

高温静水胁迫培养对坛紫菜品质的影响

李 兵 徐 燕 纪德华 张 元 谢潮添*

(集美大学水产学院, 厦门 361021)

摘 要 以坛紫菜耐高温型品系 Z-61 F₄ 代叶状体为实验材料, 野生型坛紫菜(WT)叶状体为对照, 研究了常温(21℃)静水和高温(30℃)静水培养不同天数(0、2、4、6、8、10 d)后, 坛紫菜藻体中光合色素含量、粗蛋白含量、总氨基酸含量和4种主要呈味游离氨基酸含量等品质指标的变化情况。结果表明, 常温静水培养对坛紫菜耐高温型品系的品质没有显著影响, 甚至短时间的常温静水培养还有利于提高野生型品系藻体的品质; 但高温静水培养会显著降低耐高温型品系和野生型品系的品质, 只是耐高温型品系的品质下降速度要慢于野生型。此外, 本研究还发现, 耐高温型坛紫菜品系还可以通过调节藻体细胞内别藻蓝蛋白(APC)和游离氨基酸的含量来增强自身对高温胁迫的抵抗能力。本研究结果为全面认识坛紫菜的抗逆性机理提供了基础资料, 同时也为后续坛紫菜抗逆新品种的选育提供了理论指导。

关键词 坛紫菜 高温静水胁迫 品质 抗逆性

中图分类号 S967.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)03-0104-07

Effects of high temperature and non-aeration stress on the quality of *Porphyra haitanensis*

LI Bing XU Yan JI De-hua ZHANG Yuan XIE Chao-tian*

(College of Fisheries, Jimei University, Xiamen 361021)

ABSTRACT *Porphyra haitanensis* is an economically important marine crop in southern China. Due to global warming, farming of *P. haitanensis* was seriously affected by the increasing water temperature. In this study, the gametophytic blades of an F₄ high temperature tolerance line (Z-61) and wild-type line (WT) were grown at normal temperature (21℃) and high temperature (30℃) under non-aerated condition for 0, 2, 4, 6, 8 and 10 days. Changes in four quality indices were measured, including contents of pigment, crude protein, total amino acids and free amino acids. The results showed that the quality of Z-61 was not significantly affected by the normal temperature and non-aeration. The quality of wild-type strain was even improved after a short-term cultivation under normal temperature and non-aeration, but the quality of Z-61 and wild-type strains were seriously affected by the high temperature and non-aeration

国家自然科学基金(41176151)、十二五“863”计划(2012AA100811)、公益性行业(农业)科研专项(200903030)、海洋公益性行业科研专项(201105008;201105023)、福建省杰出青年基金项目(2010J06016)、福建省教育厅新世纪优秀人才项目(JA10186)和福建省科技重大专项(2011NZ0001)共同资助

* 通讯作者。E-mail: ctxie@jmu.edu.cn, Tel: (0592)6182643

收稿日期:2012-05-03;接受日期:2012-07-03

作者简介:李 兵(1989-),男,硕士研究生,主要从事海藻生物技术的研究。E-mail:redstonex668@163.com, Tel: (0592)6182643

stress. Furthermore, the results also indicated that the Z-61 could enhance its ability of high temperature tolerance by increasing the content of allophycocyanin (APC) and free amino acids. Our results would be helpful for understanding the mechanism of high temperature tolerance of *P. haitanensis*.

KEY WORDS *Porphyra haitanensis* High temperature and stress Quality Stress tolerance

坛紫菜 *Porphyra haitanensis* 是我国紫菜人工栽培的两个主要种类之一,原产于我国福建沿海,是我国特有的暖温带性种类。自 20 世纪 60 年代全人工栽培取得成功以来,坛紫菜的栽培面积不断扩大,目前已成为我国南方沿海海水养殖的主要对象之一,其产量占全国紫菜总产量的 75% 以上(Blouin *et al.* 2010)。坛紫菜是一种喜风浪的藻类,其自然生长期是每年的 9 月~翌年的 3 月,生长的适宜温度为 16~25℃。近年来,随着全球气候变暖,福建、浙江海域每年 9~10 月的高温回暖及伴随的无风微浪天气是养殖过程中紫菜减产的关键因素,水温过高致使紫菜幼苗或成菜烂菜、减产,严重威胁着坛紫菜栽培业的持续发展(张元等 2011)。为使坛紫菜在高温逆境下仍能正常健康成长,减轻高温逆境给藻农以及当地产业造成的损害,国内多个课题组已经选育出了多个具有明显耐高温性状的坛紫菜新品种(系)(何培民等 2003;严兴洪等 2007;陈昌生等 2008),部分新品种(系)已经在生产上得到了广泛应用。

