

文章编号: 1674 - 5566(2014)02 - 0208 - 07

pH 与盐度胁迫对鼠尾藻光合作用及抗氧化系统的影响

马兴宇^{1,2}, 刘福利², 梁洲瑞², 王飞久², 孙修涛², 汪文俊², 凌晶宇^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为研究鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 在逆境胁迫条件下光合作用能力的变化及抗氧化系统的调节机理, 利用液相氧电极技术和抗氧化酶试剂盒, 检测了 pH、盐度胁迫对鼠尾藻表观光合作用、色素含量、丙二醛 (MDA) 含量及抗氧化酶活性的影响。结果表明: (1) pH 6.0 与 pH 9.5 胁迫处理 24 h 后鼠尾藻表观光合速率均大幅下降, 48 h 后均与对照组 (pH 8.5) 差异显著 ($P < 0.05$); (2) pH 9.5 胁迫处理 48 h 后 SOD、CAT 活性均显著升高 ($P < 0.05$), MDA 含量呈先上升后下降趋势; (3) 盐度 15 胁迫处理 24 h, 盐度 20 与 25 胁迫处理 48 h 后表观光合速率显著低于对照组 (盐度 31, $P < 0.05$), 胁迫 72 h 后 3 个处理组表观光合速率有一定幅度的上升; (4) 盐度 20 胁迫处理 24 h 后 MDA 含量先上升后下降 ($P < 0.05$), SOD、CAT 活性由 24 h 至 48 h 时有一定幅度的上升。盐度 15 胁迫处理 72 h 后 MDA 显著上升 ($P < 0.05$), 而 SOD、CAT 活性较低。可以得出 pH 胁迫使鼠尾藻光合作用能力降低, 强碱性使藻体受到活性氧损伤。盐度为 15 时, 鼠尾藻抗氧化酶活力较低, 当高于 15 时, 抗氧化系统对活性氧有较高的清除能力。

研究亮点: 目前对鼠尾藻育苗及养殖技术研究较多, 而对于逆境胁迫下其光合能力与自身保护机制的研究还鲜见报道。本文将液相氧电极与抗氧化酶试剂盒结合使用, 阐述了 pH、盐度胁迫条件下光合系统与抗氧化系统的变化规律, 初步探讨了两系统之间的联系。

关键词: 鼠尾藻; pH; 盐度; 光合作用; 抗氧化系统

中图分类号: Q 945; S 917.3

文献标志码: A

鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 属于褐藻门 (Phaeophyta)、马尾藻科 (Sargassaceae)、马尾藻属 (*Sargassum*), 是一种重要的经济海藻^[1-2]。其生长在潮间带, 对浅海生态环境的维持和保护起重要作用。潮间带具有多变复杂的外界环境条件, 如长时间干露、强光直射、高温胁迫、pH 及盐度胁迫等, 对鼠尾藻的生长、繁殖影响较大, 因此开展外界环境条件对其胁迫的研究不仅具有理论意义, 也对其实际生态习性的了解与掌握有帮助。

藻类对于 pH 与盐度的变化有着不同的适应能力, 研究表明不同藻种, 同一种不同株系最适光合作用的 pH 可能不同^[3-4], 一般认为中性环境较为适宜, pH 小于 6.0 或者大于 9.0 就会抑制

藻的光合作用^[5]。潮间带大型海藻具有较宽的盐度耐受范围, 盐度在 20 ~ 30 之间具有较强的光合作用能力^[6], 但低盐度胁迫将会阻碍光合作用进行^[7-8]。环境胁迫将会导致活性氧在藻体内大量的积累, 从而干扰细胞内膜脂、核酸以及蛋白质的代谢^[9]。抗氧化酶与抗氧化剂是藻类去除体内多余活性氧的主要途径, 有研究表明^[10], 随着低盐度和高盐度胁迫程度的增加, 盐生隐杆藻 (*Aphanothece halophytica*) 的丙二醛含量增加, 同时抗氧化酶 (除过氧化氢酶) 活性与抗氧化剂含量也不断升高, 抵御了氧化伤害。目前, 有关鼠尾藻生理生态的研究主要集中在对适宜生长条件的探索与光合作用的研究^[11-12], 而对于其在逆境条件下的光合作用能力与抗氧化能力的变

收稿日期: 2013-10-13 修回日期: 2013-12-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2012AA10A413)

