

NaCl 胁迫下星星草幼苗 MDA 含量与膜透性及 叶绿素荧光参数之间的关系

汪月霞^{1,2}, 孙国荣^{1,2*}, 王建波^{1,2}, 曹文钟³, 梁建生^{1,2}, 余政哲⁴, 陆兆华⁵

(1. 扬州大学生物科学与技术学院, 扬州 225009; 2. 扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009;

3. 大庆石油学院 化学化工学院, 大庆 163318; 4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

5. 中国矿业大学恢复生态研究所, 北京 100083)

摘要: 星星草幼苗在不同浓度 NaCl 胁迫处理 7d 后, 测定了叶绿素荧光参数、MDA 含量和叶片电解质外渗率。结果表明, 在低浓度 NaCl (小于 1.2%) 胁迫下, 星星草幼苗叶绿体 MDA 含量随胁迫强度的增强而降低, 而在高浓度 NaCl (1.2% ~ 2.4%) 胁迫下则相反。在低浓度 NaCl (小于 1.2%) 胁迫下, F_v/F_m (PS II 原初光能转化效率)、 F_v/F_o (表 PS II 潜在活性)、 F_v'/F_m' (类囊体活化时 PS II 固有效率) 和 qP (荧光光化学淬灭效率) 随着胁迫强度的增强而增高, 而在高浓度 NaCl (1.2% ~ 2.4%) 胁迫下则随着胁迫强度的增强而降低; 而 qNP (荧光非光化学淬灭效率) 和 HDR (热耗散速率) 却随着胁迫强度的增强而增高。 $\Phi PS II$ (PS II 实际光化学效率) 在低浓度 NaCl (小于 0.4%) 胁迫下随着胁迫强度增强而升高, 在 0.4% ~ 1.6% 之间迅速下降, 大于 1.6% 时, $\Phi PS II$ 又迅速升高。 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v'/F_m' 和 qP 均随着 MDA 含量的增高而降低, 而 EL (叶片电解质外渗率)、 qNP 和 HDR 在 MDA 含量较低的范围 (0.9753 ~ 1.1901 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 内均减小, 在 MDA 含量较高的范围 (1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 内, 均迅速增大。 $\Phi PS II$ 在 MDA 含量较低范围 (0.9753 ~ 1.0953 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 内时上升, 但变化不大, 随着 MDA 含量的增高 (在 1.1172 ~ 1.1901 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 范围内迅速降低, 但当 MDA 含量进一步增高时 (在 1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 范围内又迅速升高。这些结果表明, 星星草幼苗的荧光参数具体的变化规律与盐胁迫强度和幼苗细胞膜的受损伤程度密切相关, 即低浓度 NaCl 胁迫 (小于 1.2%) 下, 星星草幼苗由于活性氧的增加而发生膜脂过氧化可能主要通过体内较高活性的保护酶系统来清除, 而高浓度 NaCl 胁迫 (大于 1.2%) 下, 星星草幼苗可能具有与其它植物不同的保护机制, 即可能主要通过增加 qNP (荧光非光化学淬灭效率)、 HDR (热耗散速率) 耗散过剩的光能和提高 $\Phi PS II$ 增强假循环式光合磷酸化过程, 消耗掉多余的能量, 以保护光合器官免受过剩光能的损伤, 从而减轻膜脂过氧化作用。

关键词: 星星草; 盐胁迫; MDA 含量; 电解质外渗率; 叶绿素; 荧光参数

文章编号: 1000-0933(2006)01-0122-08 中图分类号: Q143, Q945.11, Q945.7, Q948 文献标识码: A

Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress

WANG Yue-Xia^{1,2}, SUN Guo-Rong^{1,2*}, WANG Jian-Bo^{1,2}, CAO Wen-Zhong³, LIANG Jian-Sheng^{1,2}, YU Zheng-Zhe⁴

LU Zhao-Hua⁵ (1. College of Biosciences and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Chemistry and Chemical Engineering College, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 4. Research Center for Eco-Environmental Science, CAS, Beijing 100085, China; 5. Institute of restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 122 ~ 129.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30270234)

收稿日期: 2005-02-02; 修订日期: 2005-07-29

作者简介: 汪月霞 (1980 ~), 女, 安徽人, 博士生, 主要从事植物生理生态学研究. E-mail: yueer128056@126.com

* 通讯作者 Author of correspondence. E-mail: gusun@yzu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30270234)

Received date: 2005-02-02; Accepted date: 2005-07-29

Biography: WANG Yue-Xia, Ph.D. candidate, mainly engaged in plant physiology and ecology. E-mail: yueer128056@126.com

Abstract: In order to study the mathematic relationship between changes of the chlorophyll fluorescence parameters of *P. tenuiflora* seedlings and the fine regulation mechanism of metabolism of cell membrane stability under salt stress, electrolyte leakage rate (*EL*) using relatively electrical conductivity method and malondialdehyde (MDA) content using the thiobarbituric acid method relating to cell membrane stability were determined as the variable of physiological parameters that could reflect the status of physiological system or injury extent by stress, and the fluorescence parameters such as Fv/Fm 、 Fv/Fo 、 qP 、 Fv'/Fm' 、 $\Phi PS II$ 、*HDR* and *qNP* were also determined by the method of fluorescence induction kinetics with FMS2- facilitative Fluorescence Monitoring System under normal condition and different degrees of NaCl stress (0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2%、2.4%) after 7d.

