

茉莉酸甲酯对铜藻生长、抗氧化系统及岩藻黄素含量的影响

吕芳^{1,2}, 丁刚^{1,2}, 詹冬梅^{1,2}, 王翔宇^{1,2}, 吴海一^{1,2,*}

¹山东省海洋生物研究院, 山东省大型海藻资源保护与应用工程技术研究中心, 山东青岛266104

²青岛市大型海藻工程技术研究中心, 山东青岛266104

摘要: 为了探讨茉莉酸甲酯(MeJA)对铜藻(*Sargassum horneri*)生长的影响作用, 本文比较了不同浓度的茉莉酸甲酯对铜藻生长、生理生化指标、抗氧化系统以及次生代谢产物岩藻黄素积累的影响。结果发现, 50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理后培养3 d显著促进了藻体的生长, 继续培养至10 d时, 与对照组无显著差异; 而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理后10 d内均显著抑制了藻体的生长。生理生化结果分析表明, 培养3 d内, 50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理可显著提高藻体叶绿素 a 和类胡萝卜素的含量, SOD、CAT和POD酶活性增强, 而可溶性蛋白的含量变化不大; 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组叶绿素 a 、类胡萝卜素和可溶性蛋白的含量均呈先升高后降低再升高的趋势, 藻体SOD和POD酶活性增强, CAT酶活性降低; 藻体MDA含量在50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组无显著变化, 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组显著低于对照组, 而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著升高。MeJA处理后培养至10 d时, 仅500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组藻体的叶绿素 a 、可溶性蛋白含量、SOD和CAT活性高于对照, 其余指标基本恢复至对照组水平。岩藻黄素含量在500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理后培养2和3 d时比对照组增加了12.55%和18.17%。这些结果为探讨MeJA在铜藻生长及岩藻黄素的规模化生产中的作用提供基础材料。

关键词: 铜藻; 茉莉酸甲酯; 光合色素; 抗氧化系统; 岩藻黄素

铜藻(*Sargassum horneri*)隶属于马尾藻属(*Sargassum*), 是一类具有较高经济价值的褐藻, 是近海藻场及海底森林的主要组成部分, 对维持近海生物多样性和生态系统平衡具有重要作用。铜藻可营底栖和漂浮两种生活史类型。近年来, 漂浮铜藻的规模和影响越来越大, 其大面积聚集成片, 被形象地称为“金潮”(golden tide) (Smetacek和Zingone 2013), 引起了广泛的关注(Hirata等2003; 黄冰心等2018; 吕芳等2018a)。铜藻能生产一种天然的次生代谢产物——岩藻黄素(fucoxanthin)。岩藻黄素又称岩藻黄质, 是胡萝卜素的含氧衍生物, 是一种具有潜在开发应用价值的海洋天然活性产物, 已报道具有抗氧化、抗炎、抗肥胖、抗肿瘤和降血糖等多种生理活性, 具有广阔的应用前景(张文源等2015)。岩藻黄素主要来源于大型海藻褐藻和微藻硅藻中, 由于提取效率低, 难以化学合成, 其工业化生产受到了限制。因此, 研究开发有效的途径提高藻类中岩藻黄素的含量具有重要意义。

植物生长调节剂能有效调控植物的生长发育过程, 显著提高植物的光合能力, 增加产量, 改善品质, 现已广泛应用于植物的生长调节(朱晓琛等2017; 陈玥等2018)。茉莉酸甲酯(methyl jasmonate,

MeJA)作为一种普遍存在于植物体内的生长调节物质, 不但可以调节植物的生长发育过程, 增强植物的抗逆性(Wasternack和Hause 2013), 还可以提高植物次生代谢产物的含量(Gundlach等1992)。在藻类中的应用也有一些相关报道, 如MeJA能诱导杜氏盐藻(*Dunaliella salina*) β -胡萝卜素的积累, 对盐藻的生长和叶绿素含量有极显著的影响(朱颖等2010); MeJA能够促进雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)单位细胞虾青素的合成能力, 诱导虾青素合成相关基因 dxs 的表达水平(王鑫威等2011); MeJA还可提高坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)的生长速率, 促进其藻胆蛋白和脯氨酸的积累, 增强PSII的光能利用率, 在一定程度上增强其抗逆性(侯赛男等2017)等。前期研究发现影响铜藻中岩藻黄素积累的因素除了温度和光照等外(栾青2018), 植物生长调节剂三十烷醇可使铜藻岩藻黄素的含量提高79.5% (吕芳等2019), 因此本文进一步研究植

收稿 2018-12-13 修定 2019-04-24

资助 海洋公益性行业科研专项经费项目(201505022)、山东省现代农业产业技术体系创新团队项目(SDAIT26)和山东省农业重大应用技术创新项目。

* 通讯作者(wuhaiyi1997@163.com)。

物生长调节剂处理下活性物质积累的响应规律。

藻类的抗逆性与抗氧化酶系统的活性之间有着重要的相关性。逆境胁迫往往导致机体活性氧代谢的失调与自由基的积累,并进一步导致细胞膜结构损伤,引发体内氧化胁迫,研究发现抗逆性强的藻类在逆境胁迫下其抗氧化酶系统活性较强(鹿宁等2012)。为此通过研究藻体抗氧化系统的生理响应特征,以探讨铜藻对外源植物生长调节剂的生理响应。