作者简介: 马兴宇 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海藻生物学。E-mail: maxingyugood@163.com

通信作者: 王飞久, E-mail: wangfj@ysfri.ac.cn

化报道较少^[13-14]。本文研究了鼠尾藻在 pH、盐度胁迫下的光合作用能力及抗氧化酶系的活性,旨在探讨鼠尾藻在逆境条件下的适应能力与抗逆机制。

1 材料与方法

1.1 实验材料及培养方法

实验用鼠尾藻采自青岛太平角野生种群,挑选发育完善的健康个体带回实验室,用过滤灭菌海水清洗干净,在光照培养箱暂养一周,暂养条件为 20 ℃,光照 220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,培养液为灭菌海水。暂养结束后设置:(1)酸性处理组(pH 6.0)、碱性处理组(pH 9.5)、对照组(pH 8.5)3 个酸碱梯度组;(2)盐度为 25、20、15 处理组和对照组(盐度 31)共 4 个盐度梯度组进行培养,其他条件同暂养,每组 3 个平行。随着鼠尾藻光合作用的进行,酸处理组与对照组的 pH 逐渐升高,碱处理组稍有减小,为减少由此带来的误差,各组每 6 小时换一次重新调节好 pH 的培养液;藻体的培养对盐度几乎无影响。各组从培养开始每 24 小时取部分鼠尾藻测定表观光合作用,并取部分材料冷冻保存(-80 ℃)用以测定鼠尾藻 MDA 含量、抗氧化酶活性,共取到第 72 小时。培养 6 d 后测定各组鼠尾藻色素含量。

1.2 测定方法

1.2.1 表观光合作用测定

用液相氧电极(Hansatech 英国)测定鼠尾藻表观光合速率。反应体系温度由恒温水浴系统控制(Julabo 德国)恒温 20 ℃,反应介质为灭菌海水,用连二亚硫酸钠标定零刻度线,由仪器自带软件得出数值。

1.2.2 色素含量测定

参照 JEFFREY 和 HUMPHREY^[15]和王丽梅等^[16]方法,用 80% 的丙酮溶液研磨材料至无色,4 000 r/min 离心 15 min,弃去沉淀后定容色素溶液。用 UV-2802 型紫外可见分光光度计测定溶液在 664 nm、647 nm、639 nm、630 nm、510 nm、480 nm 处的吸光度,按以下公式分别计算叶绿素 a、叶绿素 c 和类胡萝卜素的浓度:

$$\text{叶绿素 a 浓度}(\text{mg/L}) = 11.85 \times A_{664} - 1.54 \times A_{647} - 0.08 \times A_{639} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 c 浓度}(\text{mg/L}) = 24.36 \times A_{630} - 3.73 \times A_{664} \quad (2)$$

$$\text{类胡萝卜素浓度}(\text{mg/L}) = 7.6 \times (A_{480} - 1.49 \times A_{510}) \quad (3)$$

将(1)、(2)、(3)式分别代入(4)式,求出鼠尾藻各色素的质量分数。

$$\text{色素质量分数}(\text{mg/g}) = (\rho \times V) / m \quad (4)$$

式中: A_{664} 代表色素溶液在 664 nm 处的吸光度,其他 A 值意义相同; ρ 代表求得的各种色素浓度; V 代表色素溶液总体积; m 代表样本质量。

1.2.3 抗氧化酶系测定

称取 0.1 g 左右鼠尾藻材料,用 1.5 mL 提取液(0.1 mol/L 磷酸缓冲液 pH = 7.0;1 mol/L EDTA;1% PVP)在冰浴条件下研磨匀浆。4 ℃,10 000 r/min 离心 10 min,取上清液待测,丙二醛(MDA)含量及总超氧化物歧化酶(SOD),过氧化氢酶(CAT)活性均由南京建成科技有限公司试剂盒测定,蛋白含量选用考马斯亮蓝法测定,实验过程严格按照试剂盒说明书操作。

1.3 数据处理

采用 Excel 整理数据及绘制图形,SPSS 16.0 进行单因子方差分析(one-way ANOVA),用 Duncan 氏多重比较分析差异显著性($P < 0.05$ 表示差异显著)。