The result showed that MDA content decreased a little under low NaCl stress (less than 1.2%), then increased significantly with increasing of NaCl concentration (more than 1.2%). Among the chlorophyll fluorescence parameters, Fv/Fo 、 Fv/Fm 、 Fv'/Fm' and qP took a similar trend of increasing firstly then decreasing with the increasing of NaCl concentration, but *qNP* and *HDR* increased with the increasing of NaCl concentration accordingly. At the same time, $\Phi PS II$ increased slightly under low NaCl stress (less than 0.4%), then decreased significantly, finally increased fastly. The result also showed that with increases in MDA content, Fv/Fo 、 Fv/Fm 、 qP and Fv'/Fm' decreased accordingly, however, *EL* decreased slightly firstly in MDA content (0.9753 ~ 1.1901 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$), then increased significantly with the increasing of MDA content (1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$), showing the similar trend of *qNP* and *HDR*. On the other hand, $\Phi PS II$ displayed ascending trend during MDA content (0.9753 ~ 1.0953 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$), then showed descending trend during MDA content (1.1172 ~ 1.1901 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$), finally increased fastly with the increasing of MDA content (1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$). The change value could visually characterize the extent of injury of physiological system of plant under salt stress, and the quantitative relationship between the MDA content、*EL* and the chlorophyll fluorescence parameters probably was the reflection that chlorophyll fluorescence parameters were closely related to membrane lipid peroxidation and plasma membrane permeability of the *P. tenuiflora* seedlings. It could be concluded that membrane lipid peroxidation of *P. tenuiflora*, which resulted from the augment of active oxygen, could be mainly eliminated by highly active antioxidant enzymes system under low NaCl concentration (less than 1.2%); while the safeguard mechanism of *P. tenuiflora* could be different from that of other plants under midst NaCl concentration (more than 1.2%), they dissipated surplus light energy mainly via two approaches: one is to increase light energy absorbance by light-harvesting pigment that used in non-photochemical quenching coefficient (*qNP*) and heat dissipation rate (*HDR*), the other is to increase actually photochemical efficiency of PS II in the light ($\Phi PS II$), building up pseudo-cyclic photophosphorylation. By these ways does *P. tenuiflora* protect photosynthetic apparatus from the damage of surplus of light energy, thus reduce membrane - lipid peroxidation.

Key words: *Puccinellia tenuiflora*; NaCl stress; electrolyte leakage rate (*EL*); MDA content; fluorescence parameters

为了更好地利用大面积的盐渍化土地,研究盐分胁迫对作物和树木的影响,培养和选育耐盐植株,在实践和理论上都具有很重要的意义^[1,2]。星星草(*Puccinellia tenuiflora*)是一种耐盐碱性较强的禾本科牧草,近年来经人工种植用于改良盐碱化草地效果良好,在黑龙江等地有一定面积的应用^[3]。

光合作用是植物最重要的生命活动之一,研究光合作用对盐胁迫的响应,对于阐明盐胁迫对植物的伤害机理和提高作物的抗盐性是十分必要的。叶绿素 a 荧光诱导动力学以光合作用理论为基础,是探测和分析植物光合功能的重要手段,为研究 PS II (光系统 II)及其电子传递过程提供了丰富信息。又由于叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,与“表现性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”特点^[4]。因此,叶绿素荧光动力学技术是研究植物光合生理状况及植物与逆境胁迫关系的理想探针^[5,6]。利用叶绿素荧光参数变化鉴定星星草幼苗相对耐盐性具有快速、简便、无损检测等优点,具有一定的实用价值。目前叶绿素荧光诱导动力学在干旱、高温和低温等方面报道的较多^[7,8],但对其与植物抗(耐)盐性的关系^[9~12]尤其是星星草抗(耐)碱性盐的关系方面研究甚少。另一方面,细胞膜的稳定性可用来判断不同植物的抗逆性^[13,14]。MDA 含量高低是膜脂过氧化作用强弱的一个重要指标^[15];星星草幼苗 *EL* 与盐胁迫浓度的变化呈正相关关系^[16,17],因此可作为生理参数的变量来反映胁迫下植物受伤害的程度。本研究利用不同浓度的 NaCl 胁迫下 MDA 含量变化与膜透性变化和星星草幼苗叶绿素荧光参数之间的关系来揭示星星草幼苗的叶绿素荧光参数与其抗盐之间的关系,以期为星星草的耐盐机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 幼苗培养与胁迫处理