本研究针对铜藻资源在应用上的巨大潜力,探讨不同浓度的茉莉酸甲酯对铜藻的生长、抗氧化系统以及次生代谢产物岩藻黄素积累的影响,为探明茉莉酸甲酯在铜藻生长中的作用,进而为铜藻岩藻黄素的规模化生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

铜藻[*Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh]采自山东荣成海域的海带养殖筏架上(N 36°05', E 120°35'),用低温箱迅速运回实验室,置于循环水箱暂养5 d,培养条件参照吕芳等(2018b)。

1.2 培养方法

实验在装有1 000 mL培养液的三角瓶中进行,选取形态较一致、相同部位的藻体,每瓶放置(4±0.1) g。实验用培养液为过滤的天然海水,处理组在培养液中添加MeJA使其终浓度分别为50、100、200和500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,培养液中不加MeJA的作为对照组。培养条件同1.1。培养1 d后弃去添加MeJA的培养液,充分清洗去掉残余MeJA后更换正常培养液继续培养至10 d。在整个培养过程的0、1、2、3和10 d分别取样进行测定。

1.3 比生长速率(specific growth rate, SGR)的测定

比生长速率的测定方法参照吕芳等(2018b)。

1.4 光合色素[叶绿素 a (chlorophyll a)和类胡萝卜素(carotenoid)]含量测定

光合色素的提取和测定参照吕芳等(2018b)的方法。

1.5 可溶性蛋白含量测定

可溶性蛋白的提取参照吕芳等(2018b)的方法,采用南京建成蛋白检测试剂盒考马斯亮蓝法测定。

1.6 抗氧化系统相关指标的测定

超氧化物歧化酶(total superoxide dismutase, T-SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)的活性和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的测定均用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。

1.7 岩藻黄素含量测定

参照闫相勇等(2014)和李红艳等(2018)的方法测定岩藻黄素的含量。

1.8 数据分析

采用SPSS 13.0软件进行数据统计分析,结果采用Origin 9.0进行分析绘图,用单因素方差分析(One-way ANOVA)的Duncan法进行组间多重比较,差异显著性为 $P<0.05$ 。

2 实验结果

2.1 茉莉酸甲酯对铜藻生长的影响

比较不同浓度MeJA对铜藻比生长速率(SGR)的影响(图1)发现,随着MeJA浓度的增加,至培养3 d时藻体SGR呈现先增加后减少的趋势,其中50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组藻体的SGR显著高于对照组($P<0.05$),分别是对照组的1.21和1.29倍,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组与对照组无显著差异($P>0.05$),而

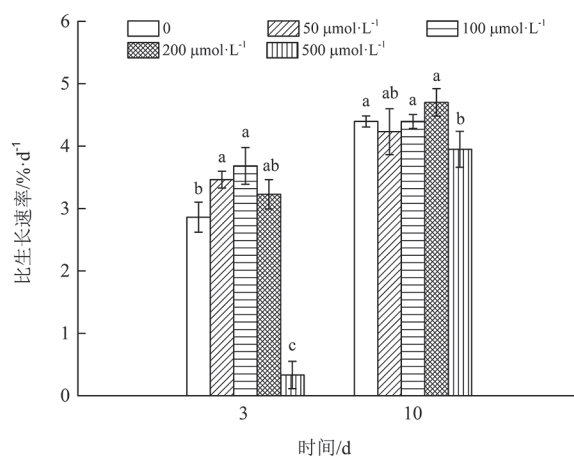


图1 不同浓度茉莉酸甲酯对铜藻生长的影响

Fig.1 Effects of different MeJA concentrations on specific growth rate of *S. horneri*

同一培养时间中标有不同小写字母者表示不同处理间有显著性差异($P<0.05$), 标有相同小写字母者表示不同处理间无显著性差异($P>0.05$),下同。

500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的SGR明显降低, 仅为对照组的11.6%。培养10 d, 各组的SGR均有所升高, 其中仅500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著低于对照组外($P<0.05$), 其他3个浓度处理组与对照组均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 茉莉酸甲酯对光合色素含量的影响

不同浓度MeJA处理后, 1 d时, 藻体叶绿素 a 的含量均有增加, 分别是对照组的1.25、1.24、1.09和1.08倍($P<0.05$); 在2 d时各浓度处理组中叶绿素 a 的含量也均高于对照组, 且差异显著; 在3 d时, 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组与对照组差异不显著($P>0.05$), 其余3组仍显著高于对照; 至10 d时, 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组叶绿素 a 的含量与对照无显著差异外, 其他3个处理组均显著高于对照组(图2-A)。

添加外源 MeJA培养1 d 时, 藻体类胡萝卜素含量分别比对照组高出35.01%、25.42%、7.49%和9.58% ($P<0.05$); 更换培养液继续培养至2 d时, 除500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组与对照组无显著差异外($P>0.05$), 其他3组显著高于对照组; 培养3 d时, 各浓度处理组类胡萝卜素含量均显著高于对照组, 其中50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的类胡萝卜素含量较高; 培养10 d时各处理组与对照组均无显著差异($P>0.05$) (图2-B)。

