



引用格式:邓永秋,廖康泰,徐思琪,等.精氨酸对琼枝麒麟菜温度胁迫的缓解效应研究[J].海南大学学报(自然科学版中英文),DOI:10.65658/j.hndk.2025121001.

Citation:DENG Yongqiu, LIAO Kangtai, XU Siqi, et al. Alleviating Effects of Arginine on Temperature Stress in *Betaphycus gelatinus*[J]. Natural Science of Hainan University, DOI:10.65658/j.hndk.2025121001.

Open Access

精氨酸对琼枝麒麟菜温度胁迫的缓解效应研究

邓永秋,廖康泰,徐思琪,何林文✉

(海南大学 海洋生物与水产学院,海南 海口,570228)

摘要: 季节更替导致的海水温度变化是影响琼枝麒麟菜生长发育的关键因素,其在生长过程中常面临低温和高温胁迫。精氨酸作为合成一氧化氮和多胺的前体,在植物热胁迫响应中起关键作用。目前尚不清楚外源精氨酸是否能提高琼枝麒麟菜应对温度胁迫的能力。为探究低温和高温胁迫对琼枝麒麟菜生理活性的影响及外源 L-精氨酸缓解温度胁迫的效果,以琼枝麒麟菜为实验材料,在低温(15 ℃, LT)、最适温度(27 ℃, MT)和高温(36 ℃, HT)下处理 2 小时,以不添加 L-精氨酸组作为对照(CK),外源添加 6.25 mmol/L(LC)和 12.5 mmol/L(HC)L-精氨酸为实验组,测定琼枝麒麟菜的光合活性、色素含量、抗氧化酶活性等指标。评价 L-精氨酸对琼枝麒麟菜温度胁迫的缓解效果。结果表明,琼枝麒麟菜的光合活性在低温和高温胁迫下显著降低,LC 处理显著缓解了低温和高温对琼枝光合活性的影响,HC 处理仅缓解高温胁迫下琼枝光合活性的抑制,CK-LT 组和 CK-HT 组中叶绿素 a 的含量无显著变化,而类胡萝卜素含量显著上升,LC 和 HC 组中类胡萝卜素含量无显著变化;低温下藻红蛋白和藻蓝蛋白含量显著降低,LC-LT 组藻红蛋白(PE)和藻蓝蛋白(PC)含量与 LC-MT 组相比无显著差异。低温和高温对 APX 活性和 CAT 活性影响显著,添加精氨酸后可明显减少其影响;低温下谷胱甘肽含量显著降低,添加精氨酸后,谷胱甘肽含量恢复;添加精氨酸后可以显著降低胁迫条件下 MDA 的含量。研究结果表明,添加 6.25 mmol/L 精氨酸有助于琼枝应对温度胁迫。本研究结果可为利用精氨酸缓解琼枝麒麟菜温度胁迫提供理论基础。

关键词: 琼枝麒麟菜; 温度胁迫; L-精氨酸; 生理响应

中图分类号: S943 文献标志码: A

DOI: 10.65658/j.hndk.2025121001 CSTR: 32403.14.hndk.2025121001

Alleviating Effects of Arginine on Temperature Stress in *Betaphycus gelatinus*

DENG Yongqiu, LIAO Kangtai, XU Siqi, HE Linwen✉

(XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX)

Abstract: Seasonal variations in seawater temperature constitute a key environmental factor regulating the growth and development of *Betaphycus gelatinus*, which frequently encounters both low- and high-temperature stress during its cultivation. Arginine functions as a metabolic precursor for the synthesis of nitric oxide and polyamines, and plays a crucial regulatory role in plant thermotolerance. Nevertheless, it remains uncertain

Received: 2025-12-10; Revised: 2026-01-13; Accepted: 2026-01-13;

✉ Corresponding author(s): HE Linwen, E-mail: helinwen@hainanu.edu.cn

邓永秋等. 精氨酸对琼枝麒麟菜温度胁迫的缓解效应研究

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>

whether exogenous arginine application can enhance the temperature stress tolerance of *B. gelatinus*. To investigate the effects of low- and high-temperature stress on the physiological activity of *B. gelatinus* and to evaluate the alleviating role of exogenous L-arginine under temperature stress, *B. gelatinus* thalli were exposed for 2 h to low temperature (15 °C, LT), optimum temperature (27 °C, MT), and high temperature (36 °C, HT). Thalli without L-arginine addition served as the control (CK), while treatments with 6.25 mmol/L (LC) and 12.5 mmol/L (HC) L-arginine were used as experimental groups. Photosynthetic activity, pigment contents, antioxidant enzyme activities, and related indices were measured to assess the mitigating effects of L-arginine on temperature stress in *B. gelatinus*. The results showed that photosynthetic activity of *B. gelatinus* decreased significantly under both low- and high-temperature stress. The LC treatment significantly alleviated the inhibitory effects of low and high temperatures on photosynthetic activity, whereas the HC treatment only alleviated the inhibition under high-temperature stress. Chlorophyll a content remained unchanged in both the CK-LT and CK-HT groups, while carotenoid content increased significantly, with no significant difference in carotenoid content between the LC and HC groups. Under low temperature, the contents of phycoerythrin and phycocyanin decreased significantly; however, there was no significant difference in phycoerythrin (PE) and phycocyanin (PC) contents between the LC-LT group and the LC-MT group. Low and high temperatures had significant effects on ascorbate peroxidase (APX) and catalase (CAT) activities, and these effects were markedly reduced after L-arginine addition. Glutathione content decreased significantly under low temperature but recovered after L-arginine addition. Exogenous L-arginine also significantly reduced malondialdehyde (MDA) accumulation under stress conditions. These findings indicate that supplementation with 6.25 mmol/L L-arginine helps *B. gelatinus* cope with temperature stress. The results provide a theoretical basis for the application of arginine to alleviate temperature stress in *B. gelatinus*.

