。然后用 300 目筛绢网过滤研磨液,4 °C 下离心 20 min (10 000 r/min)。取上清液定容至 50 mL,用分光光度计测定上清液的吸光度值。叶绿素 a 含量的测定方法如同文献 [18],计算公式为:

$$w(\text{Chl } a) = (A_{666} - A_{730})(10 \times V) \div 890 \times [W_F(1 - W_C)]。$$

其中: V 表示提取液的体积 (mL); $w(\text{Chl } a)$ 表示提取液中叶绿素 a 的总含量 (mg/g); A_{666} 和 A_{730} 分别表示 666 nm 和 730 nm 下的吸光度值; W_C 表示藻体含水率 (将 0.01 g 鲜重的叶状体在 100 ~ 105 °C 下烘干,称其干重来计算的含水率)。

称取叶状体组织 0.01 g (鲜重),4 °C 下用 0.05 mol/L PBS 溶液 (pH = 6.8) 将叶状体研磨充分,将研磨液放入 50 mL 磨口瓶中,用锡箔纸包住磨口瓶放入 -20 °C 冰箱冷冻,待完全冷冻后取出,放置室温下解冻,反复冻融 6 次以上,再放入 4 °C 冰箱过夜,使藻胆蛋白充分融入到 PBS 溶液中。用 300 目筛绢网过滤研磨液到 50 mL 离心管中,4 °C 下离心 20 min (10 000 r/min)。取上清液定容到 50 mL,用分光光度计测定上清液的吸光度值。藻胆蛋白含量测定的方法如同文献 [19],计算公式为:

$$w(\text{PE}) = [0.123(A_{565} - A_{730}) - 0.068(A_{615} - A_{730}) + 0.015(A_{650} - A_{730})] \times V \div [W_F(1 - W_C)]，$$

$$w(\text{PC}) = [0.162(A_{615} - A_{730}) - 0.001(A_{565} - A_{730}) - 0.098(A_{650} - A_{730})] \times V \div [W_F(1 - W_C)]，$$

$$w(\text{APC}) = [0.171(A_{650} - A_{730}) - 0.006(A_{565} - A_{730}) - 0.004(A_{615} - A_{730})] \times V \div [W_F(1 - W_C)]。$$

其中: V 表示提取液的体积 (mL); $w(\text{PE})$ 、 $w(\text{PC})$ 和 $w(\text{APC})$ 分别代表藻红蛋白、藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白的含量 (mg/g); A_{565} 、 A_{615} 、 A_{650} 和 A_{730} 代表 565 nm、615 nm、650 nm 和 730 nm 下的吸光度值。

1.3 数据分析

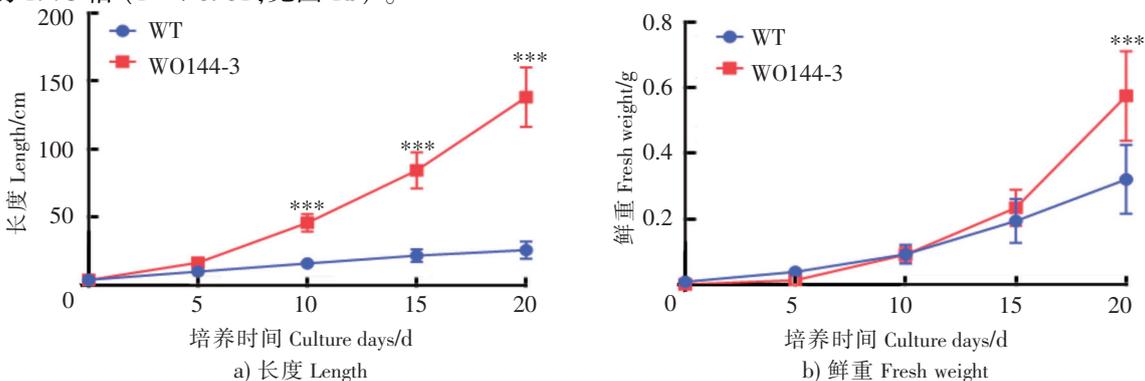
实验数据以平均值 ± 标准差 (mean ± SD) 表示,用 SPSS 22.0 进行 t 检验分析,统计结果以 $P < 0.05$ 认定为差异显著,以 $P < 0.01$ 认定为差异极显著。