紫菜品质性状的主要评价指标是色泽、口感和营养价值(孙彬等 2007),其中决定色泽的主要因子是存在于藻体内的 4 种主要光合色素,即藻红蛋白(Phycocerythrin, RPE)、藻蓝蛋白(Phycocyanin, RPC)、别藻蓝蛋白(Allophycocyanin, APC)和叶绿素 a(Chlorophyll a, Chl-a)的含量(徐燕等 2007);口感则主要由游离的呈味氨基酸(Ala、Asp、Glu、Gly)的组成与含量来决定(Harad *et al.* 1990);而藻体细胞中粗蛋白含量则是衡量紫菜营养价值的重要指标之一(孙彬等 2007)。因此紫菜的光合色素、蛋白质和氨基酸含量是反映紫菜品质优劣的最为重要的指标。目前,国内外对野生型紫菜和选育紫菜品系的品质性状进行了大量的比较研究(陈必链等 2001;董宏坡等 2004;纪德华等 2011;马家海等 1998;Niwa *et al.* 2009),但对高温静水胁迫条件对紫菜品质性状的影响研究则涉及很少。因此本研究以本课题组选育、生产性状经过大田生产验证的坛紫菜耐高温纯系(Z-61)F₄叶状体(陈昌生等 2008)和选自福建省平潭牛山岛的野生型坛紫菜纯系(WT)作为实验材料,研究其在高温(30℃)静水胁迫条件下与常温(21℃)静水下培养不同天数(0、2、4、6、8、10d)后其各项品质指标的变化情况,以期为全面认识坛紫菜的抗逆性机理提供基础资料,同时也为后续坛紫菜抗逆新品种的选育提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

供试材料取自福建省坛紫菜种质资源库通过人工杂交选育、生产性状经过大田生产验证的耐高温纯系 Z-61 F₄叶状体(陈昌生等 2008),以选自福建省平潭牛山岛的野生型坛紫菜纯系(WT)作为对照。实验时间为 2011 年 9 月~12 月。

1.2 实验方法

1.2.1 实验材料的处理

将坛紫菜耐高温纯系 Z-61 F₄叶状体与野生型坛紫菜纯系叶状体分别置于加有 700ml PES 培养液的 1L 锥形瓶中培养,培养条件为:温度 21±0.5℃,光照强度 2 000~3 000lx,光照周期 12L:12D,充气,隔 3d 更换 1 次培养液。待叶状体长至约 15±2cm 时选取叶面平滑、色深、有光泽、无斑点烂洞、处于生长旺盛期的优质完整藻体分成两份:一份置于 30±0.5℃的恒温光照培养箱中进行高温胁迫处理,培养条件为光照强度 2 000~

3 000lx,光照周期 12L:12D,不充气(高温静水);另一份则置于 $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的恒温光照培养箱中不充气培养(常温静水)。每个锥形瓶(1L)含 700ml PES 培养液,培养 5 株藻体。在培养的 0、2、4、6、8 和 10d 6 个时间节点分别取样用于各项品质指标的测定,其中野生型藻体 30°C 高温胁迫组由于藻体只能正常生长 4d,因此取样时只取 0、2、4d 3 个处理时间培养的藻体。