Keywords: *Betaphycus gelatinus*; temperature stress; L-arginine; physiological response

近年以来, 极端气候事件频发, 夏季极热与冬季极寒事件出现频次增多, 极端热事件(海洋热浪)正在改变藻类的生理、群落结构, 而低温胁迫也会抑制藻类的生长和光合作用, 对渔业、养殖业等造成不利影响^[1-3]。琼枝麒麟菜(*Betaphycus gelatinus*)是一种大型红藻, 隶属于麒麟菜族, 为提取卡拉胶的主要原料, 具有极高的经济价值^[4-5]。另外, 琼枝麒麟菜在制药配方、组织工程应用及食品改良领域也极具潜力^[6-7]。然而, 光照、温度及盐度等环境因子是影响琼枝麒麟菜生理的关键因素, 温度变化会导致海藻中光合色素含量发生变化, 进而影响海藻的光合作用效率^[8], 并导致藻体内活性氧和丙二醛含量的增加^[9-10]。研究证明, 低温(18 °C)和高温(36 °C)使琼枝麒麟菜中叶绿素 a 和藻胆蛋白含量降低^[11]。在不同温度胁迫下, 麒麟菜体内多种抗氧化酶活性及非酶抗氧化物含量呈现出差异化响应特征^[12]。除此之外, 温度胁迫还会影响藻类的多种代谢途径, 包括能量代谢、氨基酸代谢、脂质代谢等^[13-15]。因此, 在气候条件变化的当今, 如何提升琼枝麒麟菜抗温度胁迫能力对保障琼枝麒麟菜产业健康发展具有重要价值。

为应对胁迫条件, 藻类自身具有一系列防御机制来抵御这些逆境胁迫, 如植物激素的合成、抗氧化系统激活及相溶性物质的积累等, 这些机制显著增强了海藻对逆境胁迫的适应性并促进代谢产物积累^[16]。研究表明, 温度变化会显著影响潮间带藻类的抗氧化系统: 高温可诱导潮间带藻类(如 *Monostroma harti*、*Adenocystis utricularis* 和 *Pyropia endiviifolia*)的抗氧化酶活性显著上调^[17-18]; 而低温胁迫亦会促使藻体内多种抗氧化酶活性增强及还原性谷胱甘肽含量增加^[12]。除激活抗氧化系统外, 大型藻类亦通过代谢重编程以应对温度胁迫: 在高温下积累糖类与氨基酸等相容性溶质; 在低温下则激活三羧酸循环、淀粉与蔗糖代谢、以及酪氨酸和精氨酸/脯氨酸代谢等关键通路^[19]。值得注意的是, 氨基酸不仅作为高温下的渗透调节物质, 其代谢(如精氨酸/脯氨酸通路)亦在低温响应中扮演重要角色。研究表明, 氨基酸及其衍生物(如 L-精氨酸、脯氨酸、甘氨酸甜菜碱)在增强藻类对高温/低温胁迫的抗性方面表现突出^[20-22]。

精氨酸不仅是植物中重要的氮储备营养物,而且作为多胺和一氧化氮这两种关键信使分子的前体,广泛调控植物的生长发育与抗逆过程^[23]。尽管精氨酸在缓解植物非生物胁迫方面潜力巨大,然而现有研究仍主要局限于果蔬和粮食作物,在藻类方面的研究相对较少。已有研究证明了外源精氨酸在龙须菜抵御高温胁迫中起着重要作用^[22],然而,其在琼枝麒麟菜应对温度胁迫过程中的具体调控功能尚待阐明。为此,本研究通过添加不同浓度的精氨酸,研究温度胁迫下外源精氨酸对琼枝麒麟菜光合活性、色素含量及抗氧化系统的影响,并对精氨酸浓度进行初步筛选,旨在为缓解琼枝麒麟菜温度胁迫提供基础。

1 材料和方法

1.1 材料培养 实验所用琼枝麒麟菜采自海南省昌江黎族自治县海尾镇。实验采用健康、没有附生藻类或啃食痕迹的藻体,使用无菌海水多次清洗以避免污染,在无菌海水培养基中暂养 7 天后进行实验处理。暂养条件为温度 $27\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐度 30 psu,光照强度 $60\text{ }\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光周期 12 h: 12 h。L-精氨酸购买自山东科源生化有限公司。

1.2 实验处理 采用索莱宝公司精氨酸(Arg)含量检测试剂盒,测定正常生长条件下琼枝麒麟菜体内内源精氨酸浓度。以此基准浓度为参考,设置 5 倍内源精氨酸浓度和 10 倍内源精氨酸浓度两种外源精氨酸添加水平。分别配制 0 mmol/L(CK)、5×内源精氨酸浓度(LC, Low concentration)和 10×内源精氨酸浓度(HC, High concentration)的无菌海水培养基,然后取暂养后的藻类样品 1 g,转移到含对应浓度精氨酸的锥形瓶中,分别置于低温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LT)、最适温度 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MT)^[11]和高温 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (HT)光照培养箱中培养 2 小时。所有处理均设置三个生物学重复。实验结束后,收集藻体样本用于生理指标测定。

1.3 生理生化指标测定 琼枝麒麟菜暗适应 15 min 后,用双通道调制叶绿素荧光仪(Dual-PAM-100)^[24]测定光系统 II 的最大量子效率(Fv/Fm)和有效量子产率[Y(II)]。叶绿素 a 和类胡萝卜素采用甲醇提取后,使用分光光度计进行含量测定^[25]。藻红蛋白(PE)和藻蓝蛋白(PC)含量参照 Beer et al.^[26]的方法测定。谷胱甘肽(GSH)含量采用 DTNB 比色法测定,所用试剂盒为 GSH 含量检测试剂盒。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定,所用试剂盒为 MDA 含量检测试剂盒。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用核黄素-氮蓝四唑光比色法测定,所用试剂盒为 SOD 活性检测试剂盒。过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定,所用试剂盒为 CAT 活性检测试剂盒。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性基于抗坏血酸氧化速率法测定,所用试剂盒为 APX 活性检测试剂盒。上述所有检测试剂盒均购自北京索莱宝科技有限公司。