2 结果

2.1 pH、盐度胁迫对鼠尾藻表观光合速率的影响

如图 1(a)所示,3 个 pH 组表观光合速率随时间的推移呈下降趋势,处理组 pH 6.0 和 pH 9.5 24 h 后表观光合速率大幅下降,48 h 时分别降低了 59.72% 和 62.23%,与对照组 pH 8.5 差异显著($P < 0.05$)。可以看出酸性或者碱性胁迫都会降低鼠尾藻的表观光合速率,且培养过程发现 pH 9.5 碱性溶液中鼠尾藻色泽发黑,藻体变软,生理状态不佳。如图 1(b)所示,24 h 后盐度 15 处理组表观光合速率显著下降($P < 0.05$),降幅达到 54.14%,48 h 后盐度 25 和 20 处理组表观光合速率也显著下降,降幅分别高达 73.56% 和 71.20%,此时盐度 25、20 及 15 处理组的表观光合速率均处于最低值。72 h 后盐度 25、20 及 15 处理组表观光合速率有升高趋势。

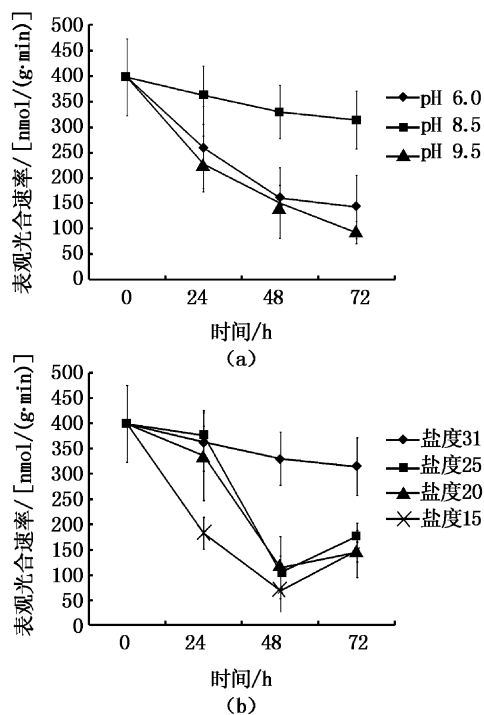


图1 pH与盐度胁迫对鼠尾藻净光合速率的影响
Fig. 1 Effect of pH and salinity stress on net photosynthesis rate of *S. thunbergii*

2.2 pH、盐度胁迫对鼠尾藻色素含量的影响

如图2(a)所示,培养6 d后鼠尾藻叶绿素 a 含量差异较大,其中 pH 8.5 对照组含量最低, pH 6.0 处理组最高。3 个 pH 组叶绿素 c、类胡萝卜素含量差异很小。图2(b)所示,随着盐度的降低叶绿素 a、c、类胡萝卜素均有先升高后降低的趋势。盐度 20 处理组 3 种色素含量最高,且类胡萝卜素含量超过叶绿素 c,与盐度 31 对照组相比,叶绿素 a、类胡萝卜素分别增加了 14.9%、24.79%。盐度降到 15 时,3 种色素含量均开始下降。

2.3 pH、盐度胁迫对鼠尾藻抗氧化系统的影响

2.3.1 pH、盐度胁迫对鼠尾藻丙二醛(MDA)含量的影响

如图3(a)所示,3 个 pH 组 MDA 含量随着时间推移,均呈先上升后下降的趋势。pH 6.0 处理组 24 h 后 MDA 略有升高,然后开始下降,至 72 h 时降低了 49.21% ($P < 0.05$)。pH 8.5、pH 9.5 两组在 48 h 时 MDA 达最大值,相比初始值分别升高了 34.79%、52.08%。pH 9.5 处理组 72 h 时降幅较大为 44.32%。图3(b)所示,盐度 20 处理组 24 h 后 MDA 急剧升高,含量增加了 1.20 倍,显著高于其他 3 组,然后呈现下降趋势,至 72

h 降低了 65.77% ($P < 0.05$)。盐度 25、15 处理组前 24 h 的 MDA 无明显变化,至 48 h 开始大幅度下降,降幅分别为 37.55%、56.28%。盐度 15 处理组至 72 h MDA 含量急剧升高,相比 48 h 增加了 2.10 倍,而其他 3 组仍然呈下降趋势。