星星草种子由黑龙江省肇州县草原实验场提供。幼苗培养以珍珠岩做培养基。使用前将珍珠岩用自来水浸泡冲洗数次后,用蒸馏水浸泡冲洗 2 次,烘干后,置于 600ml 的塑料盆里,加注 Hoagland 培养液至珍珠岩表面湿润,将星星草种子均匀播撒其上,于人工气候箱培养,昼夜温度为 25℃/20℃,光照 65 lx,相对湿度 75%。待幼苗长到二叶期进行 NaCl 胁迫处理。处理时用漏斗将 NaCl 母液加至珍珠岩底层,并补充相应数量的 Hoagland 培养液至原湿润程度,使 NaCl 浓度分别为 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.6%, 2%, 2.4%。以加入 Hoagland 培养液为对照。盐胁迫处理 7d 后测定 EL, MDA 含量和叶绿素荧光参数。

1.2 电解质外渗率测定

在盐胁迫处理 7d 后,参照 Dionisio-Sese 的方法^[18]并略加改动,分别取对照及不同浓度 NaCl 处理的星星草幼苗叶片各 0.1g,剪成 1cm 小段后放入锥形瓶中,各加 50ml 的蒸馏水。然后把锥形瓶放入真空泵中抽气,摇晃后用 326 电导率仪测定其电导率(EC_1)。测定后把锥形瓶放入高压锅中,完全杀死组织并释放所有的电解质,冷却至室温下再测定其电导率(EC_2),按下式计算相对电导率(即电解质外渗率):

$$EL = (EC_1 - EC_0)/(EC_2 - EC_0)$$

式中, EC_0 为蒸馏水的电导率。

1.3 MDA 含量的测定

参照 Stewart 和 Bewley^[19]的硫代巴比妥酸(TBA)方法,预先提取的粗酶液中加入 0.5% 的 TBA(溶于 20% 的三氯乙酸),混合物在电烘箱里 95℃ 下加热 30min,然后快速在冰浴上冷却,在 10000r/min 离心 10min,取上清液于 450、532、600nm 波长下测定光密度。在 600nm 时,MDA 没有固定的吸光值,根据 MDA 的消光度为 155 $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 来确定,参照文献^[20]的方法计算。

1.4 叶绿素荧光动力学参数的测定

在盐胁迫处理 7d 后,采用 FMS2 型便携式调制荧光分析仪(Hansatech 公司)参照冯玉龙等^[21]的方法测定叶片叶绿素荧光,叶片暗适应 5min 后用弱测量光测定初始荧光(F_0),随后给一个强闪光($5000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 脉冲时间 0.7s)测得最大荧光(F_m),当荧光产量从 F_m 快降回到 F_0 时(5s),打开作用光($400\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),当荧光恒定时(150s),测得稳态荧光(F_s);加上一个强闪光($5000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 脉冲时间 0.7s)后荧光上升到能化类囊体最大荧光(F_m');关闭作用光使叶片暗适应 3s 后,打开远红光,5s 后测得能化类囊体最小荧光(F_0')。其它荧光参数如下:可变荧光(F_v) = $F_m - F_0$ 、最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 有效光化学量子效率(F_v'/F_m')、光化学猝灭系数(qP) = $(F_m' - F_s)/(F_m' - F_0)$ 、非光化学猝灭系数(qNP) = $(F_m - F_m')/(F_m - F_0)$ 由仪器自动给出;通过计算^[22]得出潜在光化学效率(F_v/F_0),光下光合功能相对限制值(PED) = $1 - (qP \times F_v'/F_m')/0.83$,热耗散速率 $HDR = (1 - F_v'/F_m') \times PED$, PS II 实际光化学效率($\Phi_{PS II}$) = $1 - F_s'/F_m'$,每处理重复 6 次测定。

1.5 数据分析与作图

采用美国 SPSS 公司的 Sigmaplot2000 统计软件进行相关分析并作图,图中数据均为 5 次重复测定值的平均值。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对 MDA 和 EL 含量的影响

星星草幼苗 MDA 含量与 NaCl 胁迫强度呈极显著的非线性关系(图 1),低浓度 NaCl(小于 1.2%)胁迫下,星星草幼苗叶绿体 MDA 含量随胁迫强度的增强而降低(变化范围为 1.1901 ~ 0.9753 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$),但变化幅度不大,而在高浓度 NaCl(1.2% ~ 2.4%)胁迫下则相反(变化范围为 0.9753 ~ 1.8518 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)。MDA 含量与星星草幼苗电解质外渗率呈显著非线性关系(图 2),即 EL 在 MDA 含量较低的范围(0.9753 ~ 1.1901 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)内下降(变化范围为 0.1863% ~ 0.1077%),在 MDA 含量较高的范围(1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)内