1.2.2 藻胆蛋白含量的测定

藻胆蛋白(Phycobiliprotein, Phy)含量测定参考高洪峰(1993)的方法,略有改动。精确称取 0.010g 藻体 3 份,放在研磨管中,加入适量的 0.05mol/L 磷酸钠缓冲液浸泡 3min,研磨至充分,将提取液放入 -20°C 下反复冻融 6 次,过滤离心取上清液定容至 50ml,摇匀后静置至室温,使用紫外分光光度计(Varian Carry 50)分别于 565nm、615nm、650nm 波长下测定其 OD 值。计算公式为:

$$C_{\text{RPE}} = 0.123A_{565} - 0.068A_{615} + 0.015A_{650} \quad (1)$$

$$C_{\text{RPC}} = 0.162A_{615} - 0.001A_{565} - 0.098A_{650} \quad (2)$$

$$C_{\text{APC}} = 0.171A_{650} - 0.006A_{565} - 0.004A_{615} \quad (3)$$

式中, C_{RPE} 、 C_{RPC} 、 C_{APC} 分别为 R-藻红蛋白、R-藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白的含量。

1.2.3 叶绿素 a 含量的测定

叶绿素 a(Chl-a)含量参考 Jensen(1978)的方法,精确称取 0.010g 藻体 3 份,加入适量 90% 的丙酮水溶液充分研磨,提取液避光放置 24h 提取叶绿素,过滤离心取上清液定容至 40ml,使用紫外分光光度计分别于 666nm、730nm 波长下测定其 OD 值。计算公式为:

$$C = (\text{OD}_{666} - \text{OD}_{730}) \times 10V / 890 \quad (4)$$

式中, V 为提取液的体积(ml), C 为体积 V 中的叶绿素 a 总含量(mg)。

1.2.4 粗蛋白含量的测定

采用凯式定氮法(王明霞 1991)测定,测定结果的计算公式为:

$$\text{粗蛋白含量(mg/g)} = (V_1 - V_2) \times C \times 0.014 \times K / W \times 1000 \quad (5)$$

式中, V_1 为滴定样品时消耗盐酸标准液的体积(ml), V_2 为滴定空白时消耗盐酸标准液的体积(ml), C 为盐酸标准液的浓度(mol/L), K 为 6.25,即氮换算成粗蛋白质的系数, W 为样品干重(g), 0.014 为氮的毫克当量数。

1.2.5 氨基酸含量的测定

总氨基酸含量(TAA)测定参照 GB/T 5009.124-2003 的方法水解后(中国国家标准化管理委员会 2003),使用日立 L-8900 型高速氨基酸自动分析仪进行测定。游离氨基酸含量(FAA)测定参照文献(周国兰等 2007)中的方法对坛紫菜 FAA 进行提取,并用日立 L-8900 型高速氨基酸自动分析仪进行测定。

1.2.6 数据统计分析

应用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对试验数据进行统计分析,并采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据间的差异。

以上实验均进行 3 次生物学重复和 3 次技术重复。

2 结果

2.1 高温胁迫不同时间水平下叶状体主要色素含量的变化

图 1 是常温静水和高温静水培养不同时间水平下坛紫菜藻体各光合色素含量的测定结果。由图 1 可以看出,常温静水条件下培养 10d 的过程中,耐高温型品系各光合色素的含量波动变化,但整体表现为上升趋势;而野生型品系除 RPC 含量表现为波动变化外,其余色素含量均在培养的前 4d 内显著升高($P < 0.05$),4d 后开始持续下降,说明耐高温型品系在正常温度下静水培养仍能保持良好的生长状态,而野生型品系则只能在常温静水培养的初期保持良好生长状态,静水培养的时间超过 4d 就会影响藻体的品质。在高温静水的培养条件下,无论耐高温型品系,还是野生型品系,各光合色素含量均显著降低(耐高温型品系的 APC 含量例外),但野生型