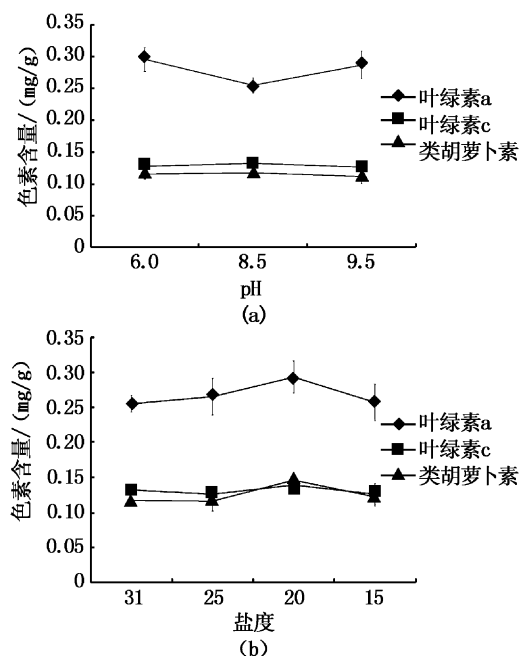


图2 pH与盐度胁迫对鼠尾藻色素含量的影响
Fig. 2 Effect of pH and salinity stress on pigment content of *S. thunbergii*

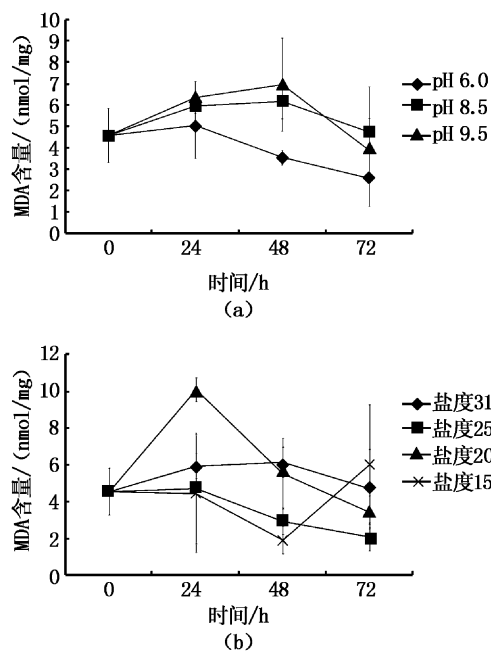


图3 pH与盐度胁迫对鼠尾藻丙二醛(MDA)含量的影响
Fig. 3 Effect of pH and salinity stress on maleic dialdehyde (MDA) of *S. thunbergii*

2.3.2 pH、盐度胁迫对鼠尾藻超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

图4(a)所示,pH 6.0处理组SOD活性随着时间的推移呈现下降趋势,但变化幅度较小。pH 8.5对照组SOD活性在24 h时出现下降而48 h时大幅度上升。pH 9.5处理组SOD活性在24 h大幅度降低,24 h后逐渐升高,至72 h时上升了46.30% ($P < 0.05$)。可见碱性胁迫条件下鼠尾藻SOD活性不断的增强以抵御活性氧对藻体的损伤。图4(b)所示,盐度20处理组SOD活性24 h至48 h时出现上升,幅度为32.54% ($P < 0.05$)。盐度25处理组SOD活性一直呈下降趋势,但幅度较小。盐度15处理组SOD活性24 h时小幅度的升高,48 h时开始下降,降幅为24.47% ($P < 0.05$),可见盐度15处理48 h后SOD的活力可能受到了低盐度胁迫的抑制而活性降低。

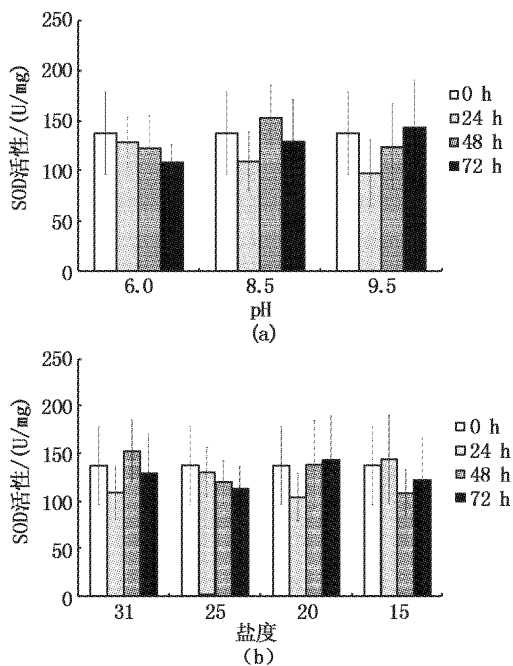


图4 pH与盐度胁迫对鼠尾藻超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig.4 Effect of pH and salinity stress on superoxide dismutase (SOD) activity of *S. thunbergii*

