

半叶马尾藻对重金属镉胁迫的生理响应

叶鹏浩, 韩婷婷, 付贵权, 谷阳光, 黄洪辉

(广东省渔业生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300)

摘要: 实验选取广东省沿海常见物种半叶马尾藻 (*Sargassum hemiphyllum*) 为研究对象, 采用室内半静态的实验方法, 研究了半叶马尾藻对不同浓度重金属镉离子 (Cd^{2+}) 胁迫的生理响应和耐受性, 为广东省沿海海区重金属污染修复提供依据。结果显示, 当 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 半叶马尾藻藻体中叶绿素 *a* (Chl *a*)、类胡萝卜素 (Car)、可溶性蛋白 (SP)、可溶性糖 (SS)、抗氧化酶 [超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT)] 活性与对照组之间均无显著差异 ($P>0.05$); 当 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5\sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 藻体中 Chl *a*、Car、SP、SS、SOD 和 CAT 活性均显著增加 ($P<0.05$)。当 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1\sim 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 藻体的丙二醛 (MDA) 摩尔质量浓度无显著差异 ($P>0.05$); 当 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5\sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 胁迫组藻体的 MDA 摩尔质量浓度显著升高 ($P<0.05$)。因此, 半叶马尾藻在 $\rho(\text{Cd}^{2+})\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下具有较强的抗逆性, 而过高浓度 Cd^{2+} 胁迫 ($>0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 会对藻体的光合作用和抗氧化功能产生负面影响。

关键词: 半叶马尾藻; Cd^{2+} 胁迫; 生理生化指标

中图分类号: Q 945.78

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Physiological response of *Sargassum hemiphyllum* to cadmium stress

YE Penghao, HAN Tingting, FU Guiquan, GU Yangguang, HUANG Honghui

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: *Sargassum hemiphyllum*, a common species in coastal waters of Guangdong Province, was selected to study its physiological response to different concentrations of heavy metal (Cd^{2+}) stress and its tolerance to Cd^{2+} stress in laboratory semi-static experiments, so as to provide a basis for remediation of heavy metal pollution in that area. The results show that chlorophyll *a* (Chl *a*), carotenoid (Car), soluble protein (SP), soluble sugar (SS) and antioxidant enzyme activity (SOD and CAT) of *S. hemiphyllum* at Cd^{2+} concentration of $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ had no significant difference with the control ($P>0.05$). The contents of Chl *a*, Car, SP, SS, SOD and CAT at $\rho(\text{Cd}^{2+})$ of $0.5\sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, were significantly higher than those of the control ($P<0.05$); there was no significant change in MDA contents under Cd^{2+} concentration of $0.1\sim 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P>0.05$), and significant increase at Cd^{2+} concentration of $2.5\sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$). Therefore, *S. hemiphyllum* had stronger stress resistance at Cd^{2+} concentration of $\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while excessive Cd^{2+} stress of $>0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ will be harmful for its photosynthesis and antioxidant function.

Key words: *Sargassum hemiphyllum*; Cd^{2+} stress; physiological and biochemical indicators

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-03-19

资助项目: 国家重点研发计划重点专项 (2018YFC1407501); 国家自然科学基金项目 (31602183); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目 (2019ZD0104); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2019TS03)

作者简介: 叶鹏浩 (1995—), 男, 本科, 从事海洋与渔业生态环境保护研究。E-mail: 583101288@qq.com

通信作者: 黄洪辉 (1972—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋与渔业生态环境保护研究。E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

工业化发展以来,人类活动对海洋的影响日益加剧,排放到水环境中的重金属最终汇集到海洋中,不仅会对海洋生物造成危害,还可通过食物链的富集和放大效应间接影响人类健康^[1-3]。改革开放40年来,中国经济快速发展,城市化和工业化已对我国沿海和河口地区产生不同程度的重金属污染^[1,4-5]。因此,对重金属污染水域的修复工作势在必行。传统的修复方法均存在一定的缺点,如化学沉淀法容易产生二次污染、活性炭吸附法成本高等。因此,越来越多的学者研究运用生物材料通过新陈代谢转移水体重金属的方法^[6-8]。