1.4 数据处理 数据统计分析使用 IBM SPSS Statistics 25 软件完成。采用单因素方差分析检验各组间差异的显著性,并通过 Duncan 多重比较法进行组间多重比较,显著性水平设定为 $P<0.05$;所有数据均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜光合活性的影响 测定结果显示,琼枝麒麟菜中内源精氨酸浓度为 1.25 mmol/L,因此实验浓度分别设置为 6.25 mmol/L 和 12.5 mmol/L 添加不同浓度精氨酸处理后不同温度处理对琼枝麒麟菜光合活性的影响如图 1 所示。从图 1a 中可以看出,三种浓度精氨酸处理组中,LT 和 HT 胁迫均导致琼枝麒麟菜的 Fv/Fm 值显著低于 MT,其中,LC-LT 和 LC-HT 处理分别下降至 LC-MT 的 59.09% 和 91.16%;HC-LT 和 HC-HT 分别下降至 HC-MT 的 56.43% 和 86.03%,而对照组中 CK-LT 和 CK-HT 分别下降至 CK-MT 的 49.94% 和 86.15%。在低温和高温胁迫下,与 CK-LT 相比,LC 处理显著提高了琼枝麒麟菜的 Fv/Fm。对于琼枝麒麟菜 Y(II)值的变化,从图 1b 中可以看出,LC-LT、LC-MT 和 LC-HT 处理下琼枝麒麟菜的 Y(II)值无显著差异;与此相比,另外两个处理组呈现相似的结果:CK-LT 和 CK-HT 处理使 Y(II)值分别下降至 CK-MT 的 68.65% 和 63.18%;HC-LT 和 HC-HT 分别使 Y(II)下降至 HC-MT 的 70.16% 和 70.17%。同样,在低温和高温胁迫下,与 CK-LT 相比,LC 处理显著提

高了琼枝麒麟菜的 $Y(II)$ 。

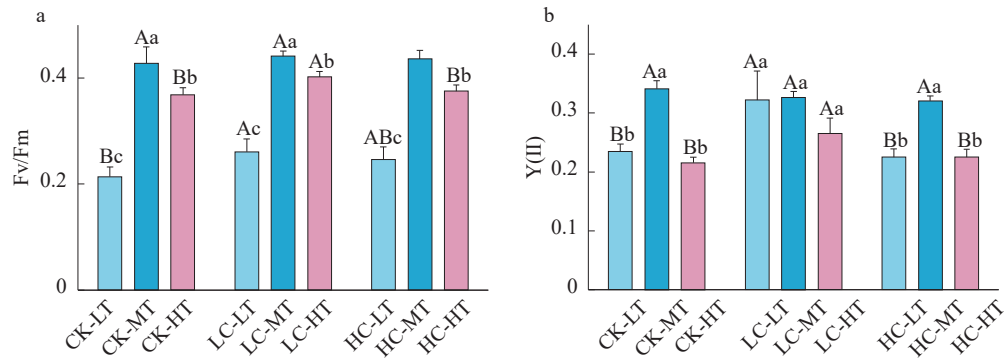


图1 添加外源精氨酸对不同温度处理下琼枝麒麟菜 Fv/Fm 和 $Y(II)$ 的影响

注: a.光系统 II 的最大量子效率; b.光系统 II 的有效量子产率。图中 LT、MT、HT 分别表示低温(15 °C)、最适温度(27 °C)与高温(36 °C)处理; CK、LC、HC 分别表示添加 0、6.25、12.5 mmol/L 精氨酸的处理。不同大写字母(A, B, C)表示在同一温度水平下,不同处理组间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b, c)表示在同一处理组内,不同温度处理间差异显著($P < 0.05$)。所有数据均经 Duncan 多重比较检验,标有相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜色素含量的影响 如图2所示,我们测定了琼枝麒麟菜中四种色素的变化。叶绿素和类胡萝卜素是藻类光合系统中的必需色素,类胡萝卜素还可以充当抗氧化剂。叶绿素 a 含量的变化如图2a所示,在 CK 组中,低温和高温胁迫对琼枝麒麟菜中叶绿素 a 的含量无显著影响,同样,在 HC 处理下,温度胁迫下对叶绿素 a 的含量也无显著变化。特别的是,LC-LT 处理使叶绿素 a 的含量显著下降到 LT-MT 的 82.74%。图2b表示类胡萝卜素含量的变化,CK-LT 和 CK-HT 处理下类胡萝卜素含量都显著升高,分别是 CK-MT 的 1.98 倍和 1.82 倍;相反,LC 和 HC 处理组中,琼枝麒麟菜中类胡萝卜素的含量都无显著变化。此外,LC 处理能显著增加 MT 条件下藻体内的叶绿素 a 和类胡萝卜素含量。藻胆蛋白是一类存在于蓝藻、红藻和部分隐藻中的色素-蛋白质复合体,在海藻的光合过程中发挥关键作用。从图2c的 CK 组中可以看出,CK-LC 处理显著抑制藻红蛋白的含量(66.43%),CK-HT 对藻红蛋白含量无显著影响。而 LC-LT 与 LC-MT 处理下藻红蛋白含量无显著差异;HC-LT 处理下将藻红蛋白含量的下降减少至 86.43%,但与 HC-MT 相比显著下降。藻蓝蛋白含量在外源添加精氨酸后与藻红蛋白有着相同的变化趋势,即 LC-LT 和 LC-MT 处理下藻蓝蛋白的含量与 LC-MT 相比无显著差异;HC-HT 处理时藻蓝蛋白含量无显著变化,HC-LT 处理时下降至 HC-MT 的 69.29%(图2d)。在低温胁迫下,LC 和 HC 处理都能显著增加藻红蛋白和藻蓝蛋白含量,除此之外,还能显著增加高温胁迫下藻蓝蛋白含量。总结发现,对于叶绿素 a 和类胡萝卜素含量,两种浓度的精氨酸都有较好的作用效果,对于藻胆蛋白含量,6.25 mmol/L 的精氨酸缓解效果更佳。