2.3.3 pH、盐度胁迫对鼠尾藻过氧化氢酶(CAT)活性的影响

如图5(a)所示,pH 6.0处理组CAT活性随着时间的推移一直呈上升趋势,但是幅度较小,酶的活性水平较低。pH 8.5对照组24 h至48 h

时CAT活性显著升高,72 h后出现一定幅度的下降。pH 9.5处理组CAT活性一直呈上升趋势,48 h比24 h时升高了1.73倍,至72 h仍保持较高的活性。由图可见,48 h后碱性胁迫条件下鼠尾藻的CAT活性水平处于较高水平。图5(b)所示,盐度25处理组CAT活性24 h后即出现显著上升,增加了1.30倍,至72 h时一直维持较高水平。盐度20处理组,CAT活性一直呈上升趋势,48 h后开始急剧升高,72 h时处于最大值。盐度15处理组CAT活性随着时间的推移逐渐升高,但变化幅度较小。

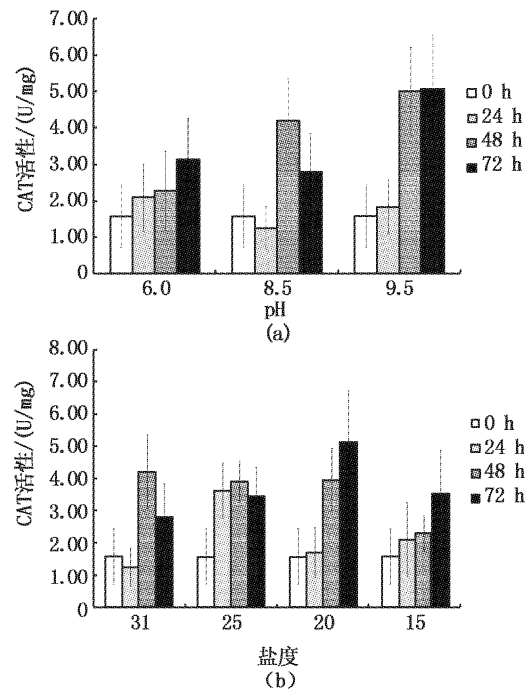


图5 pH和盐度胁迫对鼠尾藻过氧化氢酶(CAT)活性的影响

Fig.5 Effect of pH and salinity stress on catalase (CAT) activity of *S. thunbergii*

3 讨论

3.1 pH、盐度胁迫对鼠尾藻光合作用的影响

鼠尾藻在自然环境中生长会受到温度、光照、盐度、pH等环境因子的影响,尤其是干露状态下更容易受到环境因子的胁迫。由实验可以看出在pH 6.0与pH 9.5海水中培养的鼠尾藻24 h后表观光合速率出现大幅度的降低,而且随着时间推移与对照组pH 8.5的差异变大,表明酸性或者强碱性的水环境对鼠尾藻的光合作用有较大的抑制作用。高尚德和赵焕登^[17]研究表

明, pH 2 ~ 8 的海水处理条斑紫菜和孔石莼 20 min 后放入正常的自然海水中, 两种藻体的净光合作用速率随海水的 pH 降低而降低, BLINKS^[18]研究了 pH 8.1 ~ 10.2 海水对多种潮间带大型海藻表观光合速率的影响, 发现随着 pH 的增高, 光合速率均下降, pH 大于 9.5 多种海藻停止光合作用, 也发现几种耐碱性较强的种类, 如浒苔和石莼。pH 对鼠尾藻叶绿素 a 含量影响较大, 酸性或者强碱性对照组叶绿素 a 的含量大于 pH 8.5 对照组, 而 pH 对叶绿素 c 和类胡萝卜素影响较小。表明 pH 短时间胁迫下光合作用能力降低可能并不是由于色素蛋白降解造成的。