均迅速增大(变化范围为 0.1863% ~ 0.3334%)。

2.2 NaCl 胁迫下 MDA 含量与 Fv/Fm 和 Fv/Fo 之间的关系

(Fv/Fm)和(Fv/Fo)值用于度量植物叶片 PS II 原初光能转化效率和 PS II 潜在活性,是表明光化学反应状况的两个重要参数^[23]。盐胁迫下星星草幼苗荧光参数 Fv/Fm 与 NaCl 浓度呈极显著的非线性关系(图 3a),即在低浓度 NaCl(小于 1.2%)胁迫下, Fv/Fm 随着胁迫强度地增强而升高(变化范围为 0.7853 ~ 0.8094),而在高浓度 NaCl(1.2% ~ 2.4%)胁迫下则随着胁迫强度地增强而降低(变化范围为 0.809 ~ 0.7528)。 Fv/Fo 与 NaCl 浓度呈显著的非线性关系(图 3b),当 NaCl 浓度在 1.2% 以下时, Fv/Fo 呈上升趋势(变化范围为 4.1670 ~ 5.0321),当胁迫强度增强(1.2% ~ 2.4%)时, Fv/Fo 呈下降趋势(变化范围为 5.0321 ~ 3.5752),这与 Fv/Fm 变化趋势相一致。盐胁迫下星星草幼苗 Fv/Fm 和 Fv/Fo 值的变化与膜脂过氧化作用的加剧及细胞质膜的破坏呈极显著负相关关系, Fv/Fm 和 Fv/Fo 都随着 MDA 含量的增高而减小,且随着 MDA 含量增高, Fv/Fm 和 Fv/Fo 降低的幅度也大(图 4a,b)。

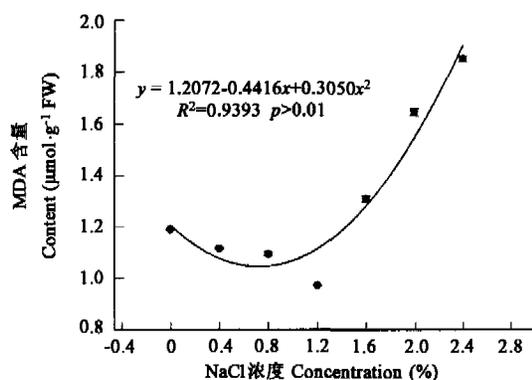


图1 星星草幼苗 MDA 含量与 NaCl 浓度之间的关系

Fig.1 Relationship between MDA content of *P. tenuiflora* seedlings and NaCl concentration

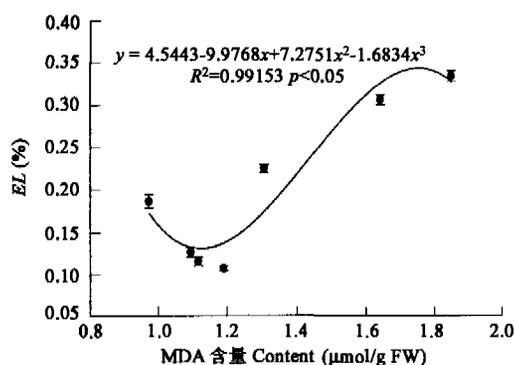


图2 NaCl 胁迫下星星草幼苗 EL 与 MDA 含量之间的关系

Fig.2 Relationship between EL and MDA content of *P. tenuiflora* seedlings under NaCl stress