2 实验结果

2.1 生长性状测定

在 20 d 的培养周期内,两个品系的叶状体长度随着培养时间的延长而逐渐增长。从培养的第 10 天开始,WO144-3 品系的长度显著大于 WT 品系 ($P < 0.01$);培养到第 20 天时,WO144-3 品系的长度可达 (138.25 ± 21.97) cm,而对照组 WT 品系的长度仅为 (26.02 ± 6.40) cm,即,WO144-3 品系的长度是 WT 品系的 5.31 倍 ($P < 0.01$,见图 1a)。

在 20 d 的培养周期内,两个品系的鲜重也随着培养时间的延长而增加。培养到第 20 天,WO144-3 品系的鲜重高达 (0.57 ± 0.14) g,WT 品系为 (0.32 ± 0.11) g,即,WO144-3 品系的鲜重是 WT 品系的 1.78 倍 ($P < 0.01$,见图 1b)。



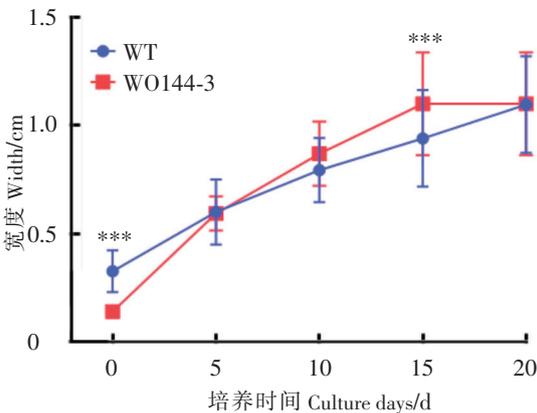
“***”表示两个品系有极显著差异 indicates a highly significant difference between the two strains

图 1 坛紫菜 WO144-3 和 WT 品系叶状体的长度和鲜重的生长曲线

Fig.1 Length and fresh weight growth curves of thalli of WO144-3 and WT strains of *P. haitanensis*
<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

培养开始时, WT 品系比 WO144-3 宽, 差异显著 ($P < 0.05$); 培养期间, WT 品系和 WO144-3 品系的宽度都显著增加; 培养到第 15 天, WO144-3 品系比 WT 品系宽, 且差异极显著 ($P < 0.01$); 培养到第 20 天, WT 品系和 WO144-3 品系的宽度都在 1.1 cm 左右, 无差异 ($P > 0.05$, 见图 2)。WO144-3 品系的初始长宽比约为 WT 品系的 2 倍; 培养到第 20 天, WO144-3 品系长宽比约为 WT 品系的 5 倍 (见表 1)。

WO144-3 和 WT 品系的叶状体中部厚度分别为 $(17.41 \pm 0.33) \mu\text{m}$ 和 $(29.64 \pm 1.34) \mu\text{m}$, WT 品系比 WO144-3 品系约厚 70% ($P < 0.01$)。在 20 d 的培养时间内, WO144-3 品系的平均日增长率是 WT 品系的 1.92 倍, 差异极显著 ($P < 0.01$); WO144-3 品系的平均日增宽率是 WT 品系的 1.67 倍, 差异显著 ($P < 0.05$); WO144-3 品系的平均日增重率略微高于 WT 品系 (见图 3)。



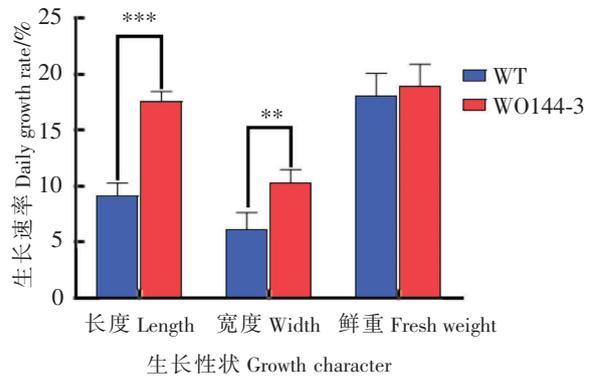
“***”表示两个品系的长度有极显著差异 indicates a highly significant difference in length between the two strains ($P < 0.01$)