海水盐度全年变化幅度较小, 一般对海藻的生长影响较小, 但是对于退潮后干露出来的潮间带藻类, 如遇上暴雨就可能面临低盐度的胁迫。盐度 15 在 24 h 内使鼠尾藻光合作用显著降低, 盐度 25、20 在 24 h 内对其没有显著影响, 而 48 h 后显著抑制鼠尾藻的光合作用。值得注意的是, 72 h 后低盐度处理组的鼠尾藻光合作用均开始上升, 说明鼠尾藻在一定范围内可通过自身的生理调节来适应一定程度的低盐度胁迫, 这种对低盐度的适应能力在热带浮游植物中更加明显^[19]。随着盐度降低, 鼠尾藻叶绿素 a、c 和类胡萝卜素均有上升的趋势, 至盐度 20 时三者具有最高值。冯宪栋等^[20]用不同盐度梯度培养原绿球藻一周, 发现盐度从 33.4 降到 20.2 时叶绿素含量呈上升趋势, 但盐度继续下降时色素含量开始大幅度降低, 这说明适当的低盐度可能会促进色素的积累。

3.2 pH、盐度胁迫对鼠尾藻抗氧化系统的影响

藻类抗氧化系统受到诸如温度^[21-22]、光照^[23-24]、盐度^[25-26]、重金属离子^[27-28]、紫外线辐射^[29]等一系列环境因子的影响。当藻体受到胁迫后, 细胞内正常的活性氧(ROS)代谢机制将失去平衡, 活性氧将在细胞内大量积累并对细胞产生损伤^[9,30]。丙二醛(MDA)是脂类过氧化产物之一, 现已被广泛用作膜脂受氧化损伤程度的指标。本实验研究发现 pH 9.5 处理组鼠尾藻在 48 h 内体内 MDA 含量增加幅度较大, 可能碱性胁迫促使藻体内活性氧大量生成, 造成膜脂过氧化程度较大。而 SOD 活性在开始的 24 h 出现了下降, 之后可能受到超氧化物阴离子($O_2\cdot^-$)的诱导而不断上升, 清除过多的 $O_2\cdot^-$ 。培养过程中观察

到 pH 9.5 处理组的藻体色泽变暗, 松软, 表明碱性胁迫对鼠尾藻组织具有较强的损害作用。pH 8.5 对照组藻体 MDA 含量略有上升, 48 h 后 SOD 与 CAT 活性均较高, 表明其代谢处于平衡状态。结合 pH 8.5 组藻体较强的光合作用能力, 说明 pH 8.5 的环境较利于鼠尾藻的生存。pH 6.0 处理组前 24 h 的 MDA 略有提高, 然后不断下降, 可能暗示膜脂过氧化程度较小。

盐度 20 处理组 24 h 时 MDA 相比其他组显著升高, 然后快速下降, 这可能因为 SOD 活性在 24 h 处于较低值, 不能有效清除积累的超氧化物, 导致膜脂过氧化程度较大。而随后大幅度提高并保持较高水平, 超氧化物歧化为 H_2O_2 , 可能受到高含量 H_2O_2 的诱导 CAT 活性也处于最大值, 这表明抗氧化酶系统能够协调有效地清除活性氧物质, 对藻体起到保护作用。盐度 15 处理组 48 h 至 72 h 时 MDA 显著上升, 其 SOD 活性 24 h 较高而 48 h 后受到低盐度胁迫显著降低, CAT 活性有上升趋势, 但数值较低。LU 等^[31]研究表明适当低盐度胁迫对石莼的氧化损伤可能是由 H_2O_2 引起的, 并且认为在低盐度下对 H_2O_2 的清除主要依赖 CAT, 而周亚维等^[10]认为盐度胁迫下盐生隐杆藻(*Aphanothece halophytica*) CAT 活性降低, APX 对于 H_2O_2 的消除起主要作用, 这说明藻类的抗氧化机制存在差异。盐度 25 处理组 MDA 含量与 SOD 活性均呈降低趋势, CAT 活性保持较高水平, 暗示活性氧可能没有大量积累, 膜脂过氧化程度较低。综上, pH、盐度胁迫使鼠尾藻光合作用系统受到的阻抑, 电子传递不能正常进行, 导致了活性氧的产生, 而过量的活性氧又会损伤叶绿体光合膜。实验结果表明鼠尾藻抗氧化酶具有较强的清除活性氧的能力, 发现盐度胁迫后藻体光合作用能力有恢复的趋势而 pH 胁迫后却不能恢复, 可能是因为 pH 的强烈变化直接改变了内囊体膜两侧的电位差与质子梯度的平衡, 从而影响光合作用效率^[32-33]。