2.3 茉莉酸甲酯对可溶性蛋白含量的影响

添加不同浓度MeJA处理后培养至10 d的过程中, 50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组可溶性蛋白含量无明显变化, 且与对照组无显著差异。200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组在前3 d变化不大, 10 d显著升高。而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组的蛋白含量随培养时间呈波动变化状态, 在1 d时, 其蛋白含量为2.24 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于对照组18.23% ($P<0.05$); 2 d时蛋白含量有所下降, 仍高于对照组15.17%; 3 d时, 蛋白含量持续下降; 10 d时又显著升高($P<0.05$) (图3)。

2.4 茉莉酸甲酯对SOD、CAT、POD活性和MDA含量的影响

不同浓度MeJA的添加对铜藻SOD活性的影响比较显著(图4-A)。不同浓度MeJA处理1 d后, 50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组藻体SOD活性显著高于对照组, 而200和500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组与对照组无显著差异。随后各处理组SOD活性均显著升高。至3 d达

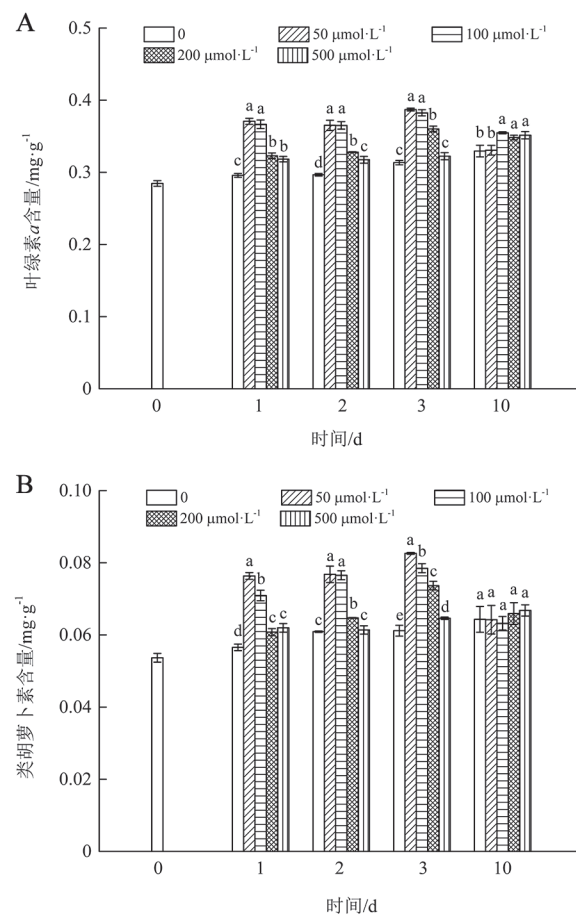


图2 不同浓度茉莉酸甲酯对铜藻光合色素含量的影响
Fig.2 Effects of different MeJA concentrations on chlorophyll a and carotenoid contents of *S. horneri*

到最高, 且MeJA处理浓度越高, 藻体SOD活性越强。10 d时, 各组SOD活性均呈下降趋势, 除500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组仍显著高于对照组外, 其余与对照组无显著差异($P>0.05$)。

各处理组CAT活性的变化呈现差异性(图4-B), 50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组在MeJA处理1 d时无显著变化, 恢复正常培养后, 活性显著升高。200和500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组1 d时即显著升高, 随后略有下降, 至3 d时200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组仍显著高于对照组, 而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组则显著低于对照组($P<0.05$)。而培养10 d时, 各处理组均显著高于对照组, 且各组间无显著差异($P>0.05$)。

MeJA处理1 d时, 藻体POD活性比对照组显著提高; 正常培养3 d后, 各浓度处理组藻体POD活性

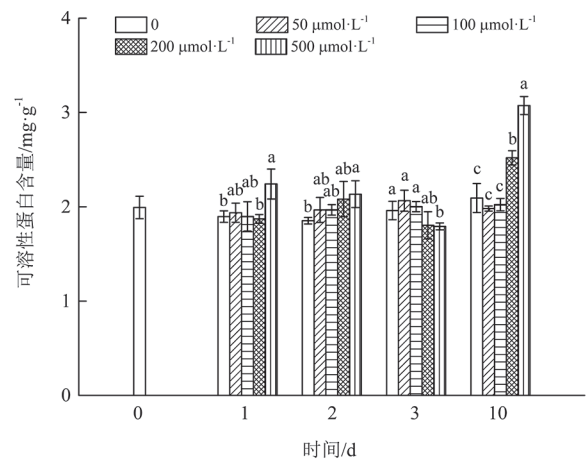


图3 不同浓度茉莉酸甲酯对铜藻可溶性蛋白含量的影响
Fig.3 Effects of different MeJA concentrations on soluble protein content of *S. horneri*

仍保持在较高水平; 至10 d时, 各组POD活性均有所下降(图4-C)。

由图4-D可见, 在50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA作用下, 藻体的MDA含量在培养前2 d内变化不大, 但500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著升高, 在1和2 d时分别是对照组的1.20倍和1.38倍($P<0.05$)。培养3 d时, 50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 组与对照仍无显著差异, 其余两组藻体的MDA含量有所下降, 其中200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组已低于对照组, 而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组仍高于对照组。培养10 d时, 各处理组MDA含量与对照组均无显著差异($P>0.05$)。