2.3 NaCl 胁迫下 MDA 含量与 Fv'/Fm' 和 $\Phi PS II$ 之间的关系

Fv'/Fm' 反映开放的 PS II 反应中心原初光能转化效率^[23]。盐胁迫下星星草幼苗荧光参数 Fv'/Fm' 变化与 Fv/Fm 和 Fv/Fo 变化趋势相似(图 3c)。 Fv'/Fm' 与 NaCl 浓度呈极显著的非线性关系,即在低浓度 NaCl(小于 1.2%)胁迫下, Fv'/Fm' 随着胁迫强度的增强而升高(变化范围为 0.7345 ~ 0.7511),但变化幅度不大,而在高浓度 NaCl(1.2% ~ 2.4%)胁迫下则随着胁迫强度的增强而降低(变化范围为 0.7511 ~ 0.7047)且下降幅度较大。盐胁迫下 Fv'/Fm' 与 MDA 含量呈极显著的负相关关系(图 4C), Fv'/Fm' 随着 MDA 含量增高而降低,且当膜脂过氧化作用加强及细胞质膜破坏加剧时, Fv'/Fm' 降低的幅度也大。 $\Phi PS II$ 表示 PS II 反应中心受到环境胁迫时,存在部分反应中心关闭情况下的实际光化学效率。盐胁迫下星星草幼苗荧光参数 $\Phi PS II$ 与 NaCl 胁迫之间呈显著的非线性的关系(图 3d), $\Phi PS II$ 在低浓度 NaCl(小于 0.4%)胁迫下随着胁迫强度增强而升高(变化范围为 0.5862 ~ 0.5884),在 0.4% ~ 1.6% 之间迅速下降(变化范围为 0.5690 ~ 0.5376),大于 1.6% 时, $\Phi PS II$ 又迅速升高(0.5376 ~ 0.6060),且上升幅度较大。 $\Phi PS II$ 与 MDA 含量之间呈显著的非线性关系(图 4d),当 MDA 含量较低(0.9753 ~ 1.0953 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)时, $\Phi PS II$ 呈上升趋势,随着 MDA 含量增高(1.1172 ~ 1.1901 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)而又下降,当 MDA 含量(1.3080 ~ 1.8518 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)进一步增高时, $\Phi PS II$ 又迅速上升。

2.4 NaCl 胁迫下 MDA 含量与 qP 、 qNP 和 HDR 之间的关系

qP 主要反映处于激发态的 PS II 反应中心通过电荷分离进行原初光化学反应,产生去激能力的大小^[24],也是对 PS II 原初电子受体 QA 氧化态的一种量度,代表 PS II 反应中心开放部分的比例^[25, 26]。盐胁迫下星星草幼苗光化学猝灭系数 qP 和 NaCl 浓度呈极显著的非线性关系(图 3e),NaCl 浓度在 1.2% 以下时, qP 随着胁迫强度增强而增大(变化范围为 0.6952 ~ 0.7290),随着 NaCl 浓度进一步加强, qP 迅速减小(变化范围为

0.7290~0.6778)。 qP 与膜脂过氧化作用的加剧及细胞质膜的破坏呈显著负相关关系(图4e), qP 随着MDA含量的增高而减小。 qNP 反映了PS II反应中心非光化学能量耗散能力的大小^[27]。 qNP 与NaCl浓度呈极显著的非线性关系(图3f),即随着NaCl胁迫强度增强, qNP 也在增大(范围为0.1212~0.2879), qNP 的变化值随胁迫强度增强也在增大。 qNP 与MDA含量呈非显著的非线性关系(图4f),即MDA含量较低时, qNP 随着MDA含量的增高而降低,当膜脂过氧化作用加剧及细胞质膜破坏加强时, qNP 值升高且幅度较大。 HDR 与NaCl浓度呈极显著的非线性关系(图5a), HDR 随着NaCl胁迫强度增强而增大(变化范围为2.5280~3.1240)。 HDR 与MDA含量呈显著的非线性关系(图5b),MDA含量较低时, HDR 随着MDA含量的增高呈逐渐减小的趋势,随着MDA含量的增高, HDR 迅速增大。