参考文献:

- [1] 韩晓弟, 李岚萍. 鼠尾藻特征特性与利用[J]. 特种经济动植物, 2005, 8(1):27.
- [2] 刘朝阳, 孙晓庆, 范仕亮. 当前刺身养殖面临的主要困境及发展策略[J]. 饲料工业, 2006, 27(22):28-30.
- [3] 殷大聪, 耿亚红, 梅洪, 等. 几种主要环境因子对布朗葡萄藻(*Botryococcus braunii*)光合作用的影响[J]. 武汉植

- 物学研究, 2008, 26(1):64-69.
- [4] 张宝玉, 李夜光, 李中奎, 等. 温度、光照强度和 pH 对雨生红球藻光合作用和生长速率的影响[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(5):558-565.
- [5] 邓光, 耿亚洪, 胡鸿钧, 等. 几种环境因子对高生物量赤潮海藻 - 东海原甲藻光合作用的影响[J]. 海洋科学, 2009, 33(12):34-39.
- [6] DAWES C J, MOON R E, DAVIS M A. The photosynthetic and respiratory rates and tolerances of benthic algae from a mangrove and salt marsh estuary: a comparative study[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1978, 6(2):175-185.
- [7] 王永川, 黄良民. 细基江蕨的光合作用及生产力与温、盐度的关系[J]. 水产学报, 1985, 9(2):155-163.
- [8] BIEBL R, MCROY C P. Plasmatic resistance and rate of respiration and photosynthesis of *Zostera marina* at different salinities and temperatures[J]. Marine Biology, 1971, 8(1):48-56.
- [9] IMLAY J A. Pathways of oxidative damage[J]. Annual Review of Microbiology, 2003, 57:395-418.
- [10] 周亚维, 焉婷婷, 李朋富. 盐度胁迫下盐生隐杆藻抗氧化防御系统的变化[J]. 海洋科学, 2010, 34(9):30-35.
- [11] ZHAO Z G, ZHAO F J, YAO J T, et al. Early development of germlings of *Sargassum thunbergii* (Fueales, Phaeophyta) under laboratory conditions [J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(5):925-931.
- [12] 梁洲瑞, 王飞久, 孙修涛, 等. 利用液相氧电极技术对鼠尾藻叶光合及呼吸作用的初步研究[J]. 水产学报, 2012, 36(12):1842-1853.
- [13] 李丽霞, 赵妍, 周斌, 等. UV-B 辐射对大型海藻鼠尾藻抗氧化酶活性及同工酶谱的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(6):1246-1250.
- [14] CHU S H, ZHANG Q S, LIU S K, et al. Tolerance of *Sargassum thunbergii* germlings to thermal, osmotic and desiccation stress[J]. Aquatic Botany, 2012, 96(1):1-6.
- [15] JEFFREY S W, HUMPHREY G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants algae and natural phytoplankton[J]. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1975, 167:191-194.
- [16] 王丽梅, 李世国, 柴雨. 鼠尾藻幼苗的室内培养及有性生殖同步化[J]. 水产学报, 2011, 35(3):395-404.
- [17] 高尚德, 赵焕登. 紫菜和石莼对酸耐受力的研究 II. 不同 pH 对条斑紫菜和孔石莼光合作用和细胞结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(1):87-92.
- [18] BLINKS L R. The effect of pH upon the photosynthesis of littoral marine algae[J]. Protoplasma, 1963, 57(1/4):126-136.
- [19] QASIM S Z, BHATTATHIRI P M A, DEVASSY V P. The influence of salinity on the rate of photosynthesis and abundance of some tropical phytoplankton [J]. Marine Biology, 1972, 12(3):200-206.
- [20] 冯亮栋, 蒋霞敏, 符方尧. 理化因子对原绿球藻生长及其色素含量的影响[J]. 水产科学, 2007, 26(12):643-647.
- [21] 侯和胜, 何文君, 李洪艳, 等. 高温胁迫对条斑紫菜丝状体的生长和生理影响[J]. 辽宁师范大学学报:自然科学版, 2008, 31(4):487-490.
- [22] 鹿宁, 臧晓南, 张学成, 等. 高温胁迫下不同龙须菜品种抗氧化能力的比较[J]. 武汉大学学报:理学版, 2010, 56(5):570-577.
- [23] 董斌, 兰利琼, 卿人韦. 弱光照对螺旋藻抗氧化酶活性的影响[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2002, 39(2):337-339.
- [24] 卿人韦, 叶华勋, 李扬, 等. 在高强度光照胁迫下极大螺旋藻两种抗氧化酶活力变化的研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2003, 40(3):565-569.
- [25] JAHNKE L S, WHITE A L. Long-term hyposaline and hypersaline stresses produce distinct antioxidant responses in the marine alga *Dunaliella tertiolecta* [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(10):1193-1202.
- [26] CHU S H, ZHANG Q S, TANG Y Z, et al. High tolerance to fluctuating salinity allows *Sargassum thunbergii* germlings to survive and grow in artificial habitat of full immersion in intertidal zone [J]. Journal of the Faculty of Applied Biological Science, 2012, 412:66-71.
- [27] CHOUDHARY M, JETLEY U K, KHAN M A, et al. Effect of heavy metal stress on proline, malondialdehyde, and superoxide dismutase activity in the cyanobacterium *Spirulina platensis*-S5 [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 66(2):204-209.
- [28] BAJGUZ A. An enhancing effect of exogenous brassinolide on the growth and antioxidant activity in *Chlorella vulgaris* cultures under heavy metals stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(2):175-179.
- [29] 缪锦来, 王波, 阚光锋, 等. 南极冰藻 Chlorophyceae L-4 抗氧化酶活性对 UV-B 辐射增强的响应[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3):313-319.
- [30] CHEN S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell[J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27(2):84-90.
- [31] LU I F, SUNG M S, LEE T M. Salinity stress and hydrogen peroxide regulation of antioxidant defense system in *Ulva fasciata*[J]. Marine Biology, 2006, 150(1):1-15.
- [32] 刘贤德, 沈允钢. 光合作用各部分反应间的动态衔接与协调[J]. 生命科学, 2005, 17(4):341-345.
- [33] SCHONKNECHT G, NEIMANIS S, KATONA E, et al. Relationship between photosynthetic electron transport and pH gradient across the thylakoid membrane in intact leaves [J]. Plant Biology, 1995, 92(26):12185-12189.