品系各项指标的下降速度均要快于耐高温型品系。

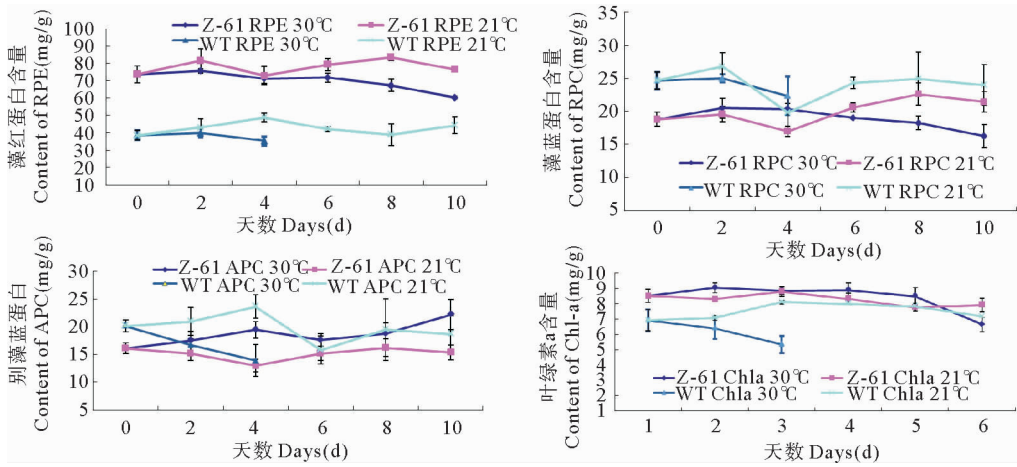


图1 坛紫菜叶状体在不同温度、不同处理时间下主要色素含量的变化

Fig. 1 Pigment content of *P. haitanensis* gametophytic blades at different temperature and treating time

2.2 高温胁迫不同时间水平下叶状体粗蛋白含量的变化

图2是常温静水和高温静水培养不同时间水平下坛紫菜藻体粗蛋白含量的测定结果。由图2可以看出,常温静水条件下培养10d的过程中,耐高温型品系的粗蛋白含量没有发生显著变化($P>0.05$),但野生型品系的粗蛋白含量在培养的前8d内显著升高($P<0.05$),8d后粗蛋白含量骤然下降与初始值相当($P>0.05$),这可能与常温静水培养早期,野生型坛紫菜的各项生理活动减弱,自身消耗的蛋白质含量减少,而耐高温型品系仍能保持活跃的生理活动有关,由此说明,短时间(10d)内的静水培养对紫菜的营养价值没有影响($P>0.05$)。高温静水培养条件下,耐高温型品系的粗蛋白含量总体表现为下降的趋势,但变化不显著($P>0.05$),但野生型品系的粗蛋白含量则发生了显著下降,培养4d后,其藻体细胞的粗蛋白含量就下降为初始值的56.6%,说明高温静水胁迫对耐高温型品系的营养价值影响不大,但会严重影响野生型品系的营养价值。

2.3 高温胁迫不同时间水平下叶状体总氨基酸含量的变化

图3是常温静水和高温静水培养不同时间水平下坛紫菜藻体总氨基酸含量的测定结果。由图3可以看出,在常温静水培养10d的过程中,耐高温型品系的总氨基酸含量没有发生显著变化($P>0.05$);野生型品系在常温静水培养的初期($<4d$)总氨基酸含量显著上升($P<0.05$),但随着培养时间的继续延长,在培养到第6天时,总氨基酸含量又发生了显著下降($P<0.05$),说明常温静水培养不会影响耐高温型品系的总氨基酸含量,但长时间($>4d$)的静水培养会使野生型品系的总氨基酸含量显著下降。高温静水培养条件下,耐高温型品系在短时间内($<4d$)总氨基酸含量不会发生显著变化($P>0.05$),但随着胁迫时间的继续延长($>4d$),总氨基酸含量显著下降($P<0.05$);而野生型品系在高温胁迫一开始,总氨基酸含量即发生显著下降($P<0.05$),在胁迫培养4d后,其藻体的总氨基酸含量就下降为初始值的62.6%,说明高温静水培养条件会使紫菜的总氨基酸发生显著下降。