图 2 坛紫菜 WO144-3 和 WT 品系叶状体的宽度生长曲线

Fig.2 Width growth curves of thalli of WO144-3 and WT strains of *P. haitanensis*

表 1 坛紫菜 WO144-3 和 WT 品系叶状体的长宽比
Tab.1 Thallus length/width ratios of WO144-3 and WT strains of *P. haitanensis*

培养天数 Culture days/d	叶状体长宽比 Thallus length: Width ratio	
	WT	WO144-3
0	14:1	30:1
5	18:1	45:1
10	21:1	78:1
15	24:1	100:1
20	25:1	129:1



“***”代表两个品系差异极显著 indicates a highly significant difference between the two strains ($P < 0.01$); “**”代表两个品系差异显著 indicates a difference between the two strains ($P < 0.05$)

图 3 坛紫菜 WO144-3 和 WT 品系在 20 d 培养期间的长度、宽度和鲜重的生长速率

Fig.3 Daily growth rate in length, width and fresh weight of WO144-3 and WT strains of *P. haitanensis* during 20 days incubation

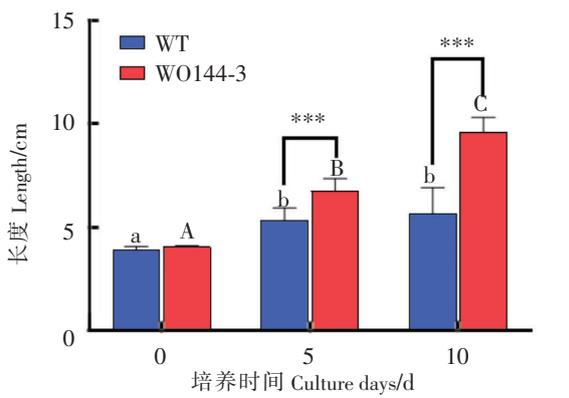
2.2 叶状体耐高温性能

在 30 °C 高温下培养 10 d, WO144-3 品系叶状体持续保持生长, 长度从 (4.0 ± 0.2) cm 显著增长至 (9.58 ± 0.74) cm, 增长了 140% ($P < 0.01$), 平均日增长率为 $(8.61 \pm 0.73)\%$; 而 WT 品系在 30 °C 高温处理 5 d 后长度不再增加 ($P > 0.05$); 高温处理 10 d 后, WO144-3 品系长度是 WT 品系长度的 1.70 倍 ($P < 0.01$, 见图 4)。

在 30 °C 高温处理 10 d 后, WO144-3 品系 F_v/F_m 没有显著下降 ($P > 0.05$), 而 WT 品系则下降了 59% ($P < 0.01$), 使得 WO144-3 品系 F_v/F_m 高于 WT 品系, 且差异极显著 ($P < 0.01$, 见图 5)。

2.3 叶状体藻胆蛋白和叶绿素 a 含量测定

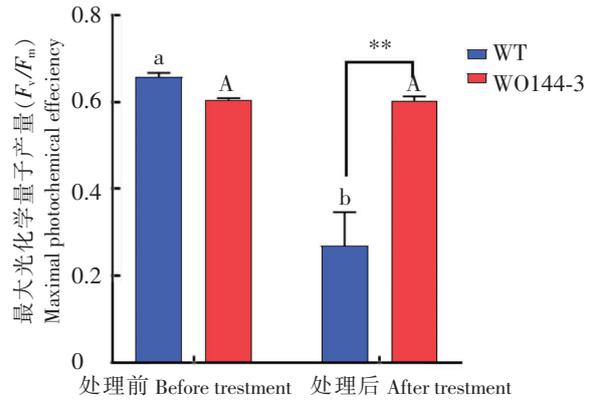
WO144-3 品系的藻胆蛋白含量为 (140.07 ± 20.50) mg/g, 是 WT 品系的 2.05 倍, 差异极显著 ($P < 0.01$); WO144-3 品系的藻红蛋白含量为 (88.58 ± 17.51) mg/g, WT 品系为 (32.33 ± 0.83) mg/g, 前者是后者的 2.74 倍 ($P < 0.01$); WO144-3 品系的藻蓝蛋白含量为 (34.60 ± 2.50) mg/g, WT 品系为 (24.33 ± 0.88) mg/g, 前者是后者的 1.42 倍 ($P < 0.05$); 两个品系的别藻蓝蛋白含量和叶绿素 a 含量无显著差异 ($P > 0.05$, 见图 6)。