重金属镉(Cd)是一种环境中无处不在的非必需元素,即使有时水体Cd浓度低,也可在藻类和底泥中累积,被水体中鱼、贝和虾蟹类吸收,通过食物链富集,最终可能进入人体造成公害^[9]。相关研究表明,我国沿海海洋环境和贝类已受到不同程度的Cd污染和危害^[10]。海南新村港近海海水和表层沉积物重金属污染与生态风险评价中海水中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0\sim 0.58\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,表层沉积物 $w(\text{Cd}^{2+})$ 年均水平为 $0.175\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,对该海域生态系统的潜在生态风险属于中等水平^[11]。广西茅尾海水体中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.03\sim 0.34\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[12];南中国海表层海水 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.047\sim 0.324\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[13],已超过我国海水水质三类水标准。已有研究表明,Cd²⁺胁迫下铜藻(*Sargassum horneri*)岩藻黄素和褐藻多酚的含量明显下降,且活性成分随Cd²⁺胁迫浓度的增加而减少,而褐藻胶在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组与对照组无明显差异^[14]。尹文珂等^[15]研究显示,四尾栅藻(*S. quadricauda*)色素含量随Cd²⁺质量浓度增加而降低,可溶性蛋白含量在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $1.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值,之后随 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 上升而减小,四尾栅藻对低浓度Cd²⁺具有良好的耐受性,可耐受 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $1.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

半叶马尾藻(*Sargassum hemiphyllum*)隶属于褐藻门、马尾藻科、马尾藻属,生长在低潮带或潮下带,广泛分布于中国广东、福建、台湾、浙江沿岸,不仅可用于提取褐藻胶等原料,还可以吸收海水中的氮、磷等营养元素,对海水的净化和修复起重要作用,是人工修复或重建海藻场的重要物种之一。韩婷婷等^[16-17]研究了3种氮源加富和充气培养对半叶马尾藻生长及生化组成的影响,付贵权等^[18]研究发现半叶马尾藻可作为低质量浓度铜离子 $[\rho(\text{Cu}^{2+})\leq 0.05\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}]$ 污染海域的生物修复物

种,目前尚未见有运用半叶马尾藻修复海洋Cd²⁺污染的研究报道。

本文以大亚湾海域优势种半叶马尾藻为研究对象,探讨Cd²⁺胁迫对半叶马尾藻的光合色素、可溶性糖、可溶性蛋白和抗氧化酶活性等生理生化指标的影响,为广泛运用半叶马尾藻修复中国东南沿海重金属污染海域提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

于广东大亚湾杨梅坑的岩礁潮间带采集半叶马尾藻,并于中国水产科学研究院南海水产研究所深圳试验基地筛选健康藻体,人工清洗去除表面附着物,并放置于砂滤自然海水[水温(20±2)℃,盐度33,pH 8.0]的水族箱中暂养,自然光照,周期为12 L:12 D,24 h换一次水,24 h不间断充气。

实验海水为砂滤自然海水,经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后进行高压灭菌处理,并制备f/2培养基做备用,测得海水盐度33,pH 8.0, $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 采用火焰原子吸收分光光度法测定,低于检出限($0.001\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),参照GB 17378.6—2007。

1.2 实验设置

选取相同部位的半叶马尾藻藻体[鲜质量(1.50±0.01)g]放入每个锥形瓶中,实验组添加适量的氯化镉得到Cd²⁺胁迫所需的质量浓度,分别为 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未添加氯化镉的为对照组,每组设置3个平行,置于20℃、光强 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光照周期12 L:12 D的GXZ智能型光照培养箱中培养,光照期间每隔2 h人工摇晃培养液使其混合均匀。实验选择 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $12.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 4个浓度梯度,分别验证轻度污染、中度污染、重度污染和最大耐受条件的抗逆情况。

分别于实验第0、第4、第8、第12、第24和第48小时取藻体-80℃冷冻保存,用于测定其生理生化指标。

1.3 研究方法

1.3.1 光合色素[叶绿素a(Chl a)和类胡萝卜素(Car)]的测定 参照韩婷婷等^[19]和Wellburn^[20]的方法,称量0.10 g新鲜半叶马尾藻藻体加入少许石英砂和碳酸镁,并吸取80%的丙酮10 mL研磨,研磨破碎后置于4℃冷藏萃取24 h,在 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心15 min,吸取上清液,测定其在波