2.3 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜抗氧化系统的影响

2.3.1 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜 APX、CAT、SOD 的影响 当藻类遭遇温度胁迫(过高或过低的温度)时,会导致细胞内的活性氧过量产生,造成对海藻的损伤,而抗氧化系统中的各种抗氧化酶对清除活性氧至关重要。从图3a的 CK 组中可以看出,CK-LT 和 CK-HT 处理导致琼枝麒麟菜中 APX 的活性显著升高,分别达到 CK-MT 的 1.41 倍和 1.54 倍,说明温度胁迫激活了琼枝麒麟菜的抗氧化防御系统,通过增强 APX 的活性,清除过量的活性氧。外源精氨酸(LC、HC)处理后,APX 的活性在温度胁迫下与 MT 相比都无显著差异。相比之下,温度胁迫显著抑制了 CAT 的活性(图3b),CK-LT 处理时下降至 CK-MT 的 48.66%,CK-HT 处理时下降至 61.09%。LC-LT 和 LC-HT 处理后 CAT 的活性与 LC-MT 相比无显著差异,而 HC-LT 处理下, CAT 活性与 HC-MT 相比无显著差异,HC-HT 与 HC-MT 相比 CAT 活性显著升高(图3b)。SOD 活性在三个处理组(CK、LC 和 HC)中均无显著变化(图3c)。LC 处理显著增加三种温度条件下 APX 的活性,HC 处理只在 MT 条件下起作用;低温胁迫下,LC 处理能显著增加 CAT 活性,在高温胁迫下,两种浓度的精氨酸都具有相同的作用。温度胁迫对琼枝麒麟菜中的 SOD 活性并未产生显著的影响,反而是 APX 和 CAT 作为第二道防线活性变化更为显著,可能是由于胁迫

迫强度与胁迫时间导致了这一变化。

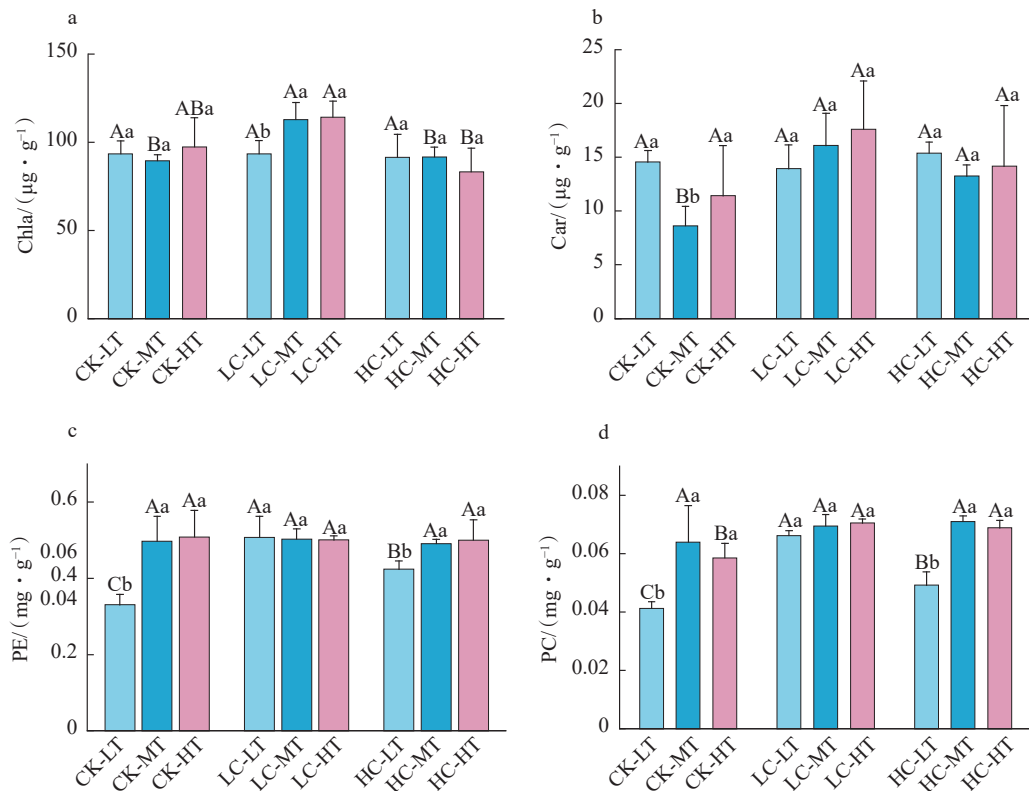


图2 添加外源精氨酸对不同温度处理下琼枝麒麟菜叶绿素 a、类胡萝卜素、藻红蛋白和藻蓝蛋白含量的影响

注: a.叶绿素 a 含量; b.类胡萝卜素含量; c.藻红蛋白含量; d.藻蓝蛋白含量。图中 LT、MT、HT 分别表示低温(15℃)、最适温度(27℃)与高温(36℃)处理; CK、LC、HC 分别表示添加 0、6.25、12.5 mmol/L 精氨酸的处理。不同大写字母(A, B, C)表示在同一温度水平下,不同处理组间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b, c)表示在同一处理组内,不同温度处理间差异显著($P < 0.05$)。所有数据均经 Duncan 多重比较检验,标有相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)。

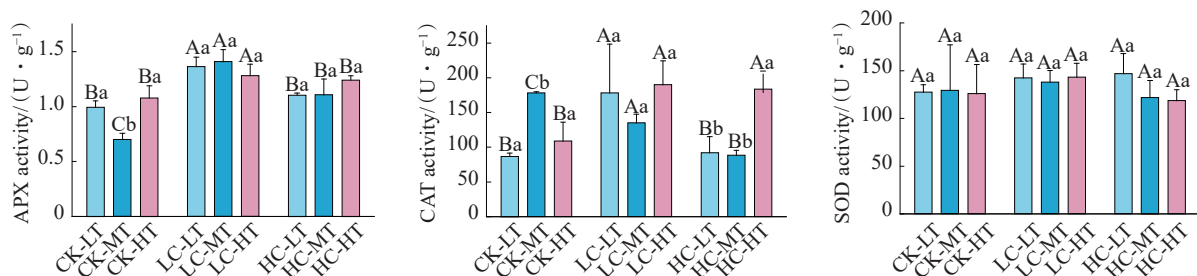


图3 添加外源精氨酸对不同温度处理下琼枝麒麟菜 APX、CAT、SOD 活性的影响

注: a.抗坏血酸过氧化物酶活性; b.过氧化氢酶活性; c.超氧化物歧化酶活性。图中 LT、MT、HT 分别表示低温(15℃)、最适温度(27℃)与高温(36℃)处理; CK、LC、HC 分别表示添加 0、6.25、12.5 mmol/L 精氨酸的处理。不同大写字母(A, B, C)表示在同一温度水平下,不同处理组间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b, c)表示在同一处理组内,不同温度处理间差异显著($P < 0.05$)。所有数据均经 Duncan 多重比较检验,标有相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)。