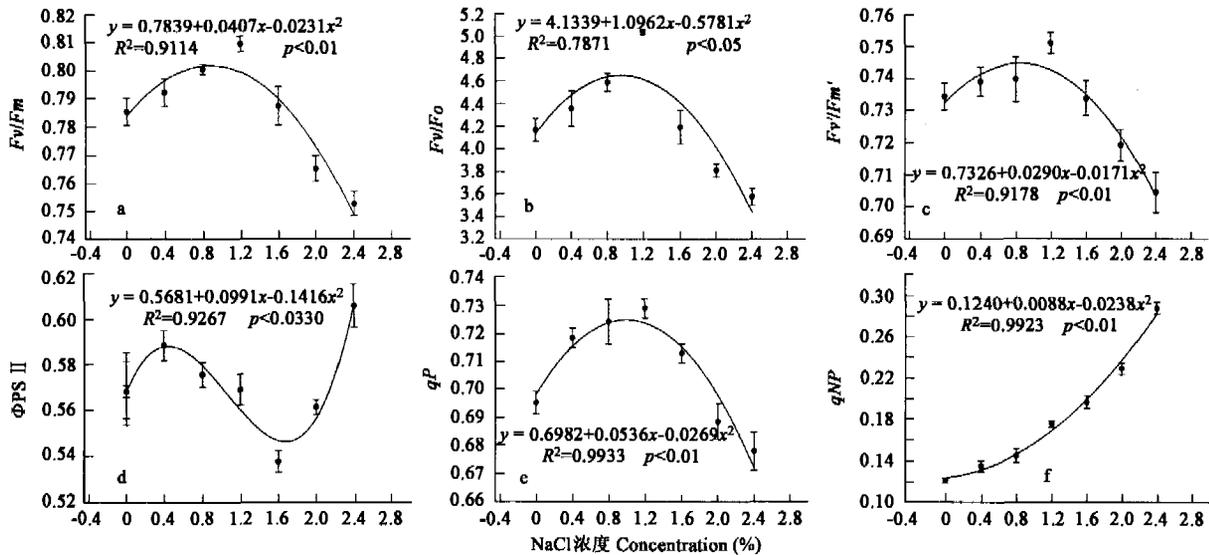


图3 星星草幼苗叶绿体荧光参数 F_v/F_m (a)、 F_v/F_o (b)、 F_v'/F_m' (c)、 $\Phi PS II$ (d)、 qP (e)和 qNP (f)与NaCl胁迫之间的关系

Fig.3 Relationship between F_v/F_m (a), F_v/F_o (b), F_v'/F_m' (c), $\Phi PS II$ (d), qP (e), qNP (f) of *P. tenuiflora* seedlings and NaCl

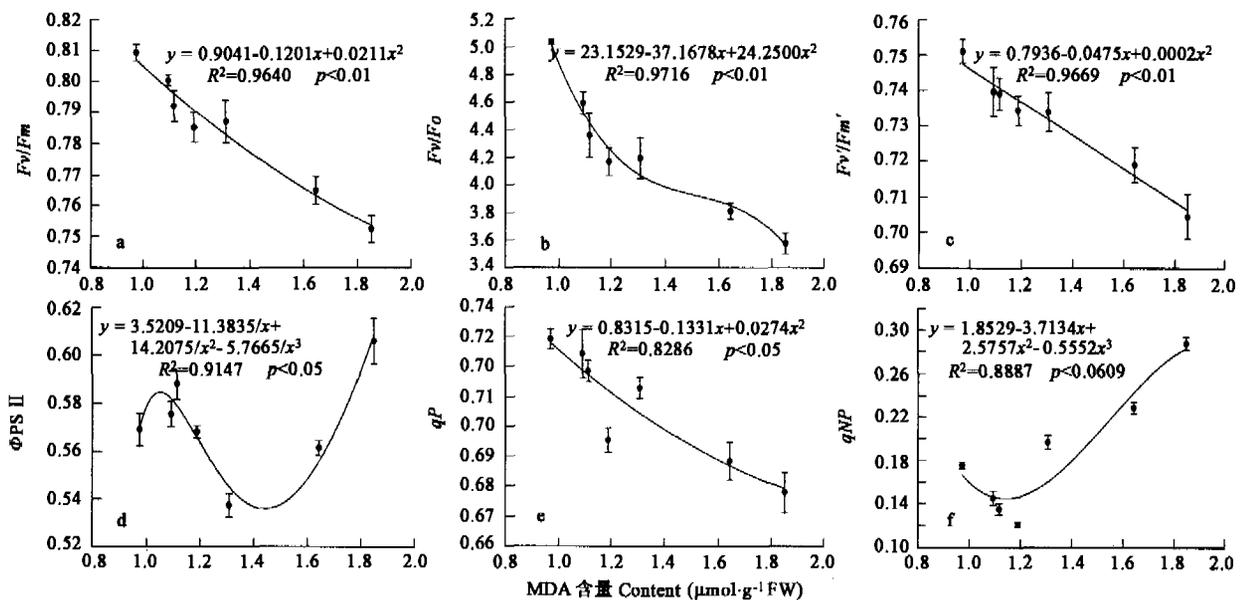


图4 NaCl胁迫下星星草幼苗叶绿体 F_v/F_m (a)、 F_v/F_o (b)、 F_v'/F_m' (c)、 $\Phi PS II$ (d)、 qP (e)、 qNP (f)和MDA含量之间的关系

Fig.4 Relationship between F_v/F_m (a), F_v/F_o (b), F_v'/F_m' (c), $\Phi PS II$ (d), qP (e), qNP (f) and MDA content of *P. tenuiflora* seedlings under NaCl concentration