长 665 nm、652 nm、510 nm 和 480 nm 处的吸光值, 根据公式计算 Chl *a* 和 Car 的质量分数 (mg·g⁻¹):

$$w_{\text{Chl } a} = (16.29 \times A_{665} - 8.54 \times A_{652}) \times V/W \times 1000 \quad (1)$$

$$w_{\text{Car}} = 7.6 \times (A_{480} - 1.49 \times A_{510}) \times V/W \times 1000 \quad (2)$$

式中 *A* 为吸光值, *V* 为浸提丙酮的体积 (mL), *W* 为藻体鲜质量 (g)。

1.3.2 可溶性蛋白 (SP) 测定 采用南京建成试剂盒考马斯亮蓝法测定。

1.3.3 可溶性糖 (SS) 测定 参照 Koehert^[21] 的苯酚-硫酸法, 称量 0.30 g 新鲜半叶马尾藻藻体, 加入适量蒸馏水 (少于 20 mL) 研磨均匀, 80 °C 恒温水浴 30 min, 待冷却后过滤定容至 20 mL 为待测溶液。吸取适量待测液, 并加入 1 mL 苯酚试剂和 5 mL 浓硫酸, 在 485 nm 波长下测其吸光值 (mg·g⁻¹), 计算公式为:

$$w_{\text{SS}} = C \times V/W \times 1000 \times a \quad (3)$$

式中 *C* 为葡萄糖标准曲线中查得的值 (mg); *V* 为样品提取液体积 (mL); *a* 为显色时取样量 (mL); *W* 为样品鲜质量 (g)。

1.3.4 抗氧化酶 (SOD 和 CAT) 活性和丙二醛 (MDA) 的测定 采用南京建成试剂盒羟胺法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性 (A001-1-1), 用南京建成试剂盒可见光法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性 (A007-1-1), 丙二醛 (MDA) 用南京建成试剂盒硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件对数据进行单因素方差分

析, 并用最小显著差异法 (LSD) 比较各处理组间的显著性差异 ($P \leq 0.05$); 处理数据后用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果

2.1 Cd²⁺胁迫对半叶马尾藻的光合色素的影响

Cd²⁺胁迫对半叶马尾藻的光合色素合成有一定促进作用 (图 1), 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 0.1 mg·L⁻¹ 胁迫组中, *w*(Chl *a*) 和 *w*(Car) 与对照组无显著差异 ($P > 0.05$); 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 0.5 mg·L⁻¹ 和 2.5 mg·L⁻¹ 胁迫组中, 实验结束时 *w*(Chl *a*) 和 *w*(Car) 显著高于对照组 ($P < 0.05$), *w*(Chl *a*) 分别增加 9.9% 和 15.8%, *w*(Car) 分别增加 15.4% 和 27.9%; $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 12.5 mg·L⁻¹ 的胁迫组, 在 4~12 h 实验期间 *w*(Chl *a*) 和 *w*(Car) 显著低于对照组 ($P < 0.05$), 12 h 后出现明显上升趋势, 在实验第 48 小时 *w*(Chl *a*) 和 *w*(Car) 显著高于对照组 ($P < 0.05$), 分别增加了 10.2% 和 12.1%。

2.2 Cd²⁺胁迫对半叶马尾藻的 SS 和 SP 的影响

Cd²⁺胁迫对半叶马尾藻的 SS 和 SP 合成有一定促进作用 (图 2), 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 0.1 mg·L⁻¹ 的胁迫组中, *w*(SP) 与对照组无显著差异 ($P > 0.05$), *w*(SS) 在第 4~第 24 小时均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 第 48 小时恢复到对照组水平 ($P > 0.05$); 而在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 0.5 mg·L⁻¹、2.5 mg·L⁻¹ 和 12.5 mg·L⁻¹ 的胁迫组中, *w*(SP) 和 *w*(SS) 均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 第 48 小时 *w*(SS) 分别比对照组增加了 20.2%、60.8%