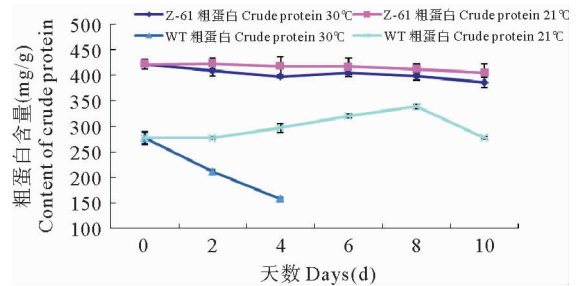


图2 坛紫菜叶状体在不同温度、不同处理时间下粗蛋白含量变化

Fig. 2 Crude protein content of *P. haitanensis* gametophytic blades at different temperature and treating time

2.4 高温胁迫条件下坛紫菜叶状体 4 种呈味氨基酸含量的变化

天冬氨酸 (Asp)、谷氨酸 (Glu)、甘氨酸 (Gly) 和丙氨酸 (Ala) 是紫菜的 4 种主要呈味氨基酸, 紫菜的风味在很大程度上决定于这 4 种氨基酸的含量。表 1 是常温静水和高温静水培养不同时间水平下, 坛紫菜耐高温型品系和野生型品系藻体 4 种呈味氨基酸含量的测定结果。由表 1 可以看出, 常温静水培养 10d 的过程中, 耐高温型品系 4 种呈味氨基酸的含量没有发生显著变化 ($P>0.05$), 但野生型品系的含量却发生了显著上升, 说明常温静水培养不会影响耐高温型品系的风味, 但会提升野生型品系的风味。高温静水培养条件下, 耐高温型品系在培养的早期 ($<8d$), 4 种呈味氨基酸的含量显著上升, 但胁迫时间继续延长, 到第 10 天时, 则会使含量骤然下降; 而野生型品系在高温胁迫的前 2d 内, 4 种呈味氨基酸的含量也会显著上升, 但随胁迫时间继续延长, 从第 4 天开始, 含量即开始显著下降, 说明短时间的高温胁迫会提升紫菜的风味, 但胁迫时间过长则会影响紫菜的风味, 但不同品系风味发生逆转的胁迫时间点存在差异。

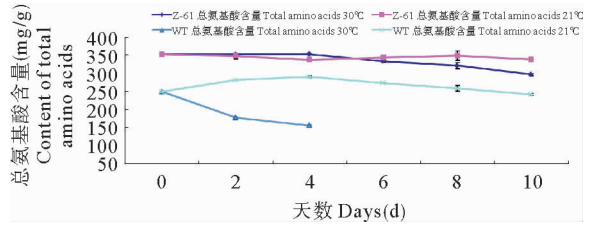


图 3 坛紫菜叶状体在不同温度、不同处理时间下总氨基酸的含量

Fig. 3 Total amino acids content of *P. haitanensis* gametophytic blades at different temperature and treating time

表 1 坛紫菜叶状体在不同温度、不同处理时间下 4 种呈味氨基酸的含量

Table 1 Content of four amino acids in gametophytic blades of *P. haitanensis* at different temperature and treating time ($X\pm SD$, mg/g)