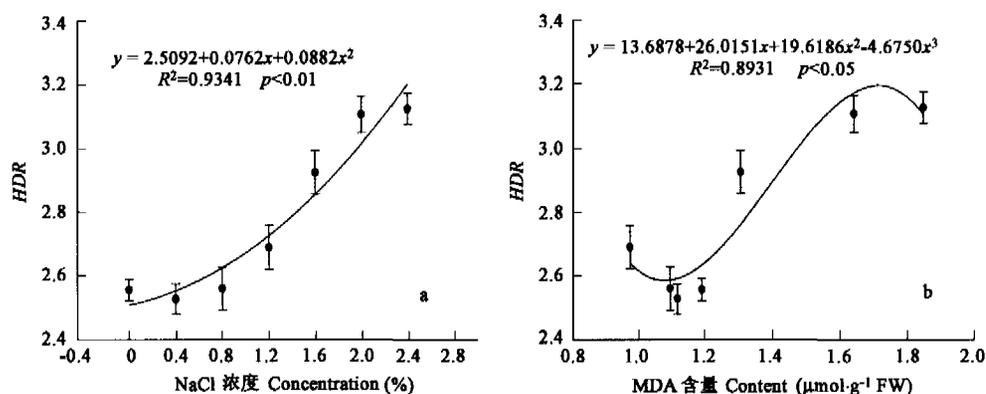


图5 星星草幼苗 HDR 与 NaCl 胁迫强度(a)、MDA 含量(b)之间的关系

Fig.5 Relationship between HDR of *P. tenuiflora* seedlings and NaCl concentration (a),MDA content(b) of *P. tenuiflora* seedlings

3 讨论

植物在长期进化过程中形成了受遗传性制约的逆境适应机制,活性氧代谢在其中占据重要地位,是植物对逆境胁迫的原初反应^[28]。当植物处于各种逆境下,自由基的产生与消除就会遭到破坏,通过 Haber-Weiss 反应产生大量的活性和毒性极高的·OH 侵害细胞内的大部分生物大分子^[29]。这种积累的自由基将会引发膜脂发生过氧化,造成细胞膜系统伤害^[30]。MDA 是膜脂过氧化的主要产物之一。因此,MDA 含量高低和细胞质膜透性变化大小可反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标。有关盐胁迫下,MDA 含量和细胞质膜透性增加的报道很多^[31, 32]。本文的 MDA 含量在 NaCl 浓度小于 1.2% 时,变化幅度不大,且比对照的 MDA 含量还要低;但随着 NaCl 胁迫加强,MDA 含量也增高,且增高的幅度较大,膜透性也迅速增大。由此可见,低浓度盐胁迫对星星草幼苗生长几乎没影响,细胞膜几乎没发生过氧化,膜透性也不大;而随着盐浓度的升高,MDA 含量和膜透性都增高,星星草幼苗在表面上虽并未显出伤害,而实际上已经对膜造成伤害。

近年来研究有关盐胁迫对于 PS II 光化学活性影响的结果不尽相同,一些研究表明盐胁迫可以抑制 PS II 的功能^[33-37],另一些研究表明盐胁迫对 PS II 的活性没有影响^[38-40]。对于本文研究的星星草而言,NaCl 浓度小于 1.2% 时,星星草幼苗叶片荧光参数 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 qP 、 F_v'/F_m' 呈上升趋势,随着 NaCl 胁迫加强(大于 1.2%),他们又呈下降趋势,且随着 MDA 含量的增高,他们都逐渐减小,这表明浓度小于 1.2% NaCl 胁迫在一定程度上可以改善 PS II 的功能。

为了避免光抑制和膜受到伤害,大自然给植物提供了一套很好的适应机制来调整过量能量的耗散——这就是非光化学猝灭(qNP)过程。光系统通过提高非辐射性热耗散可以消耗 PS II 吸收的过多光能,从而起到保护 PS II 反应中心免受因吸收过多光能而引起的光氧化和光抑制伤害。Congming Lu 等^[40]研究了在盐胁迫下的 *Suaeda salsa*,结果发现盐胁迫对于 $\Phi PS II$ 、 F_v/F_m 、 qP 没有影响,而 NPQ 增大,表明 *S. salsa* 的 PS II 对高盐有一定的忍耐力。本实验结果表明,在 MDA 含量较低时, $\Phi PS II$ 、 qNP 、HDR 都随着 MDA 含量的增高而减小,说明星星草可能有着很强的调节能力,PS II 系统没有受到严重的伤害。随着盐胁迫的增强,亦伴随着 MDA 含量的增高,星星草幼苗叶片 $\Phi PS II$ 、 qNP 、HDR 也增大,说明星星草幼苗的 PS II 潜在热耗散能力较强,可以在盐胁迫下有效地避免或减轻因 PS II 吸收过多光能而引起的光抑制和光氧化,从而起到保护 PS II,使之免受或减轻光抑制和光破坏的作用,避免了对光合结构造成失活或破坏^[41],推测可能这正是星星草能耐盐的一个重要原因。在低盐胁迫下,星星草主要通过体内较高活性的保护酶^[30]来抵抗逆境,高盐胁迫下,主要通过增大 qNP 、HDR 消耗 PS II 吸收的过多光能和提高 $\Phi PS II$ 增强假循环式光合磷酸化过程,消耗掉多余的能量,以保护光合器官免受过剩光能的损伤,从而减轻了膜脂发生过氧化。本文的研究结果推测 1.2% NaCl 可能是星星草幼苗抗 NaCl 胁迫的分节点,而且暗示着星星草幼苗在不同强度 NaCl 胁迫所导致的不同程度的膜脂过氧化下存在着不同的方式以调节光能吸收与利用之间的平衡。