“***”代表两个品系有极显著差异 ($P < 0.01$) indicates a highly significant difference between the two strains

图4 30℃高温对坛紫菜 WO144-3 和 WT 品系长度生长的影响

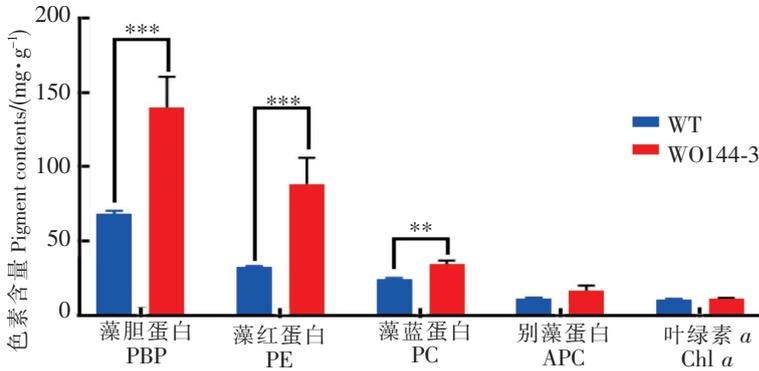
Fig.4 Effect of high temperature at 30℃ on the length growth of WO144-3 and WT strains



“**”代表两个品系存在显著差异 ($P < 0.05$) indicates a significant difference between the two strains

图5 30℃高温对WO144-3 和 WT 品系最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 的影响

Fig.5 Effect of 30℃ on the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of WO144-3 and WT strains



“***”代表两个品系差异极显著 ($P < 0.01$) indicates a highly significant difference between the two strains
 “**”代表两个品系差异显著 ($P < 0.05$) indicates a difference between the two strains

图6 坛紫菜 WO144-3 和对照 WT 品系的色素含量

Fig.6 The pigment contents of WO144-3 and WT strains of *P. haitanensis*

3 讨论

3.1 WO144-3 品系的生长性状

生长和形态特征是种质资源性状评价的基础工作^[20]。在坛紫菜栽培生产中,叶状体的生长性状对坛紫菜产量和质量有着显著影响,其中叶状体的长度、宽度、厚度、长宽比及鲜重是关键因素^[16]。与野生型相比,WO144-3 具有窄叶以及长度和鲜重增长快等特点。

为此,本研究重点将 WO144-3 与新品种“闽丰1号”(Z-26)、“闽丰2号”(Q-1)^[21]进行了对比。将长度为4 cm的叶状体培养20 d后,新品系 WO144-3 的叶状体长度平均为(138.25 ± 21.97) cm,分别是“闽丰1号”“闽丰2号”叶状体的1.46倍和1.29倍;而新品系 WO144-3 宽度平均为(1.10 ± 0.24) cm,分别是“闽丰1号”“闽丰2号”叶状体的0.52倍和0.61倍。由此可知,WO144-3 长宽比虽为“闽丰1号”“闽丰2号”的2倍以上,但其叶状体长度的增长速率与这两个新品种相比,优势更明显。近几年,坛紫菜市场偏好窄叶品系,因此 WO144-3 品系可能具有较大应用潜力。以往研究发现紫菜叶状体生长速度和长宽比无论在表型还是遗传方面都表现为显著正相关,即长宽比越大的叶状体,其生长速度越快^[14-15]。本研究结果支持这一结论。

条纹紫菜叶状体薄,生长盛期叶状体的厚度约为22~24 μm,可用于制作海苔,故具有较高经济价值^[22]。而野生坛紫菜和以往选育的坛紫菜品系的叶状体较厚,一般厚40~110 μm^[4],较少用于制作海苔。坛紫菜薄

叶品系 Z-61 的厚度为 $26 \sim 32 \mu\text{m}^{[23]}$, 而本研究中选育的新品系 WO144-3 的藻体厚度仅为 $(17.41 \pm 0.33) \mu\text{m}$, 比条斑紫菜还要薄。