2.5 茉莉酸甲酯对岩藻黄素含量的影响

50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理对铜藻岩藻黄素含量无显著影响($P>0.05$); 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理

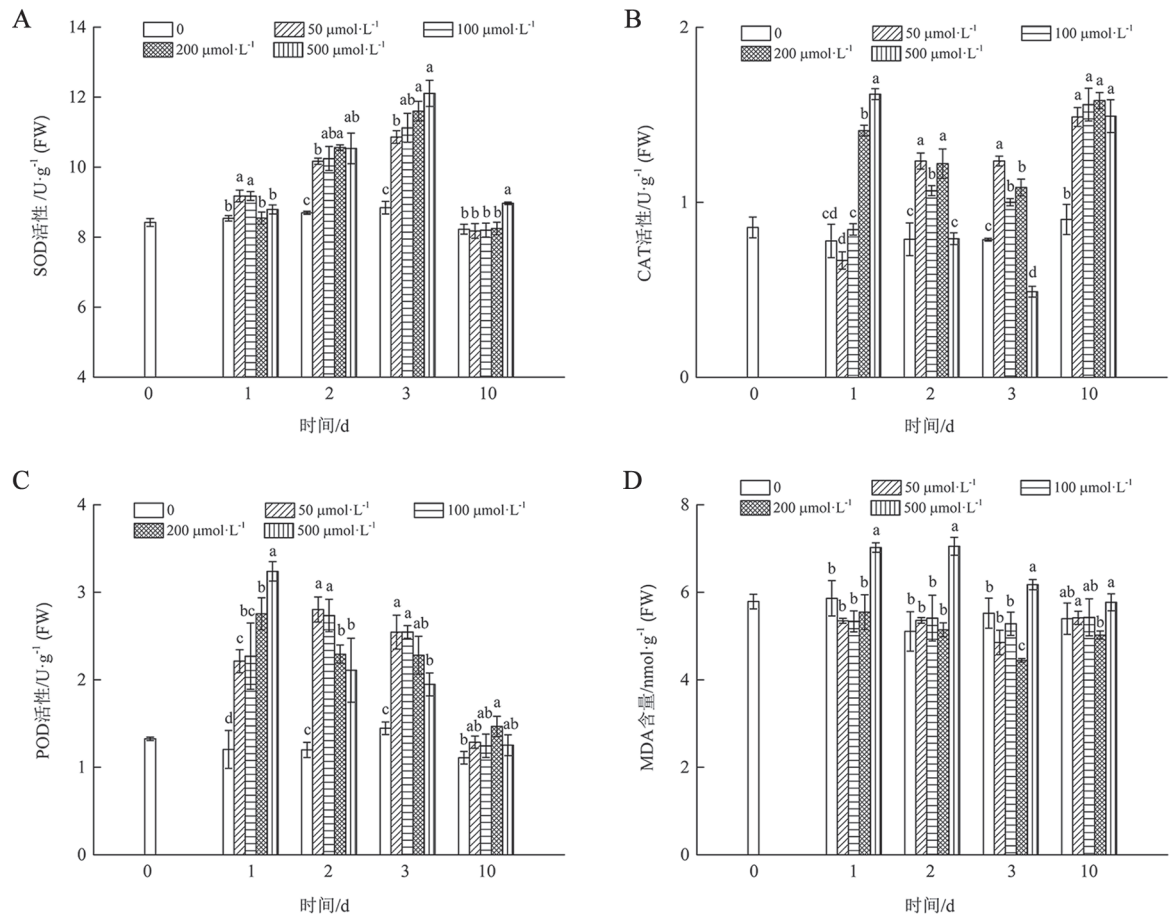


图4 不同浓度茉莉酸甲酯对铜藻抗氧化系统的影响
Fig.4 Effects of different MeJA concentrations on antioxidant system of *S. horneri*

后培养2和3 d时岩藻黄素含量较对照组分别上升12.55%和18.17%, 但培养至10 d时, 又恢复至对照组水平(图5)。

3 讨论

MeJA对植物的生长和发育过程的调节作用与植物激素脱落酸相似, 具有抑制幼苗纵向生长、种子萌发、胚胎发生、花芽形成等作用; 另外还可促进果皮衰老、果实成熟、叶片衰老等(蔡昆争等2006)。朱颖等(2010)研究发现 $50\sim 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA对盐藻的生长无显著的影响, $1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA对盐藻的生长有显著的抑制作用。王鑫威等(2011)发现当添加一定浓度MeJA时, 雨生红球藻细胞生长呈现不同的抑制效应, $1\ 600\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA可明显抑制藻细胞的生长。侯赛男等(2017)对坛紫菜的研究发现 $25\sim 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理时对藻体的生长影响不显著。本试验中, 50 和 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理后培养3 d时显著促进了铜藻的生长, $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA却显著抑制了藻体的生长, 表明MeJA对藻类的作用存在明显的剂量效应, 在一定剂量下成为一种胁迫因素, 抑制藻类生长, 但产生抑制作用的浓度和效应在不同藻类中存在差异, 尚需进一步的研究完善。