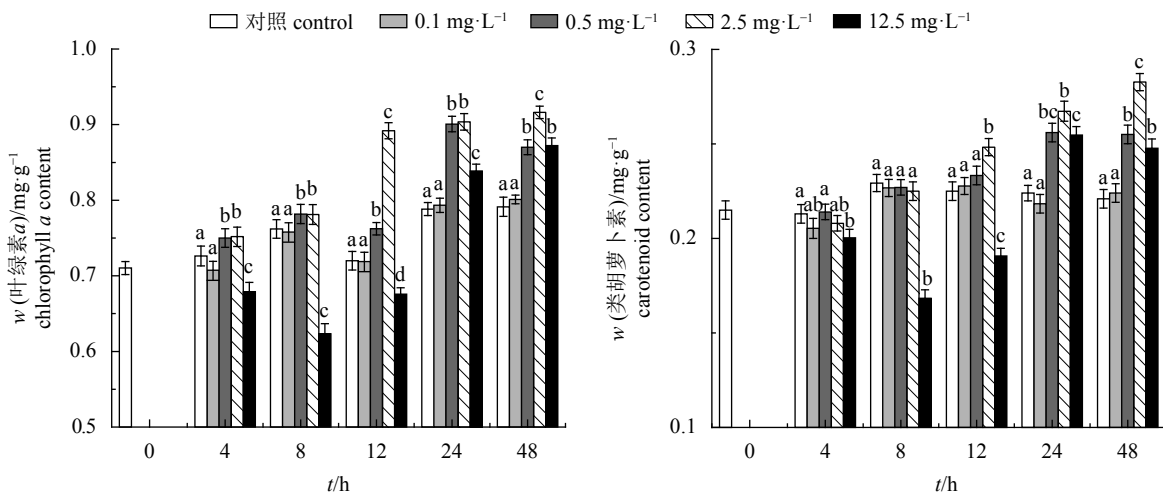


图1 重金属镉离子对半叶马尾藻叶绿素*a*和类胡萝卜素的影
不同字母表示同一胁迫时间内不同处理组间有显著性差异 ($P < 0.05$), 后图同此

Fig.1 Effects of Cd²⁺ on Chl *a* and Car of *S. hemiphyllum*

Different letters represent significant difference among different treatments at the same time ($P < 0.05$). The same case in the following figures.

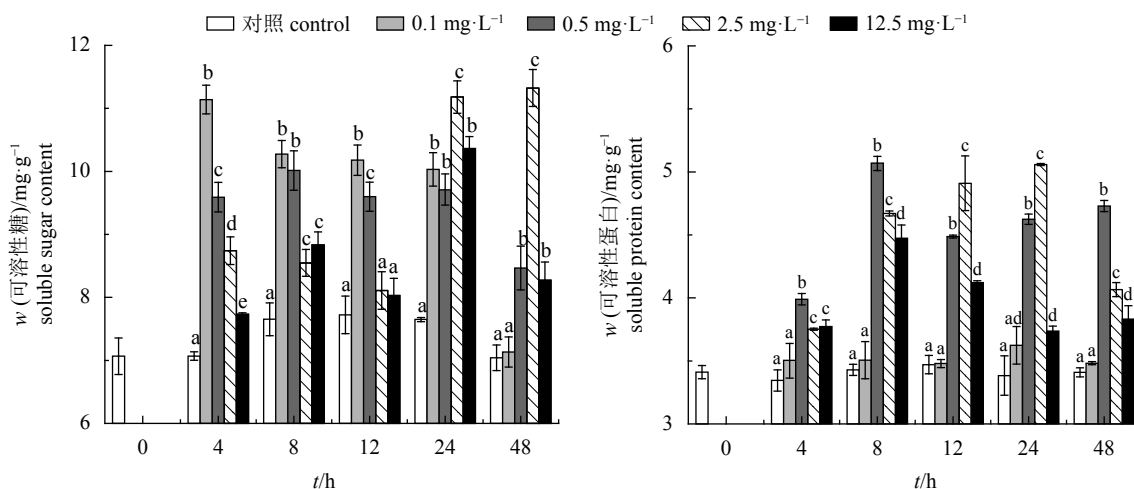


图2 重金属镉离子对半叶马尾藻可溶性糖和可溶性蛋白的影响

Fig.2 Effects of Cd^{2+} on soluble sugar and soluble protein of *S. hemiphyllum*