3.2 WO144-3 品系耐高温性能

坛紫菜叶状体生长的最佳温度范围为 $15 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$, 其自然生长期是每年的 9 月至次年的 3 月^[24-27]。近年来, 采苗后的持续高温天气造成坛紫菜产量大幅下降, 使菜农遭受严重的经济损失^[24,28-29], 因此, 选育耐高温品系是坛紫菜产业可持续发展的迫切需求。本研究发现, 在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下培养 10 d, WO144-3 品系叶状体从 $(4.0 \pm 0.2) \text{ cm}$ 增长至 $(9.58 \pm 0.74) \text{ cm}$; 而 5 d 高温处理就导致野生品系停止生长 (见图 6)。这一点在光合作用上也有所体现, 高温培养 10 d 后, WO144-3 品系的 F_v/F_m 没有显著下降, 而 WT 品系则下降了 59% (见图 7)。耐高温品系“闽丰 1 号”在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下培养 10 d 后藻体发白, 但尚未死亡, 叶状体的长度增长率为 $(2.69 \pm 1.05)\%$ ^[20]; 而新品系 WO144-3 的长度增长率为 $(8.61 \pm 0.73)\%$, 显著高于“闽丰 1 号”。综合上述结果表明, 新品系 WO144-3 的叶状体具有良好的高温耐受性, 有望成为新一代具有高温耐受性的良种。

3.3 WO144-3 品系藻胆蛋白和叶绿素含量分析

叶绿素和藻胆蛋白是紫菜光合作用的主要色素, 也是紫菜鲜品和食品加工品色泽的决定因素^[30-34]。有贺祐胜^[35]发现, 相较于野生型品系, 红色突变体的藻红蛋白含量高、藻蓝蛋白含量低、叶绿素 a 含量差异不大, 所以藻体呈现红色。目前, 在紫菜研究中通常将藻胆蛋白和叶绿素含量作为评价紫菜品质优劣的一项重要指标。本研究发现, WO144-3 品系的藻红蛋白含量是野生品系的 2.74 倍, 非常接近“闽丰 1 号”的 $(145.64 \pm 1.71) \text{ mg/g}$, 略高于“闽丰 2 号”的 $(120.06 \pm 1.84) \text{ mg/g}^{[20]}$ 。这表明, 新品系 WO144-3 的鲜品和食品加工品的色泽均优于野生品系, 与目前广泛栽培的“闽丰 1 号”“闽丰 2 号”相当。

4 结论

本研究通过与野生品系比较, 分析了 WO144-3 品系的主要经济性状, 该品系具有窄叶、生长速度快、耐高温和藻胆蛋白含量高 等优良特性, 有望被培育成适宜生产上应用的新品种。

[参 考 文 献]

- [1] XU K, XU Y, JI D H, et al. Proteomic analysis of the economic seaweed *Pyropia haitanensis* in response to desiccation [J]. Algal Research, 2016, 19: 198-206.
- [2] ORTEGA A, GERALDI N R, ALAM I, et al. Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(9): 748-754.
- [3] 陈昌生, 谢潮添, 徐燕, 等. 农业农村部渔业渔政管理局编制. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 17-23.
- [4] 何培民, 张泽宇, 张学成, 等. 海藻栽培学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 242-244.
- [5] 张全斌, 赵婷婷, 綦慧敏, 等. 紫菜的营养价值研究概况 [J]. 海洋科学, 2005, 29(2): 69-72.
- [6] MOURITSEN O G, RHATIGAN P, PÉREZ-LLORENS J L. World cuisine of seaweeds: science meets gastronomy [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2018, 14: 55-65.
- [7] 郭雷, 王淑军, 郝倩, 等. 紫菜多糖和藻红蛋白生物活性的研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 182-185.
- [8] 丁洪昌, 严兴洪. 紫菜遗传育种研究进展 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 592-603.
- [9] 全国水产技术推广总站. 2010 水产新品种推广指南 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 42-57.
- [10] 全国水产技术推广总站. 2012 水产新品种推广指南 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 134-153.
- [11] 全国水产技术推广总站. 2014 水产新品种推广指南 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 165-181.
- [12] 骆其君, 杨锐, 林少珍, 等. 坛紫菜“浙东 1 号” [J]. 中国水产, 2015(11): 57-59.
- [13] 陈昌生, 谢潮添, 徐燕, 等. 坛紫菜“闽丰 2 号” [J]. 中国水产, 2021(8): 92-98.
- [14] MA Y C, HE L W, HUAN L, et al. Characterization of a high-growth-rate mutant strain of *Pyropia yezoensis* using phys-