光合色素能够吸收、传递和转换光能, 是植物进行光合作用的物质基础, 其含量与组成能够

直接反映植物的生理状态。本试验中, MeJA处理后1和2 d均显著提高了藻体叶绿素a含量, 随着培养时间的延长, 高于 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA对藻体叶绿素a的含量仍有促进, $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的叶绿素a含量与对照无显著差异。藻体类胡萝卜素含量在不同试验浓度MeJA处理后培养至3 d均显著升高。说明适宜浓度MeJA能够提高铜藻的光合色素水平, 增强藻体的光能利用效率, 进而促进其光合能力的提升。结合生长试验, 我们推测MeJA浓度为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可能是对铜藻作用的临界浓度, 这与Raman和Ravi (2011)报道的MeJA抑制雨生红球藻生长的作用浓度相同。蛋白质不仅是重要的渗透调节物质, 与植物抗逆性的形成有关, 还是一些可调节细胞代谢的催化酶类, 在各种生理代谢中发挥重要的作用。本研究发现, 在整个试验期间, $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组藻体中可溶性蛋白的含量呈波动变化状态, 较低浓度的3个处理组则变化不大, 推测可能是高浓度MeJA作为一种胁迫因素导致藻体中防御蛋白的合成, 防御系统启动时各种催化酶类大量合成, 从而影响藻体的生理生长代谢等。

SOD、CAT和POD是植物细胞酶保护系统中抵抗活性氧伤害的3种重要酶, 在维护细胞膜正常代谢、防止膜脂过氧化以及清除超氧自由基方面起到了重要作用(Dummermuth等2003; 鹿宁等2012), 因此测定这三种酶的活性可以反映出某一时植物体内代谢水平的变化。本研究中, MeJA不同浓度的处理组在培养前3 d, 藻体SOD和POD的活性均显著升高, 且随MeJA浓度的增加, SOD酶活性逐渐升高, POD酶活性呈逐渐下降的趋势, 这与在盐藻中的研究结果是一致的(章丽等2013)。CAT的活性在添加200和 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA培养1 d时即显著升高, 而 50 和 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组在培养2 d时才有所升高。MeJA处理使藻细胞产生活性氧(reactive oxygen species, ROS)的量上升, 迅速激活更多的SOD来清除活性氧, 超氧化物歧化为 H_2O_2 , 受到高含量 H_2O_2 的诱导, CAT活性升高; 此外也有研究发现脱落酸和水杨酸等植物激素可作为信号分子诱导植物细胞中 H_2O_2 的产生, 而 H_2O_2 又可诱导合成或激活多种转录因子, 这些转录因子

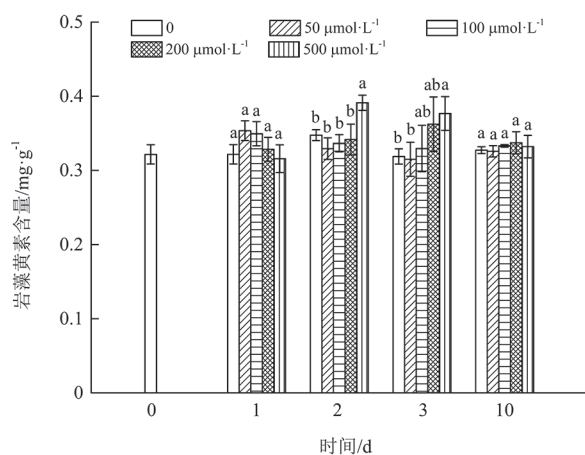


图5 不同浓度茉莉酸甲酯对铜藻岩藻黄素含量的影响
Fig.5 Effects of different MeJA concentrations on fucoxanthin content of *S. horneri*

与抗氧化酶活性的增强有关(Agarwal等2005)。MDA含量高低在一定程度上反映植物细胞膜脂过氧化水平和膜结构受伤害程度,本实验研究发现,50和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组,藻体MDA的含量无显著变化,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组在3 d时显著低于对照组,表明藻细胞内活性氧可能没有大量积累,膜脂过氧化程度较低,有利于保护细胞膜结构的稳定性,而500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理组MDA的含量显著升高,表明藻体内活性氧增多,造成膜脂过氧化程度增强。综合来看这几项指标的变化趋势,表明藻体内抗氧化酶活性变化是一个相互联系且复杂的过程,适宜浓度的MeJA可提高铜藻藻体的抗氧化酶活性和对自由基的清除能力,以减轻膜脂过氧化作用的伤害,提高藻体的抗逆性。