2.3.2 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜 MDA 含量的影响 脂类过氧化产生的最终产物 MDA 可作为脂类氧化的指标。CK 组中 MDA 含量在 LT 和 HT 下无显著变化,在 HC-HT 处理下,MDA 含量显著下降到 HC-MT 处理的 70.07%,HC-LT 处理后 MDA 含量无显著变化;而 LC-LT 和 LC-HT 处理均能使 MDA 的含量分别显著下降至 LC-MT 处理的 52.76 和 73.91%(图 4)。低温胁迫下,LC 处理能显著降低 MDA 含量,高温胁迫下,LC 和 HC 处理都能显著降低 MDA 含量。结果表明,LC 处理能够显著降低温度胁迫造成的脂质过氧化。

2.3.3 添加外源精氨酸对不同温度胁迫下琼枝麒麟菜 GSH 含量的影响 GSH 作为一种抗氧化物质,帮

助藻体清除体内的活性氧。从图5中可以看出,CK-LT处理使GSH的含量显著下降至CK-MT处理下的49.48%,CK-HT处理下无显著变化。LC-LT和HC-LT处理后GSH的含量与LC-MT相比无显著变化。在低温胁迫下,LC和HC处理都显著增加GSH含量。能表明两种浓度的精氨酸都能提高低温胁迫下琼枝麒麟菜的抗氧化能力。

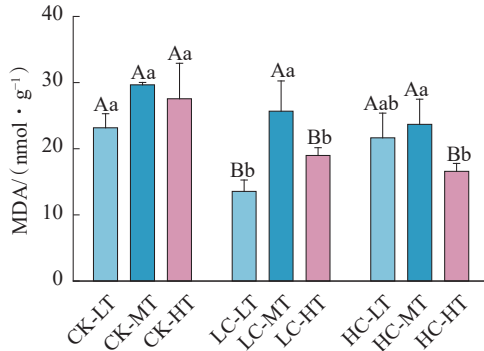


图4 添加外源精氨酸对不同温度处理下琼枝麒麟菜中丙二醛含量的影响

注:图中LT、MT、HT分别表示低温(15℃)、最适温度(27℃)与高温(36℃)处理;CK、LC、HC分别表示添加0、6.25、12.5 mmol/L精氨酸的处理。不同大写字母(A, B, C)表示在同一温度水平下,不同处理组间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b, c)表示在同一处理组内,不同温度处理间差异显著($P < 0.05$)。所有数据均经Duncan多重比较检验,标有相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)。

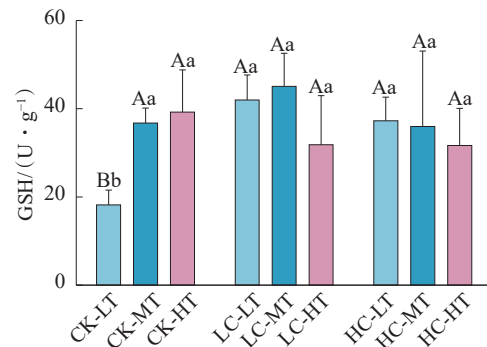


图5 添加外源精氨酸对不同温度处理下琼枝麒麟菜谷胱甘肽含量的影响

注:图中LT、MT、HT分别表示低温(15℃)、最适温度(27℃)与高温(36℃)处理;CK、LC、HC分别表示添加0、6.25、12.5 mmol/L精氨酸的处理。不同大写字母(A, B, C)表示在同一温度水平下,不同处理组间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b, c)表示在同一处理组内,不同温度处理间差异显著($P < 0.05$)。所有数据均经Duncan多重比较检验,标有相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 精氨酸对色素稳态的调控和光合系统的保护作用 海水温度是影响大型海藻光合作用的重要因素之一,而叶绿素、类胡萝卜素和藻胆蛋白是参与藻类光合作用的色素,它们帮助潮间带海藻抵御环境诱导的氧化损伤,最重要的是能够直接影响藻类的光合作用效率^[27-29]。因此,探究温度胁迫下外源精氨酸对琼枝麒麟菜中这三类色素含量变化的影响,能够很好地体现外源L-精氨酸缓解琼枝麒麟菜温度胁迫的效果。钟逸云^[30]等人发现针叶蕨藻的藻体日特定生长率、最大光量子产量、实际光合效率、电子传递速率等随温度升高(26-30℃)而下降;长心卡帕藻的Fv/Fm和Y(II)在低温胁迫下显著下降,表明光合能力降低^[12]。表明温度胁迫对不同海藻的光合系统具有普遍的抑制作用。琼枝麒麟菜在面对高温和低温胁迫时,虽然光合活性均受到抑制,但其光合系统受损机制不同,低温胁迫对捕光系统的伤害更深,Fv/Fm受损严重,高温胁迫下光合系统的受损更多体现在Y(II)的下降,且Fv/Fm的下降幅度较低温轻。

Gun4蛋白是产氧光合生物特有且普遍存在的蛋白质,对叶绿素的高效合成至关重要,精氨酸代谢相关酶ArgD和CphB能与Gun4形成这种复合体^[31]。L-精氨酸是多胺的合成前体^[32-33],研究表明,低浓度的多胺(特别是精胺)能够稳定PS II中蛋白质的结构,而高浓度下会抑制PS II的活性^[34]。尸胺也属于多胺的一种,外源尸胺对光系统具有保护作用,能够改善光合机制中的能量吸收、捕获及电子传递通量,维持光系统(PSI和PSII)的效率和光化学反应能力^[35]。在本研究中,温度胁迫并未对琼枝麒麟菜叶绿素a含量造成显著影响(图2a),叶绿素a的合成与降解过程在当前的胁迫强度和处理时长下保持了相对稳定,因此通过外源添加精氨酸来稳定叶绿素a含量的作用在本研究中并未体现。类胡萝卜素在宿主生物的光保护作用 and 光合作用过程中起着关键作用,外源精氨酸能够激活雨生红球藻中精氨酸途径、提高类胡萝卜素合成相关基因的表达^[36]。琼枝麒麟菜在受到低温和高温胁迫时,类胡萝卜素含量显著上升,外源精氨酸处理改变了这种差异性,使类胡萝卜素含量维持稳定(图2b),提高了海藻对低温和高温的耐受性。