品系 Lines	温度 Temperature(°C)	氨基酸 AA	处理时间 Treating time(d)						
			0	2	4	6	8	10	
Z-61	30	Asp	1.27±0.0	1.52±0.01	2.31±0.03*	2.45±0.05*	2.83±0.01**	1.53±0.03	
		Glu	18.38±0.07	18.14±0.08	16.33±0.07	21.23±0.11*	21.62±0.14*	14.86±0.87*	
		Gly	0.52±0.00	0.65±0.00	0.28±0.03**	0.97±0.03**	0.53±0.01	0.56±0.02	
		Ala	3.37±0.04	4.46±0.05	5.76±0.06**	3.81±0.03	6.47±0.03**	4.04±0.27	
		Total	29.89±0.26	31.57±0.13	32.37±0.25	40.27±0.28**	43.25±0.31**	29.86±1.58	
Z-61	21	Asp	1.27±0.05	1.54±0.01	1.97±0.02	1.43±0.01	1.67±0.00	1.17±0.01	
		Glu	18.38±0.07	17.62±0.02	19.60±0.08	18.84±0.03	16.54±0.04	15.69±0.31	
		Gly	0.52±0.00	0.74±0.00	0.78±0.01*	0.82±0.01*	0.71±0.01	0.66±0.01	
		Ala	3.37±0.04	3.99±0.04	4.58±0.06*	3.50±0.01	4.42±0.02	3.33±0.10	
		Total	29.89±0.26	32.09±0.21	35.45±0.13*	31.19±0.26	32.38±0.26	31.24±0.53	
野生型 Wild-type	30	Asp	2.80±0.25	4.44±0.03**	4.09±0.15**	—	—	—	
		Glu	2.92±0.35	4.92±0.02**	4.77±0.12**	—	—	—	
		Gly	1.48±0.09	2.04±0.02*	1.98±0.05*	—	—	—	
		Ala	3.31±0.57	5.27±0.05**	4.88±0.17**	—	—	—	
		Total	24.88±0.22	37.74±0.15**	35.58±0.14**	—	—	—	
野生型 Wild-type	2	Asp	2.80±0.25	3.14±0.02	3.24±0.23*	3.03±0.26	3.52±0.07**	3.73±0.04**	
		Glu	2.92±0.35	3.43±0.03*	3.51±0.28*	4.09±0.17**	3.63±0.06*	3.83±0.08**	
		Gly	1.48±0.09	1.65±0.01	1.69±0.02	1.16±0.02	1.86±0.04**	2.01±0.02**	
		Ala	3.31±0.57	4.13±0.02	4.28±0.38*	5.17±0.29**	4.62±0.12**	5.02±0.04**	
		Total	24.88±0.22	28.15±0.12	29.04±0.22*	30.29±0.24**	29.83±0.79*	31.35±0.27**	

注: * 表示与 0d 相比差异显著 $P<(0.05)$, ** 表示差异极显著 $P<(0.01)$

Note: * shows significant difference ($P<0.05$) with the control (0d), and ** shows extremely significant difference ($P<0.01$) with the control (0d)

3 讨论

3.1 不同胁迫条件对坛紫菜品质性状的影响

光合色素、粗蛋白和游离氨基酸含量是衡量紫菜品质优劣的主要指标(孙 彬等 2007;徐 燕等 2007;Harad *et al.* 1990)。从本研究耐高温型品系和野生型品系在不同胁迫条件下各项指标的测定结果中可以看出,耐高温型品系在常温静水培养条件下,除光合色素含量显著上升外,其余3个指标均没有发生显著变化;但在高温静水10d的培养过程中,除呈味氨基酸含量没有显著变化外,其余3个品质指标均发生了显著下降,说明静水培养条件对坛紫菜耐高温型品系的品质没有显著影响,但高温胁迫会显著影响耐高温型品系的品质。野生型品系在常温静水培养的初期,4个品质指标均显著上升,但随着静水培养时间的持续,除游离氨基酸含量外的其余3个指标均又发生了显著下降;在高温静水条件下,4个指标均显著下降,说明短时间的常温静水培养有利于提高野生型品系的品质,这可能与坛紫菜自身为喜风浪的藻类,在常温静水条件下,其藻体的各项生理活动下降,自身的能量和营养消耗显著降低有关,但长时间的常温静水培养或者高温静水培养都会显著降低野生型品系的品质。周巍巍等(2011)在低氮、磷胁迫条件对坛紫菜品质的影响研究中也发现,低氮、磷胁迫培养会显著降低坛紫菜的品质。因此,在紫菜栽培实践中,尤其是采收前,应特别注意高水温和低氮、磷对紫菜品质的影响。紫菜栽培过程中如果出现较长时间的高温天气,就应将网帘收取阴干后置于冷库中保存(冷藏网),以避过不良海况对紫菜品质的影响。

此外,从本研究的比较结果也可以看出,坛紫菜耐高温型品系的光合色素、粗蛋白和游离氨基酸含量均显著高于野生型品系(图1~图3、表1),且在高温静水条件下,各项指标的下降幅度也要低于野生型,说明耐高温型品系的品质要显著优于野生型。因此,可以推测品质优可能也是耐高温型品系具有明显耐高温(抗逆)性状的可能原因之一。李英枫等(2007)在对水分胁迫抗性能力不同的3种小麦品系品质性状的比较中也发现,抵抗水分胁迫能力较强的强筋小麦籽粒,其品质极显著高于抵抗力较弱的中、弱筋小麦籽粒品质。因此在育种过程中可以用品质高低作为选育坛紫菜抗逆性品系的一个初级指标。