大量研究表明,外源MeJA能够诱导植物体内类胡萝卜素、紫杉醇、长春花碱、银杏内酯等次生代谢产物的合成与积累(余龙江等1999;朱颖等2010;Kang等2006)。岩藻黄素是褐藻中重要的次生代谢产物,本试验发现,500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA能显著提高铜藻中岩藻黄素的含量,但在该作用浓度下不利于铜藻的生长。詹冬梅等(2018)对鼠尾藻化学组分的季节性变化的研究中发现,鼠尾藻中岩藻黄素的含量在生长缓慢的12月份显著高于生长快速的6月份。 β -胡萝卜素是岩藻黄素合成途径中重要的前体物质,陈晗华和钱凯先(1997)发现不适于盐藻细胞生长的氮、磷浓度下反而利于 β -胡萝卜素的积累。值得注意的是,铜藻在50~500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理下,短期内即起到明显的作用效果,但当继续培养至10 d时,MeJA浓度为50、100和200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的3个处理组藻体的生理生化指标基本已恢复至对照组水平,尤其是岩藻黄素的含量各处理组均与对照无显著差异。500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA处理短期内对铜藻的生长产生了抑制,在逆境胁迫条件下,岩藻黄素作为一种次生代谢产物,其含量出现增加的现象,培养10 d时胁迫解除,藻体的生长有所恢复,叶绿素 a 、可溶性蛋白的含量以及抗氧化酶SOD和CAT的活性仍有显著升高,表明铜藻的光合能力提高,在一定程度上抗逆性增强,反而不利于岩藻黄素的积累。因此我们推测藻类的生长和岩藻黄素的积累是两个复杂而又矛盾的生物

控制过程,在一些不适于生长的条件下更有利于岩藻黄素的积累,但这还需要大量的研究论证。

MeJA诱导藻类岩藻黄素含量变化的原因还没有明确,俞凯等(2017)研究发现一定浓度的MeJA能促进三角褐酯藻(*Phaeodactylum tricornutum*)岩藻黄素含量的积累和合成途径中关键基因的表达。潘益芳等(2015)和陈俊粤等(2017)发现MeJA能调控绿色杜氏藻(*Dunaliella salina*)岩藻黄素合成的上游途径——类胡萝卜素合成过程中相关酶的表达。因此推测MeJA诱导岩藻黄素含量变化的原因是以信号分子的形式参与到代谢途径中,通过相关基因表达、蛋白表达及酶活性,直接或间接的对岩藻黄素的合成进行调控,影响其含量。但是由于褐藻岩藻黄素的生物合成途径无论是从生物化学水平还是从分子生物学水平都尚未得到完整的阐述,具体的代谢调控机制还有待于进一步深入开展。

参考文献(References)

- Agarwal S, Sairam RK, Srivastava GC, et al (2005). Role of ABA, salicylic acid, calcium and hydrogen peroxide on antioxidant enzymes induction in wheat seedlings. *Plant Sci*, 169 (3): 559–570
- Cai KZ, Dong TX, Xu T (2006). The physiological roles and resistance control in stress environment of jasmonates. *Ecol Environ*, 15 (2): 397–404 (in Chinese with English abstract) [蔡昆争, 董桃杏, 徐涛(2006). 茉莉酸类物质(JAs)的生理特性及其在逆境胁迫中的抗性作用. *生态环境学报*, 15 (2): 397–404]
- Chen HH, Qian KX (1997). The effect of nitrogen and phosphorus on the growth and β -carotene accumulation of *Dunaliella salina*. *J Zhejiang Univ (Nat Sci)*, 31 (6): 731–736 (in Chinese with English abstract) [陈晗华, 钱凯先(1997). 氮、磷对盐藻生长及其 β -胡萝卜素积累的影响. *浙江大学学报(自然科学版)*, 31 (6): 731–736]
- Chen JY, Gong YF, Ma YR, et al (2017). Bioinformatic analysis and induced expression of isopentenyl diphosphate isomerase gene (*DvIPI*) from *Dunaliella viridis*. *Life Sci Res*, 21 (3): 201–207 (in Chinese with English abstract) [陈俊粤, 龚一富, 马颖瑞等(2017). 绿色杜氏藻异戊烯基焦磷酸异构酶基因(*DvIPI*)的生物信息学与诱导表达分析. *生命科学研究*, 21 (3): 201–207]
- Chen Y, Weng LQ, Zheng CL, et al (2018). Effects of plant growth regulators on galls formation of *Zizania latifolia*. *Plant Physiol J*, 54 (10): 1605–1614 (in Chinese with English abstract) [陈玥, 翁丽青, 郑春龙等(2018). 植物