除了叶绿素和类胡萝卜素外,藻胆蛋白作为大型红藻中的捕光色素复合体,其功能是把吸收的光能

传递给光系统反应中心^[37-39]。琼枝麒麟菜中藻胆蛋白含量在应答低温和高温胁迫时也表现出不同的响应,低温胁迫显著降低了藻红蛋白和藻蓝蛋白含量,而高温胁迫下,藻胆蛋白能维持相对稳定(图 2c、d)。添加 6.25 mmol/L 精氨酸缓解了这种抑制效果,LC-LT 藻胆蛋白的含量与 LC-MT 相比无显著变化,琼枝麒麟菜在低温胁迫下能够维持正常的生理功能。曾有研究报道,外源 γ -氨基丁酸可显著缓解光照和盐度胁迫对蓝藻光系统和光合色素的损伤,帮助维持藻胆体的结构和能量转移,从而维持藻胆蛋白的稳定^[40]。本研究中,LC 处理可显著缓解低温胁迫对琼枝麒麟菜藻胆蛋白含量的降低,精氨酸可能通过相同的保护机制维持藻胆体的结构和功能,进一步维持琼枝麒麟菜的光合性能,这也与琼枝麒麟菜光合活性测定的结果一致,LC 处理缓解了温度对琼枝麒麟菜 Y(II)的抑制(图 1b)。由此可见,低浓度精氨酸具有更明显的缓解作用,它能同时显著提升低温和高温下的光合活性(Y(II)),是针对两种温度胁迫的最优浓度,并且能够维持低温胁迫下藻胆蛋白的相对稳定,而高浓度精氨酸的效果不显著。此外,L-精氨酸是一种无毒的植物生长调节剂,可以部分恢复叶绿体结构,减缓逆境胁迫^[41]。

3.2 精氨酸诱导的抗氧化防御 外源精氨酸显著增强了琼枝麒麟菜的抗氧化能力,降低了胁迫条件下的氧化损伤,LC-LT、LC-HT 和 HC-HT 处理下 MDA 含量显著下降(图 4)。琼枝麒麟菜应答高温和低温胁迫时,其抗氧化防御策略存在差异,低温主要通过增强 APX 活性来清除过氧化物,但低温会导致 GSH 含量大幅下降,说明低温极大地消耗了藻体的非酶促抗氧化储备。高温同样激活了 APX 和 CAT 的活性,而其 GSH 水平相较于低温下更为稳定。精氨酸处理能有效维持温度胁迫下抗氧化酶系统的平衡,其关键作用在于抑制了 APX 的过度激活(图 3a),并逆转或阻止了 CAT 活性和 GSH 含量的下降(图 3b、图 5),从而清除过多的活性氧,降低了琼枝麒麟菜中 MDA 含量。已有研究证明了多种外源氨基酸具有增强抗氧化酶活性,进而减少脂质过氧化的作用^[42,43]。Parviz Malekzadeh 等人发现外源 L-精氨酸处理能够诱导精氨酸的分解代谢,减少光胁迫下 MDA 的含量^[44]。对经济红藻龙须菜的研究揭示,外源 L-精氨酸通过 NO/多胺前体作用与代谢重编程,降低了热胁迫下 MDA 含量,增强了 SOD、POD、CAT 活性,激活精氨酸、脯氨酸等关键代谢通路,全面增强了活性氧清除能力^[22]。NO/精氨酸通路在藻类中参与抗氧化信号调控,*Ostreococcus tauri* 利用一氧化氮合酶将外源精氨酸转化为 NO,NO 在不同剂量下可能保护或诱导损伤,具有剂量效应,低浓度 NO 表现出保护作用,而高浓度 NO 则因其毒性抑制藻类生长并造成伤害^[45]。在本研究中,外源 L-精氨酸也表现出一定的剂量效应,例如,HC-LT 处理未能显著降低琼枝麒麟菜中 MDA 含量,且 CAT 活性与 HC-MT 相比没有显著差异,相比之下,LC 处理具有更好的缓解效应。

非酶系统是抗氧化防御的另一大支柱,从本研究结果看,精氨酸同样对其有显著影响。精氨酸能够通过 NO 途径、Nrf2 信号通路途径、GSH 合成途径等多种途径发挥抗氧化应激作用^[46]。CK-LT 处理下 GSH 含量显著下降,LC-LT 处理使 GSH 含量无显著变化,维持在正常水平,表明精氨酸可能通过激活琼枝麒麟菜的 GSH 合成途径来抵御低温胁迫。

本研究进一步表明,精氨酸的添加可影响琼枝麒麟菜在温度胁迫下酶促抗氧化系统(APX、CAT)与非酶抗氧化系统(GSH)的响应能力,两种抗氧化途径发挥协同作用,共同增强了琼枝对温度胁迫的适应能力。在低温和高温胁迫下,添加 6.25 mmol/L 精氨酸均可抑制琼枝的 APX 过度激活,恢复 CAT 活性,并降低 MDA 积累;同时,添加 6.25 mmol/L 精氨酸在低温下还能提升琼枝的 GSH 含量。添加 12.5 mmol/L 精氨酸后,在低温胁迫下虽能调节琼枝的 APX、CAT 活性与 GSH 含量,但未能降低 MDA 含量;而在高温胁迫下,则能抑制琼枝 APX 过度激活、显著提升 CAT 活性并降低 MDA 含量。

4 结 论

本研究证实,通过添加精氨酸能够显著增强琼枝麒麟菜对温度胁迫的耐受性。外源精氨酸的添加,增加了琼枝麒麟菜中类胡萝卜素和两种藻胆蛋白的积累,在琼枝麒麟菜受到温度胁迫时保护其光合系统,维持光系统 II 的实际光化学效率;另一方面,通过调节 APX、CAT 活性和 GSH 含量,维持抗氧化系统的平衡,有效清除过量的活性氧,显著降低 MDA 含量。此外,这种缓解效应还表现出了一定的剂量效应,6.25mmol/L 精氨酸处理对琼枝麒麟菜温度胁迫具有更稳定和更全面的缓解效应。