3.2 坛紫菜对高温胁迫的响应

植物在长期的生命进化过程中,通过不断发生的遗传变异和自然选择,发展出了各种应对环境的适应机制,当遭受逆境胁迫时,就会启动一系列的生理响应过程以抵抗环境的胁迫作用,这一过程是一个庞大且复杂的系统,包括了大量的调节和反馈机制(Moreno-Risueno *et al.* 2010)。张 元等(2011)在高温胁迫条件下坛紫菜各项生理指标的测定中发现,耐高温型品系在高温胁迫条件下能同时启动抗氧化系统和渗透压调节系统来抵抗高温胁迫产生的各种自由基对藻体细胞的危害,从而使紫菜藻体表现出明显的耐高温性状。本研究结果进一步发现,耐高温型品系还可以通过调节细胞内一些关键生化组分的含量及比例来应对高温胁迫条件对自身的伤害,如APC和游离氨基酸。本研究在高温静水的胁迫条件下,同其他指标的变化趋势不同,耐高温型品系的APC和4种主要呈味氨基酸的含量均显著升高,这可能与藻体细胞对高温胁迫的应激反应有关,即耐高温型品系在遭受高温胁迫时通过提高藻体细胞中的APC含量和游离氨基酸来增强清除自由基的能力,从而增强自身的耐高温能力。Tapia等(1999)的研究结果表明,APC具有抑制单线态氧和清除自由基的能力;周站平等(2005)认为,钝顶螺旋藻体内APC对光能的吸收和传递完全依赖于其高级结构,天然状态中的APC在光照条件下具有生成自由基的功能,而当藻体遭遇逆境胁迫时,APC的脱辅基蛋白部分或完全变形,多肽链松散解开,藻蓝胆素外露,导致APC几乎完全丧失了吸收光能和传递能量的能力,但却大大增强其清除自由基的能力。Pintero等(2001)在钝顶螺旋藻抗氧化能力的研究中也指出,藻胆蛋白的含量越多,纯度越高,藻体的抗氧化能力越强。而对于游离氨基酸,马向丽等(2005)在研究低温胁迫对黑麦草幼苗的影响中发现,游离氨基酸中的精氨酸及其代谢产物能减缓低温胁迫造成的膜相对透性增加,促进脯氨酸含量累积,从而提高植物的抗逆性。谭 勇等(2006)在各种营养因子对膜荚黄芪幼苗根系活力的影响研究中也发现,膜荚黄芪幼苗可以通过提高体内游离氨基酸含量来增强对营养胁迫逆境的适应能力。李晓林等(2009)的测定结果也表明,小麦植