和 17.5%， $w(\text{SP})$ 分别比对照组增加了 38.7%、19.3% 和 2.4%，其中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组对 SS 合成促进最大， $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组对 SP 合成促进最大。

2.3 Cd^{2+} 胁迫对半叶马尾藻抗氧化酶系统的影响

Cd^{2+} 胁迫对半叶马尾藻抗氧化酶系统的影响显著 (图 3)，对照组藻体的抗氧化酶各项指标保持不变，说明藻体没有产生抗逆反应。

SOD 活性在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中，除在第 12 小时明显高于对照组 ($P < 0.05$)，其余与对照组无显著差异 ($P > 0.05$)；在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中，SOD 活性显著高于对照组 ($P < 0.05$)，至第 48 小时，分别比对照组升高 16.9%、45.2% 和 41.6%，其中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对 SOD 活性影响最大。

CAT 活性 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\text{prot}$) 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中，除在第 8 和第 12 小时明显高于对照组 ($P < 0.05$)，其余与对照组无显著差异 ($P > 0.05$)；在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中，第 48 小时显著高于对照组 ($P < 0.05$)，分别比对照组升高 47.4%、63.9% 和 57.3%，其中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组对 CAT 活性影响最大。

MDA 摩尔质量浓度 ($\text{nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$) 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组在第 4~第 12 小时比对照组显著增加 ($P < 0.05$)，第 48 小时 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组无显著差异 ($P > 0.05$)；而 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组中，MDA 水平均显著高于对照组 ($P < 0.05$)，结束时分别比对照组增加 17.5%、22.8%、92.0% 和 67.0%，其中 $\rho(\text{Cd}^{2+})$

为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组对 MDA 水平影响最大。

3 讨论

大型海藻的生长状况受多种环境因子的影响，如温度、pH、营养盐等^[22-23]，而且还受重金属铜、镉等影响^[24]。研究发现，真江蓠 (*Gracilaria verrucosa*)、孔石莼 (*Ulva pertusa*)^[25]、龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*)^[26] 等大型海藻对 Cd 都有很强的吸附和耐受性，在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 大于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下才会破坏龙须菜藻体中过氧化物酶的活性，出现生长抑制^[27]。

本研究表明，半叶马尾藻在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组中第 4~第 12 小时 Chl *a* 和 Car 质量浓度出现明显下降，随后逐渐升高显著高于对照组 ($P < 0.05$)。朱喜锋等^[28] 研究表明， Cd^{2+} 通过损害光合作用器官、结合生物大分子的活性位点 (如 Cd^{2+} 取代叶绿素分子中心的 Mg^{2+} 从而破坏叶绿素结构) 影响光合作用；同时，藻类自身也会形成植物络合素、金属硫蛋白等与重金属结合从而增加藻类对重金属的耐受性^[29]。Chl *a* 和 Car 是大型海藻光合作用的主要色素，Chl *a* 含量的变化是衡量藻体衰老状况的重要指标，第 48 小时实验结束时， $\rho(\text{Cd}^{2+}) \leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下半叶马尾藻 Chl *a* 和 Car 含量与对照组没有显著性差异，说明低浓度的 Cd^{2+} 对半叶马尾藻的光合作用影响不大； $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \rho(\text{Cd}^{2+}) \leq 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下半叶马尾藻 Chl *a* 和 Car 含量均高于对照组，说明半叶马尾藻对高浓度 Cd^{2+} 胁迫有较强的抗逆性。