- 生长调节剂对茭白孕菱的作用研究. 植物生理学报, 54 (10): 1605–1614]
- Dummermuth AL, Karsten U, Fisch KM, et al (2003). Responses of marine macroalgae to hydrogen-peroxide stress. *J Exp Mar Biol Ecol*, 289 (1): 103–121
- Gundlach H, Müller MJ, Kutchan TM, et al (1992). Jasmonic acid is a signal transducer in elicitor-induced plant cell cultures. *Proc Natl Acad Sci USA*, 89 (6): 2389–2393
- Hirata T, Tanaka J, Iwami T, et al (2003). Ecological studies on the community of drifting seaweeds in the south-eastern coastal waters of Izu Peninsula, central Japan. II: Seasonal changes in plants showing maximum stipe length in drifting seaweed communities. *Phycol Res*, 51 (3): 186–191
- Hou SN, Zou TL, Wang FJ, et al (2017). Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on the growth and stress resistance of *Pyropia haitanensis*. *Mar Sci*, 41 (1): 104–112 (in Chinese with English abstract) [侯赛男, 邹同雷, 汪芳俊等(2017). 茉莉酸甲酯和水杨酸对坛紫菜生长与抗逆性的影响. 海洋科学, 41 (1): 104–112]
- Huang BX, Ding LP, Qin S, et al (2018). The taxonomical status and biogeographical distribution of *Sargassum horneri* with the origin analysis of its drifting population in the end of 2016 at the western Yellow Sea. *Oceanol Limnol Sin*, 49 (1): 214–223 (in Chinese with English abstract) [黄冰心, 丁兰平, 秦松等(2018). 铜藻的分类地位、生物地理分布以及2016年底黄海漂浮铜藻源头的初步分析. 海洋与湖沼, 49 (1): 214–223]
- Kang SM, Min JY, Kim YD, et al (2006). Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on the production of bilobalide and ginkgolides in cell cultures of *Ginkgo biloba*. *In Vitro Cell Dev Biol: Plant*, 42 (1): 44–49
- Li HY, Liu TH, Jiang XD, et al (2018). Optimization of ultrasonic enhanced extraction of fucoxanthin from *Sargassum horneri*. *J Agr Sci Tech*, 20 (9): 146–153 (in Chinese with English abstract) [李红艳, 刘天红, 姜晓东等(2018). 超声辅助乙醇提取铜藻中岩藻黄素的工艺研究. 中国农业科技导报, 20 (9): 146–153]
- Lu N, Zang XN, Zhang XC, et al (2012). Effects of stress on antioxidant enzyme system in algae. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 58 (2): 119–124 (in Chinese with English abstract) [鹿宁, 臧晓南, 张学成等(2012). 逆境胁迫对藻类抗氧化酶系统的影响. 武汉大学学报(理学版), 58 (2): 119–124]
- Luan Q (2018). Effects of different environment and processing conditions on the growth and nutrient components of Phaeophyta (dissertation). Yantai, Shandong: Yantai University (in Chinese with English abstract) [栾青(2018). 不同环境条件和加工条件对经济褐藻生长及营养组成的影响(学位论文). 山东烟台: 烟台大学]
- Lü F, Ding G, Wu HY, et al (2018b). Effects of uniconazole on growth of antioxidation system in *Sargassum horneri*. *Oceanol Limnol Sin*, 49 (2): 361–367 (in Chinese with English abstract) [吕芳, 丁刚, 吴海一等(2018b). 烯效唑对铜藻(*Sargassum horneri*)生长及抗氧化系统的影响. 海洋与湖沼, 49 (2): 361–367]
- Lü F, Guo W, Ding G, et al (2018a). Analysis of the similarity of ITS and *coxI* sequences of *Sargassum horneri* along the offshore of China. *Prog Fish Sci*, 39 (6): 141–146 (in Chinese with English abstract) [吕芳, 郭文, 丁刚等(2018a). 中国近海铜藻ITS与*coxI*序列相似性分析. 渔业科学进展, 39 (6): 141–146]
- Lü F, Wu HY, Ding G, et al (2019). Effects of triacontanol on the growth and fucoxanthin content of *Sargassum horneri*. *J Fish China*, 43 (4): 1048–1057 (in Chinese with English abstract) [吕芳, 吴海一, 丁刚等(2019). 三十烷醇对铜藻生长及岩藻黄素含量的影响. 水产学报, 43 (4): 1048–1057]
- Pan YF, Gong YF, Yu K, et al (2015). Bioinformatics analysis and expression study of *DHDDS* of *Dunaliella viridis*. *Biotechnol Bull*, 31 (7): 101–108 (in Chinese with English abstract) [潘益芳, 龚一富, 俞凯等(2015). 绿色杜氏藻DHDDS基因生物信息学分析及表达研究. 生物技术通报, 31 (7): 101–108]
- Raman V, Ravi S (2011). Effect of salicylic acid and methyl jasmonate on antioxidant systems of *Haematococcus pluvialis*. *Acta Physiol Plant*, 33 (3): 1043–1049
- Smetacek V, Zingone A (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504 (7478): 84–88
- Wang XW, Wang LL, Gong YF, et al (2011). The effects of methyl jasmonate (MeJA) on the astaxanthin production and *dxs* gene expression of *Haematococcus pluvialis*. *J Fish China*, 35 (12): 1822–1828 (in Chinese with English abstract) [王鑫威, 王丽丽, 龚一富等(2011). 茉莉酸甲酯对雨生红球藻虾青素含量和*dxs*基因表达的影响. 水产学报, 35 (12): 1822–1828]
- Wasternack C, Hause B (2013). Jasmonates: biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth and development. An update to the 2007 review in *Annals of Botany*. *Ann Bot*, 111 (6): 1021–1058
- Yan XY, Liu YX, Wu YP, et al (2014). Optimizing the processes of extracting and purifying fucoxanthin from *Laminaria japonica*. *J Chin Inst Food Sci Tech*, 14 (3): 115–121 (in Chinese with English abstract) [闫相勇, 刘翼翔, 吴永沛等(2014). 海带岩藻黄素的提取及纯化工艺研究. 中国食品学报, 14 (3): 115–121]
- Yu K, Gong YF, Zhu SQ, et al (2017). Effects of different exogenous elicitors on *lcyb* gene transcription and fucoxanthin content in *Phaeodactylum tricornutum*. *J Agri Biotechnol*, 25 (12): 2009–2017 (in Chinese with English