- iology measurement and transcriptome analysis [J]. Journal of Phycology, 2019, 55(3): 651-662.
- [15] WU C Y, LIN G H. Progress in the genetics and breeding of economic seaweeds in China [J]. Hydrobiologia, 1987, 151-152(1): 57-61.
- [16] 徐燕. 坛紫菜遗传连锁图谱的构建及重要性状基因的 QTL 定位 [D]. 厦门: 厦门大学, 2010.
- [17] DING H C, LV F, WU H X, et al. Selection and characterization of an improved strain produced by inter-species hybridization between *Pyropia* sp. from India and *Pyropia haitanensis* from China [J]. Aquaculture, 2018, 491: 177-183.
- [18] JENSEN A. Analysis of chemical constituents 6: chlorophylls and carotenoids [M]. London: Cambirdge University Press, 1978: 59-70.
- [19] 高洪峰. 不同生长期坛紫菜中藻胆蛋白的含量变化 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 645-648.
- [20] 昌晶. 坛紫菜叶状体长度性状的 BSR 分析及相关 SNP 位点开发 [D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- [21] 梁艳. 坛紫菜新品系纯系主要经济性状的研究及 DNA 序列分析 [D]. 厦门: 集美大学, 2009.
- [22] 张美如, 陆勤勤, 陈淑吟, 等. 条斑紫菜品系评价方法的探讨 [J]. 水产科技情报, 2011, 38(6): 273-280, 283.
- [23] 陈昌生, 梁艳, 徐燕, 等. 坛紫菜薄叶新品系选育及经济性状的比较 [J]. 渔业科学进展, 2009, 30(2): 100-105.
- [24] 陈昌生, 纪德华, 谢潮添, 等. 坛紫菜耐高温品系选育及经济性状的初步研究 [J]. 海洋学报 (中文版), 2008, 30(5): 100-106.
- [25] 张元, 谢潮添, 陈昌生, 等. 高温胁迫下坛紫菜叶状体的生理响应 [J]. 水产学报, 2011, 35(3): 379-386.
- [26] CARRATU L, FRANCESCHELLI S, PARDINI C L, et al. Membrane lipid perturbation modifies the set point of the temperature of heat shock response in yeast [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(9): 3870-3875.
- [27] 陈伟洲, 许俊宾, 吴文婷, 等. 三种紫菜叶状体对高温胁迫的生理响应 [J]. 热带海洋学报, 2015, 34(1): 49-55.
- [28] 严兴洪, 马少玉. 坛紫菜抗高温品系的筛选 [J]. 水产学报, 2007, 31(1): 112-1191.
- [29] SAITOH M, ARAKI S, SAKURAI T, et al. Variations in contents of photosynthetic pigments, total nitrogen, total free amino acids and free sugars in dried lavers obtained at different culture grounds and harvesting times [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1975, 41(3): 365-370.
- [30] 董宏坡, 左正宏, 王重刚, 等. 福建省平潭海区坛紫菜品质性状的分析 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2004, 43(5): 693-696.
- [31] ARUGA Y. Color and the pigments of *Porphyra yezoensis* [J]. Iden, 1980, 34(9): 8-13.
- [32] 丁洪昌, 严兴洪. 坛紫菜杂交重组品系的选育与特性分析 [J]. 水产学报, 2015, 39(9): 1359-1367.
- [33] 姜红霞, 汤晓荣. 红藻育种研究进展 [J]. 海洋科学, 2003, 27(6): 25-30.
- [34] 连跃斌, 许凯, 王文磊, 等. 坛紫菜色素突变体产生原因的初步研究 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2020, 25(3): 161-170.
- [35] 有贺祐胜, 于廷林. 条斑紫菜 (*Porphyra yezoensis*) 的颜色和色素 [J]. 国外水产, 1982(4): 8-13.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)