参考文献:

- [1] SMALE D A. Impacts of ocean warming on kelp forest ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2020, 225(4): 1447–1454.
- [2] STRAUB S C, WERNBERG T, THOMSEN M S, et al. Resistance, extinction, and everything in between—the diverse responses of seaweeds to marine heatwaves[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 763.
- [3] ANDERSON S I, BARTON A D, CLAYTON S, et al. Marine phytoplankton functional types exhibit diverse responses to thermal change[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6413.
- [4] 侯萍, 陈小燕, 李铭, 等. 海南野生与养殖琼枝麒麟菜形态和成分对比 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(18): 159, 159.
HOU P, CHEN X Y, LI M, et al. The morphological comparison and component analysis between the wild and farmed *Eucheuma* of Hainan[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(18): 159, 166.
- [5] 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, 25.
YANG X Q, DING J J, HUANG B, et al. The techniques of *Eucheuma gelatinae* culture model and economic benefit analysis[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(6): 16–19, 25.
- [6] JABŁOŃSKA-TRYPUĆ A. Algae as crop plants being a source of bioactive ingredients of pharmaceutical and dietary importance[J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 895.
- [7] PEÑALVER R, LORENZO J M, ROS G, et al. Seaweeds as a functional ingredient for a healthy diet[J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(6): 301.
- [8] ENDO H, OKUMURA Y, SATO Y, et al. Interactive effects of nutrient availability, temperature, and irradiance on photosynthetic pigments and color of the brown alga *Undaria pinnatifida*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(3): 1683–1693.
- [9] FAN M H, SUN X, LIAO Z, et al. Comparative proteomic analysis of *Ulva prolifera* response to high temperature stress[J]. *Proteome Science*, 2018, 16: 17.
- [10] TERADA R, TAKAESU M, BORLONGAN I A, et al. The photosynthetic performance of a cultivated Japanese green alga *Caulerpa lentillifera* in response to three different stressors, temperature, irradiance, and desiccation[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2021, 33(4): 2547–2559.
- [11] 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.
LIANG L, FANG Z, HUANG H Q, et al. The effect of temperature on the growth and pigment content of *Betaphycus gelatinum*[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(3): 87–90.
- [12] LI H, LIU J G, ZHANG L T, et al. Effects of low temperature stress on the antioxidant system and photosynthetic apparatus of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae)[J]. *Marine Biology Research*, 2016, 12(10): 1064–1077.
- [13] SUN P P, MAO Y X, LI G Y, et al. Comparative transcriptome profiling of *Pyropia yezoensis* (Ueda) M. S. Hwang & H. G. Choi in response to temperature stresses[J]. *BMC Genomics*, 2015, 16(1): 463.
- [14] SHIN H, HONG S J, YOO C, et al. Genome-wide transcriptome analysis revealed organelle specific responses to temperature variations in algae[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 37770.
- [15] LI Q Y, CHANG R, SUN Y J, et al. iTRAQ-based quantitative proteomic analysis of *Spirulina platensis* in response to low temperature stress[J]. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166876.
- [16] KAUR M, SAINI K C, OJAH H, et al. Abiotic stress in algae: response, signaling and transgenic approaches[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2022, 34(4): 1843–1869.
- [17] CELIS-PLÁ P S M, MOENNE F, RODRÍGUEZ-ROJAS F, et al. Antarctic intertidal macroalgae under predicted increased temperatures mediated by global climate change: would they cope?[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140379.
- [18] SÁEZ C A, TRONCOSO M, NAVARRETE C, et al. Photoprotective responses of three intertidal Antarctic macroalgae to short-term temperature stress[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1223853.
- [19] HE Y L, HU C Y, WANG Y H, et al. The metabolic survival strategy of marine macroalga *Ulva prolifera* under temperature

- stress[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2018, 30(6): 3611–3621.
- [20] BARERA S, FORLANI G. The role of proline in the adaptation of eukaryotic microalgae to environmental stress: an underestimated tool for the optimization of algal growth[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2023, 35(4): 1635–1648.
- [21] 李恬静薇, 邹潇潇, 鲍时翔. 藻类对温度胁迫响应机制的国内外研究进展 [J]. *渔业研究*, 2021, 43(2): 221–230.
- LI T J W, ZOU X X, BAO S X. Research progress of response mechanism of algae to temperature stress at home and abroad[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2021, 43(2): 221–230.
- [22] ZHANG J, LIU S X, HU C Y, et al. Physiological and transcriptome analysis of exogenous L-arginine in the alleviation of high-temperature stress in *Gracilariopsis lemaneiformis*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 784586.
- [23] 杨洪强, 高华君. 植物精氨酸及其代谢产物的生理功能 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2007, 33(1): 1–8.
- YANG H Q, GAO H J. Physiological function of arginine and its metabolites in plants[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2007, 33(1): 1–8.
- [24] LIU F, PANG S J, XU N, et al. *Ulva* diversity in the Yellow Sea during the large-scale green algal blooms in 2008–2009[J]. *Phycological Research*, 2010, 58(4): 270–279.
- [25] JI Z W, ZOU D H, GONG J Y, et al. The different responses of growth and photosynthesis to NH_4^+ enrichments between *Gracilariopsis lemaneiformis* and its epiphytic alga *Ulva lactuca* grown at elevated atmospheric CO_2 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 144: 173–180.
- [26] BEER S, ESHEL A. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae[J]. *Marine & Freshwater Research*, 1985, 36(6): 785–792.
- [27] 徐孟杰, 李青楠, 姚丹丹, 等. 温度、光照强度和盐度对冬青叶马尾藻生长和光合生理的影响 [J]. *南方水产科学*, 2023, 19(6): 127–133.
- XU M J, LI Q N, YAO D D, et al. Effects of temperature, light intensity, salinity on growth and photosynthetic physiology of *Sargassum ilicifolium*[J]. *South China Fisheries Science*, 2023, 19(6): 127–133.
- [28] ABIDIZADEGAN M, KHALES M K, AJDARI D. Depth-dependent pigment fluctuations in the agarophyte *Gracilaria corticata* at intertidal waters[J]. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 2018, 34(1): 247–253.
- [29] SIMKIN A J, KAPOOR L, DOSS C G P, et al. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta[J]. *Photosynthesis Research*, 2022, 152(1): 23–42.
- [30] 钟逸云, 杨蕴琪, 邵晓峰, 等. 盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(6): 626–633.
- ZHONG Y Y, YANG Y Q, GAO X F, et al. Effects of salinity, temperature and light intensity on growth and photo-synthetic activity of *Caulerpa sertularioides*[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2021, 29(6): 626–633.
- [31] KISS É, TALBOT J, ADAMS N B P, et al. Chlorophyll biosynthesis under the control of arginine metabolism[J]. *Cell Reports*, 2023, 42(11): 113265.
- [32] 赵福庚, 孙诚, 刘友良, 等. 盐胁迫下大麦幼苗多胺与脯氨酸合成竞争前体 L-Arg[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 622–626.
- ZHAO F G, SUN C, LIU Y L, et al. The biosyntheses of polyamines and proline competed for precursor L-Arginine in barley seedlings under salt stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 622–626.
- [33] 王晓云, 李向东, 邹琦. 外源多胺、多胺合成前体及抑制剂对花生连体叶片衰老的影响 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33(3): 30–35.
- WANG X Y, LI X D, ZOU Q. Effect of polyamines on senescence of attached peanut leaves[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(3): 30–35.
- [34] HAMDANI S, YAAKOUBI H, CARPENTIER R. Polyamines interaction with thylakoid proteins during stress[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, 104(1/2): 314–319.
- [35] BALCI M, ALP F N, ARIKAN B, et al. Polyamine cadaverine detoxifies nitrate toxicity on the chloroplasts of *Triticum aestivum* through improved gas exchange, chlorophyll a fluorescence and antioxidant capacity[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(8): 4958–4974.