Effects of pH and salinity stress on photosynthesis and antioxidant system of *Sargassum thunbergii*

MA Xing-yu^{1,2}, LIU Fu-li², LIANG Zhou-ru², WANG Fei-jiu², SUN Xiu-tao², WANG Wen-jun², LING Jing-yu^{1,2}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: In this study, a liquid-phase oxygen electrode system and an antioxidant enzymes kit were used to determine the photosynthetic characteristics and antioxidant system of *Sargassum thunbergii* at various pH and salinities. The net photosynthetic rates (P_n), pigment content, maleic dialdehyde (MDA) content and antioxidant enzymes activity of *S. thunbergii* were investigated. The major results included: (1) P_n rapidly decreased at pH 6.0 and pH 9.5 for 24 h, which were remarkably significant ($P < 0.05$) compared with that of the control (pH 8.5) for 48 h. (2) Both superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activity increased significantly ($P < 0.05$) at pH 9.5 for 48 h. And MDA content firstly increased, then decreased at pH 9.5 for 48 h. Compared with that of control (salinity 31), P_n decreased significantly ($P < 0.05$) at salinity 15 for 24 h and at salinity 25 or salinity 20 for 48 h. However, P_n had some rise at salinity 25, 20 and 15 for 72h. (4) MDA content increased significantly ($P < 0.05$) at first 24 h and then rapidly decreased at salinity 20. And both SOD and CAT activity increased significantly ($P < 0.05$) at salinity 20 from 24 h to 48 h. MDA content increased significantly ($P < 0.05$) with SOD, CAT activity relatively low at salinity 15 after 72 h. Above results indicated that photosynthetic capacity of *S. thunbergii* was inhibited at pH 6.0 and pH 9.5. *S. thunbergii* was damaged by reactive oxygen species (ROS) under strong alkaline stress. Antioxidant enzymes eliminated ROS readily at salinity over 15, but had low activity at salinity 15. In a word, these results revealed the change of photosynthetic capacity and provided reference for the regulating mechanism of antioxidant system response under adversity stress.

Key words: *Sargassum thunbergii*; pH; salinity; photosynthesis; antioxidant system