- abstract) [俞凯, 龚一富, 朱帅旗等(2017). 不同外源诱导子对三角褐指藻*lcyb*基因转录及其岩藻黄素含量的影响. 农业生物技术学报, 25 (12): 2009–2017]
- Yu LJ, Zhu M, Liu XF, et al (1999). Effect of methyl jasmonate on taxol biosynthesis of embryo cell line in *Taxus chinensis*. J Wuhan Bot Res, 17 (4): 371–374 (in Chinese with English abstract) [余龙江, 朱敏, 刘幸福等(1999). 茉莉酸甲酯对中国红豆杉胚性细胞紫杉醇生物合成的影响. 武汉植物学研究, 17 (4): 371–374]
- Zhan DM, Lü F, Wang XY, et al (2018). Growth and seasonal constituent variations in brown alga *Sargassum thunbergii* at different tidal zones in coastal Rongcheng, Shandong Province. J Dalian Ocean Univ, 33 (3): 295–299 (in Chinese with English abstract) [詹冬梅, 吕芳, 王翔宇等(2018). 山东省荣成海区潮间带鼠尾藻生长及其化学组分的季节性变化. 大连海洋大学学报, 33 (3): 295–299]
- Zhang L, Gong YF, Liu XD, et al (2013). Effects of exogenous MeJA stress on physiological and biochemical characteristics of *Dunaliella salina*. J Biol, 30 (3): 38–42 (in Chinese with English abstract) [章丽, 龚一富, 刘晓丹等(2013). 外源MeJA胁迫对盐生杜氏藻生理生化特性的影响. 生物学杂志, 30 (3): 38–42]
- Zhang WY, Gao BY, Lei XQ, et al (2015). Progress on physicochemical and biological properties, preparation techniques and physiological activities of fucoxanthin. Chin J Mar Drugs, 34 (3): 81–95 (in Chinese with English abstract) [张文源, 高保燕, 雷学青等(2015). 岩藻黄素的理化与生物学特性、制备技术及其生理活性研究进展. 中国海洋药物, 34 (3): 81–95]
- Zhu XC, Zhang HM, Nan WB (2017). Research progress on regulation of ABA in plant root development. Plant Physiol J, 53 (7): 1123–1130 (in Chinese with English abstract) [朱晓琛, 张汉马, 南文斌(2017). 脱落酸调控植物根系生长发育的研究进展. 植物生理学报, 53 (7): 1123–1130]
- Zhu Y, Wang LL, Chai YB, et al (2010). Effects of methyl jasmonate on the content of β -carotene of *Dunaliella salina*. J Ningbo Univ (Nat Sci Eng Ed), 23 (1): 13–17 (in Chinese with English abstract) [朱颖, 王丽丽, 柴芸彬等(2010). 茉莉酸甲酯对杜氏盐藻 β -胡萝卜素含量的影响. 宁波大学学报(理工版), 23 (1): 13–17]

Effect of methyl jasmonate on the growth, antioxidant system and fucoxanthin content of *Sargassum horneri*

LÜ Fang^{1,2}, DIND Gang^{1,2}, ZHAN Dong-Mei^{1,2}, WANG Xiang-Yu^{1,2}, WU Hai-Yi^{1,2,*}

¹Shandong Province Macroalgae Resources Conservation and Application Engineering Research Center, Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao, Shandong 266104, China

²Qingdao Macroalgae Engineering Technology Research Center, Qingdao, Shandong 266104, China

Abstract: To explore the effects of methyl jasmonate (MeJA) on the growth of *Sargassum horneri*, the relative growth rate (SGR), physiological and biochemical indexes, antioxidant system and the accumulation of fucoxanthin were compared respectively while the thalli were treated with different concentrations of MeJA. The results showed that after treatments with 50 and 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA, the algal growth was significantly promoted compared to control at 3 days, but there was no significant difference for further culture to 10 days. However, 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA significantly inhibited the growth of algae within 10 days. Physiological and biochemical analysis results revealed that within 3 days the chlorophyll *a* and carotenoid contents, SOD, CAT and POD activities were significantly increased when treated with 50–200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA, but the content of soluble protein had no variations. In 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment, the contents of chlorophyll *a*, carotenoid and soluble protein increased first, then decreased, after that it also increased, while the activities of SOD and POD improved, the CAT decreased. MDA contents in 50 and 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatments were no significant variations, while in 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment was slightly lower than control, yet in 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment was markedly elevated than control. After 10 days culture, the contents of chlorophyll *a*, soluble protein, SOD and CAT activities were still higher than control in 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment, but the other indexes returned to the level of the control. The fucoxanthin content increased by 12.55% and 18.17% compared to control after treated with 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA for 2 and 3 days. These findings provide essential materials for the impacts of MeJA on algal growth and the large-scale production of fucoxanthin of *Sargassum horneri*.

Key words: *Sargassum horneri*; methyl jasmonate; photosynthetic pigment; antioxidant system; fucoxanthin

Received 2018-12-13 Accepted 2019-04-24

This work was supported by the National Special Research Fund for Non-Profit Marine Sector (201505022), the Program of Shandong Province Modern Agricultural Technology System Innovation Team (SDAIT26) and the Shandong Major Agricultural Application Technology Innovation Project.

*Corresponding author (wuhaiyi1997@163.com).