- [36] ACHEAMPONG A, WANG R, ELSHERBINY S M, et al. Exogenous arginine promotes the coproduction of biomass and astaxanthin under high-light conditions in *Haematococcus pluvialis*[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 393: 130001.
- [37] GEUER L, ERDMANN N, LORENZ M, et al. Colorful diversity—modified methods for extraction and quantification of photopigments and phycobiliproteins isolated from phototrophic micro- and macroalgae[J]. *Journal of Chemical Education*, 2023, 100(2): 852–860.
- [38] CIKOŠ A M, ŠUBARIĆ D, ROJE M, et al. Recent advances on macroalgal pigments and their biological activities (2016–2021)[J]. *Algal Research*, 2022, 65: 102748.
- [39] ROCKWELL N C, MARTIN S S, LAGARIAS J C. Elucidating the origins of phycocyanobilin biosynthesis and phycobiliproteins[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(17): e2300770120.
- [40] PANDEY A, KUMAR S, SINGH G, et al. Regulatory role of gamma-aminobutyric acid in cyanobacteria challenged with UV-B: the implication of nitric oxide[J]. *Plant Stress*, 2022, 5: 100094.
- [41] SUN Y F, MIAO F, WANG Y C, et al. L-Arginine alleviates the reduction in photosynthesis and antioxidant activity induced by drought stress in maize seedlings[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(2): 482.
- [42] WANG W, CANG L, ZHOU D M, et al. Exogenous amino acids increase antioxidant enzyme activities and tolerance of rice seedlings to cadmium stress[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, 36(1): 155–161.
- [43] MOHAMMADREZAKHANI S, HAJILOU J, REZANEJAD F, et al. Assessment of exogenous application of proline on antioxidant compounds in three *Citrus* species under low temperature stress[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, 14(1): 347–358.
- [44] MALEKZADEH P, HATAMNIA A A, TIZNADO-HERNÁNDEZ M E. Arginine catabolism induced by exogenous arginine treatment reduces the loss of green color rate in broccoli florets[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2023, 124: 101973.
- [45] FORESI N, CALÓ G, DEL CASTELLO F, et al. Arginine as the sole nitrogen source for *Ostreococcus tauri* growth: insights on nitric oxide synthase enzyme[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1064077.
- [46] LIANG M C, WANG Z X, LI H, et al. L-Arginine induces antioxidant response to prevent oxidative stress via stimulation of glutathione synthesis and activation of Nrf2 pathway[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 115: 315–328.

作者贡献声明

邓永秋: 实验设计与操作、数据收集与分析、论文初稿撰写; 廖康泰: 实验材料处理、部分生理指标测定、数据整理; 徐思琪: 协助实验、图表绘制、文献调研与文稿校对; 何林文: 研究构思与设计、经费支持、实验指导、论文修改与最终审定。

利益冲突声明

作者声明, 其不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文的英文题名、摘要和关键词采用 DeepL 翻译生成, 并进行了部分修改。本文未使用人工智能工具生成正文内容、数据、方法及结论。英文摘要由作者撰写并润色完成。

伦理声明

本研究不涉及人类参与者或动物实验, 不适用伦理审查。

数据可用性声明

支持本研究结果的数据均包含在论文中。如有需要,可联系通信作者获取进一步信息。

致谢/Acknowledgements

感谢国家重点研发计划(2022YFD2401303)、海南大学科研启动资金项目(KYQD(ZR)20 059)及海南大学协同创新中心科研项目(XTCX2022HYB07)的资助。

The work was supported by National Key R&D Program of China (2022YFD2401303), Startup Foundation of Hainan University (KYQD(ZR)20059), Research Project of the Collaborative Innovation Center of Hainan University (XTCX2022HYB07).

作者简介

邓永秋(2000—),女,重庆人,海南大学海洋生物与水产学院 2023 级硕士研究生, E-mail: dengyongqiu2025@hainanu.edu.cn

廖康泰(2001—),男,贵州毕节人。海南大学海洋生物与水产学院 2023 级硕士研究生, E-mail: liaokangtai0206@hainanu.edu.cn

徐思琪(2000—),女,福建宁德,海南大学海洋生物与水产学院 2023 级硕士研究生, E-mail: xusiqi2025@hainanu.edu.cn;

何林文(1984—),男,副研究员,博士生导师。研究方向:大型海藻生理及栽培。E-mail: helinwen@hainanu.edu.cn

(责任编辑:王玖琪)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.

邓永秋等. 精氨酸对琼枝麒麟菜温度胁迫的缓解效应研究

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>