SP 和 SS 是衡量植物代谢水平的重要指标，

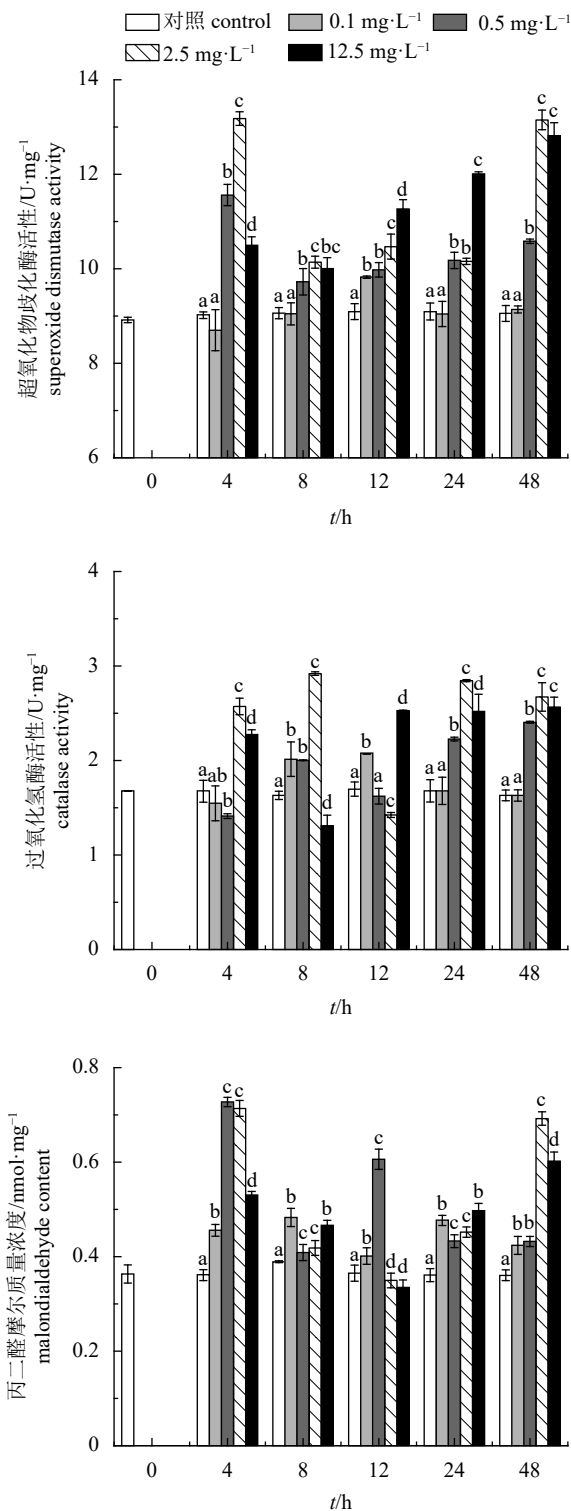


图3 重金属镉离子对半叶马尾藻超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性和丙二醛水平的影响

Fig.3 Effects of Cd²⁺ on SOD and CAT activities, MDA content of *S. hemiphylum*

Cd 胁迫下植物膜蛋白会明显增加^[30], 实验第 4~第 24 小时 SP 和 SS 含量均明显上升, 只有 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组在 48 h 后恢复到对照组水平, $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

下胁迫处理 48 h 后 SP 和 SS 含量明显高于对照组。本研究结果表明, $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 不高于 $12.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫浓度下可诱导 SP 和 SS 合成, 从而降低 Cd^{2+} 对藻体的毒性, 这可能是半叶马尾藻对环境过量 Cd^{2+} 毒害自我保护机制的响应, 但高浓度的 Cd^{2+} 会对藻体蛋白质合成与代谢起破坏作用^[31]。