株在胁迫条件下大多数游离氨基酸含量均上升。本实验结果与此是相符的。

参 考 文 献

- 马向丽,魏小红,龙瑞军,崔文娟,万引琳. 2005. 外源一氧化氮提高一年生黑麦草抗冷性机制. 生态学报,25(6):1 269-1 274
- 马家海,张礼明,吉传礼,袁明,陈胜贵,王汉青,沈旺,沈怀舜,孙国铭,顾善邦,沙锦荣,陈昌钰. 1998. 条斑紫菜冷藏网实验及其产品质量分析. 水产学报,22(增刊):66-71
- 王明霞. 1991. 改良式微量凯氏定氮蒸馏器测定粗蛋白. 生物学杂志,3:24-25
- 中国国家标准化管理委员会. 2003. GB/T 5009.124-2003 食品中氨基酸的测定. 北京:中国标准出版社
- 孙彬,黄健,马家海,宋武林,谢程亮. 2007. 坛紫菜品质分析. 见:中国海洋湖沼学会藻类学分会第七届会员大会暨第十四次学术讨论会论文摘要集
- 纪德华,谢潮添,史修周,徐燕,张元. 2011. 福建沿海野生坛紫菜主要品质性状分析. 集美大学学报(自然科学版),16(6):401-406
- 严兴洪,马少玉. 2007. 坛紫菜抗高温品系的筛选. 水产学报,31(1):112-119
- 李英枫,张薇. 2007. 水分胁迫对不同筋型小麦籽粒品质性状的影响. 中国农学通报,23(1):115-117
- 李晓林,孙海燕,魏文变,李友勇. 2009. 氨基酸胁迫对小麦种子幼苗生长和体内游离氨基酸水平的影响. 中国农学通报,25(24):56-61
- 何培民,吴维宁. 2003. 条斑紫菜抗高温和快速生长细胞系 HB 的建立及栽培. 实验生物学报,36(3):191-196
- 张元,谢潮添,陈昌生,纪德华,周巍巍. 2011. 高温胁迫下坛紫菜叶状体的生理响应. 水产学报,35(3):379-386
- 陈必链,林跃鑫,黄健. 2001. 坛紫菜的营养评价. 中国海洋药物,80(2):51-53
- 陈昌生,纪德华,谢潮添,徐燕,梁艳,郑永健,史修周,王凤霞,赵玲敏. 2008. 坛紫菜耐高温品系选育及经济性状的初步研究. 海洋学报,30(5):100-106
- 周国兰,刘晓霞,何萍,郑文莉. 2007. 茚三酮比色法测定茶叶中游离氨基酸总量方法的疑点研究. 贵州茶叶,1:24-29
- 周站平,刘鲁宁,陈秀兰,张照颖,张玉忠,周百成. 2005. 光照、变性剂和 pH 对钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)别藻蓝蛋白(APC)抗氧化活性的影响. 海洋与湖沼,36(2):179-185
- 周巍巍,谢潮添,陈昌生,纪德华,张元. 2011. 低氮(N)、磷(P)胁迫对坛紫菜叶状体生理生化特征的影响. 水产学报,35(4):543~550
- 徐燕,谢潮添,陈昌生,柳佩娟. 2007. 坛紫菜品系间杂交分离色素突变体及其特性的初步研究. 中国水产科学,14(3):489-495
- 高洪峰. 1993. 不同生长期坛紫菜中藻胆蛋白的含量变化. 海洋与湖沼,24(6):645-648
- 董宏坡,左正宏,王重刚,王诚,陈奕欣. 2004. 福建省平潭海区坛紫菜品质性状的分析. 厦门大学学报(自然科学版),43(5):693-696
- 谭勇,梁宗锁,王渭玲,段琦梅,曹让. 2006. 氮、磷、钾营养对膜荚黄芪幼苗根系活力和游离氨基酸含量的影响. 西北植物学报,26(3):478-483
- Blouin NA, Brodie JA, Grossman AC and 2 others. 2010. Porphyra: a marine crop shaped by stress. Trends in Plant Science 16(1): 29-37
- Harad K, Osumi Y, Fukuda N and 2 others. 1990. Changes of amino acid compositions of 'Nori', *Porphyra* spp. during storage. Bull Jap Soc Sci Fish 56(4): 607-612
- Jensen A. 1978. Physiological and Biochemical Methods. Chlorophylls and Carotenoids. London: Cambridge Univ. Press 59-70
- Moreno-Risueno MA, Busch W, Benfey PN. 2010. Omics meet networks-using systems approaches to infer regulatory networks in plants. Current Opinion in Plant Biology 13(2): 126-131
- Niwa K, Furuita H, Yamamoto T. 2009. Changes of growth characteristics and free amino acid content of cultivated *Porphyra yezoensis* Ueda (*Bangiales rhodophyta*) blades with the progression of the number of harvests in a nori farm. J Appl Phycol 20(5):687-693
- Pinero Estrada JE, Bermejo BP, Villar del Fresno AM. 2001. Antioxidant activity of different fractions of *Spirulina platensis* protein extract. Farmaco 56(5-7):497-500
- Tapia G, Galetovic A, Lemp E and 2 others. 1999. Singlet oxygen mediated photobleaching of the prosthetic group in hemoglobin and C-phycoerythrin. Photochemistry Photobiology 70(4):499-504