在重金属胁迫下, 藻体会产生大量的活性氧自由基 (ROS) 从而对藻体蛋白和核酸等产生损害, 破坏代谢平衡。与此同时, 藻体会产生大量的抗氧化酶 (如 SOD、CAT 等) 适应胁迫环境, SOD 主要清除活性氧自由基, CAT 则主要清除 SOD 产生的 H_2O_2 , 从而保护细胞。当重金属浓度过高破坏抗氧化酶保护系统则会引发活性氧积累, 进而引起膜组分不饱和脂肪酸的过氧化, MDA 水平增加。因此, MDA 水平可以显示细胞质膜过氧化程度和对逆境条件反应的强弱^[32]。本研究中, $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组中, 藻体 Chl *a*、Car 和 SP 在 48 h 内与对照组均无显著性差异, 在该浓度胁迫下藻体的光合色素和 SP 含量保持稳定, 说明藻体的光合作用产能以及蛋白代谢正常运作, 而 SS、SOD 和 CAT 出现波动, 在第 48 小时结束时与对照组无显著差异, 说明在 $0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组中藻体通过加强糖代谢和增加抗氧化酶含量进行抗逆, 并在 48 h 内适应该胁迫环境, 同时 MDA 水平显著高于对照组, 说明在该浓度 Cd^{2+} 胁迫下藻体出现抗逆现象, 以此维持正常的代谢平衡; 在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组中, 实验结束时光合色素、SS、SP、SOD 和 CAT 含量显著性高于对照组, 说明在该浓度胁迫下藻体除了通过加强糖代谢和增加抗氧化酶含量方式进行抗逆外, 同时需要加强光合作用, 增加能量和加强蛋白代谢进行共同抗逆, 其 MDA 水平与 $0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组没有显著差异, 说明在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下, 半叶马尾藻通过增强抗逆系统, 藻体依然能保持正常的代谢平衡; 而在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中, 光合色素含量持续增加, 抗逆反应依然需要大量的能量消耗, SS 含量在 24 h 后出现大幅增加, SP 则在第 24 小时上升至最高, 48 h 后出现下降, 但依然显著高于对照组, 该浓度下 48 h 后 SS 含量最高说明藻体内糖代谢旺盛有利于对 Cd^{2+} 的吸附, 同时 SOD 和 CAT 活性以及 MDA 含量在第 48 小时时远高于对照组, 抗氧化酶系统平衡失常, 产生大量活性氧, 该浓度的 Cd^{2+} 胁迫已对藻体的正常代谢造成了破坏, 但尚未达到破坏 MDA 水平的程度, 还处于藻膜脂质

过氧化加剧状态；在 $\rho(\text{Cd}^{2+})$ 为 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胁迫组中，光合色素、SS、SP 和抗氧化酶以及 MDA 含量均低于 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫组，说明藻体不能继续加强光合作用产能维持抗逆，同时也无法继续利用糖代谢和蛋白代谢进一步吸附重金属镉，抗氧化酶系统已经受到破坏，所以继续增加 Cd^{2+} 并不会使藻体产生更强的抗逆性。

综上，轻度的 Cd^{2+} 污染对半叶马尾藻的生理指标无显著影响；中度 Cd^{2+} 污染下藻体通过加强光合作用、蛋白代谢、糖代谢和抗氧化物系统运作 4 种方式增强抗逆性，藻体产生较强的耐受性；而重度 Cd^{2+} 污染下，各项生理指标出现异常增高，藻体内积累大量活性氧，抗氧化酶系统失衡，无法正常代谢；最大耐受条件下，藻体各项生理指标相较于重度污染降低，活性氧大量累积，抗氧化酶系统受到破坏。因此，半叶马尾藻对 Cd^{2+} 胁迫具有一定的适应性和耐受性，本研究可为运用半叶马尾藻修复中国东南沿海中度重金属 Cd^{2+} ($\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 污染海域提供依据。

参考文献:

- [1] PAN K, WANG W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Sci Total Environ*, 2012: 3-16.
- [2] KAPPEL C V, HALPERN B S, SELKOE K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 319(5865): 948-952.
- [3] GU Y G, HUANG H H, LIU Y, et al. Non-metric multidimensional scaling and human risks of heavy metal concentrations in wild marine organisms from the Maowei Sea, the Beibu Gulf, South China Sea[J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2018, 59: 119-124.
- [4] WANG S L, XU X R, SUN Y X, et al. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: a review[J]. *Mar Pollut Bull*, 2013, 76(1): 7-15.
- [5] GU Y G, LI Q S, FANG J H, et al. Identification of heavy metal sources in the reclaimed farmland soils of the pearl river estuary in China using a multivariate geostatistical approach[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2014, 105: 7-12.
- [6] 李慧卿, 孙泽臣, 常丹, 等. 毛建对重金属 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 吸附的研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(10): 42-45, 46.
- [7] 王荣霞, 黄敏, 陈傅晓, 等. 棒叶蕨藻变种对重金属 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 胁迫的生理响应[J]. *渔业现代化*, 2017, 44(2): 25-29, 37.
- [8] 黄鹤忠. 江蓠对 N、P 和重金属 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 污染的去毒效应及其生理生化响应[D]. 扬州: 扬州大学, 2013: 92-104.
- [9] 罗正明, 贾雷坡, 刘秀丽, 等. 水环境镉对水生动物毒性的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(15): 376-381.
- [10] LU G Y, KE C H, ZHU A, et al. Oyster-based national mapping of trace metals pollution in the Chinese coastal waters[J]. *Environ Pollut*, 2017, 224: 658-669.
- [11] 巩慧敏, 刘永, 肖雅元, 等. 近海海水和表层沉积物重金属污染与生态风险评价——以海南新村港为例[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(4): 700-708.
- [12] 雷富, 陈宪云, 许铭本, 等. 广西茅尾海海水和表层沉积物中重金属污染的调查及评价[J]. *广西科学院学报*, 2013, 29(3): 176-180, 185.
- [13] 刘慧杰, 刘文君, 刘继平, 等. 南中国海表层海水重金属含量及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3891-3898.
- [14] 吕芳, 詹冬梅, 郭文, 等. 重金属镉对铜藻生长及其生物活性成分积累的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2017(6): 664-670.
- [15] 尹文珂, 程金凤, 肖婉露, 等. 四尾栅藻对重金属镉胁迫的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 633-638.
- [16] 韩婷婷, 付贵权, 齐占会, 等. 充气培养对半叶马尾藻生长、营养盐吸收和生化组成的影响[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(2): 311-318.
- [17] 韩婷婷, 齐占会, 黄洪辉, 等. 3 种氮源加富对半叶马尾藻幼苗生长和生化组成的影响[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 159-166.
- [18] 付贵权, 韩婷婷, 巩秀玉, 等. 重金属 Cu^{2+} 胁迫对半叶马尾藻生长及生理生化特性的影响[J]. *南方水产科学*, 2015, 11(4): 34-39.
- [19] 韩婷婷, 方建光, 张继红, 等. 静止和充气培养条件下光强对龙须菜光合生理效应的影响[J]. *水产学报*, 2013, 37(12): 1801-1806.
- [20] WELLBUM A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. *J Plant Physiol*, 1994, 144(3): 307-313.
- [21] KOEHERT G. Carbohydrate determination by phenol-sulfuric acid method[M]. London: Cambridge University Press, 1978: 95-97.
- [22] 李恒, 李美真, 曹婧, 等. 温度对几种大型海藻硝氮吸收及其生长的影响[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 159-165.
- [23] 黄中坚, 钟志海, 宋志民, 等. 不同营养盐水平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(5): 30-38.
- [24] 王增焕, 林钦, 李刘冬, 等. 大型海藻对重金属镉、铜的富集动力学研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(1): 154-160.
- [25] 吕利云. 几种大型海藻对海水中重金属污染的生物修复能力研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 24-51.
- [26] 屈肖肖. 重金属 Pb、Cd 胁迫下龙须菜的富集效应及差异[D]. 汕头: 汕头大学, 2012: 38-33.
- [27] 余江, 杨宇峰, 聂湘平. 大型海藻龙须菜对重金属镉胁迫的响应[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, 39(3): 83-90.
- [28] 朱喜锋. 重金属汞、铜和镉对三种大型经济海藻毒性效应的研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2010: 4-6.
- [29] 周文彬, 邱保胜. 藻类对重金属的耐性与解毒机理[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3): 265-272.
- [30] 戴灵豪, 史冬玲, 王林燕, 等. 镉胁迫下植物膜蛋白的研究进展[J]. *农业工程*, 2017(6): 153-156.
- [31] TUDOREANU L, PHILLIPS C J C. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants[J]. *Adv Agron*, 2004, 84(4): 121-157.
- [32] COLLEN J, PINTO E, PEDERSEN M. Induction of oxidative stress in the red macroalga *Gracilaria tenuistipitata*, by pollutant metals[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2003, 45(3): 337-342.