References:

- [1] Liu Y N, Mao C N, Wang L J. Progress in research of plants tolerance to saline stress. *Plant Physiology Communications*, 1987, 7(4): 1 ~ 7.
- [2] Wei C X, Wang J b, Chen Y F, Sun G R. Epicuticular wax of leaf epidermis: a functional structure for salt excretion in a halophyte *Puccinellia tenuiflora*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2451 ~ 2456.
- [3] Li J X, Sun G R, Yan X F. The research of physiological ecology of plants in *Songnen alkali* grassland. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1996.
- [4] Feng J A, Hu X L, Mao X J. Application of Chlorophyll fluorescence dynamics to plant physiology in adverse circumstance. *Economic Forest Researches*, 2002, 20 (11): 14 ~ 18.
- [5] Lin S Q, Xu C H, Zhang Q D, *et al.* The application about chlorophyll fluorescence induction kinetics on salt resistance physiology, ecology and modern agriculture. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9 (1) : 1 ~ 16.
- [6] Papageogiou G. Chlorophyll fluorescence: an intrinsic probe of photosynthesis. In: Corindjeeed, *Bioenergetics of Photosynthesis*. New York: Academic Press, 1975, 319 ~ 371.
- [7] Zhao M, Ding Z S, Zhang X. The Changes and Components of Non-photochemical Quenching under Drought and Shade Conditions in Maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29: 59 ~ 62.
- [8] Colom M R, Vazzana C. Photosynthesis and PS II functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping love grass plants. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49: 135 ~ 144.
- [9] Liu J Y, Yi Y J, Zhang Q D. Effects of salt stress on chlorophyll a fluorescence induction kinetics in wheat leaves with different salt tolerance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15 (2): 46 ~ 49.
- [10] Liang H Y, Li H P, Zheng J B, *et al.* Effect of NaCl stress on photosystem II functions in *Populus nigra* leaves. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2000, 15 (6): 101 ~ 104.
- [11] Zhu X G, Zhang Q D, Kuang T Y. Damage to photosynthetic functions of wheat by NaCl results mainly from its ionic effect, *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(4): 360 ~ 365.
- [12] Zhu X G, Zhang Q D, Kuang T Y. Effects of NaCl stress on light utilization and dissipation of PS II, *Acta Biophysica Sinica*, 1999, 15 (4) : 787 ~ 791.
- [13] Hagemeyer J. Salt, In: M.N.V. Prasad Ed. *Plant ecophysiology*. Wiley, New York, 1997. 173 ~ 205.
- [14] Premachandra G S, Saneoka H, Fujita K, *et al.* Leaf water relations osmotic adjustment, cell membrane stability, epicuticular wax load and growth as affected by increasing water deficits in Sorghum. *J Exp Bot*, 1992, 43: 1569 ~ 1576.
- [15] Chen S Y. Membrane lipid peroxidation and plant stress. *Chinese Bulletin of Botany*, 1989, 6 (4) : 211 ~ 217.
- [16] Sun G R, Yan X F, Xiao W. Preliminary study on physiological mechanism of *saline-alkali* tolerance of *Puccinellia tenuiflora*. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1997, 15(2): 162 ~ 166.
- [17] Yan X F, Xiao W, Sun G R. Physiological reaction of seedlings of salt stress I. Effect of salt stress on the growth of *Puccinellia tenuiflora* seedlings. *Heilongjiang Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 1994, 3: 1 ~ 3.
- [18] Maribel L, Dionisio-Sese, Satoshi T. Antioxidant response of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 1998, 135: 1 ~ 9.
- [19] Stewart R C, Bewley J D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiol*, 1980. 245 ~ 248.
- [20] Tang Z C, Chen Y, *et al.* The experimental guide in modern plant physiology. Shanghai: Science Press, 1999. 305 ~ 306.
- [21] Feng Y L, Feng Z L, Cao K F. The protection against photodamage in *Amomum villosum* Lour. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2001, 27(6): 483 ~ 488
- [22] Wang L J, Liu W Q, Sun G R, *et al.* Effects of 5-aminolevulinic Acid in Photosynthesis and Chlorophyll II Fluorescence of Radish Seedlings. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin*, 2005, 25(3): 488-496.
- [23] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444 ~ 448.
- [24] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology II Interpretation of fluorescence signals. *Photosyn Res*, 1984, 5: 139 ~ 157.
- [25] Genty B E, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim Biophys Acta*, 1989, 990: 87 ~ 92.
- [26] Van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosyn Res*, 1990, 25: 147 ~ 150.
- [27] Tang L J, Li B S, Tang C Q, *et al.* Geographical variation in the parameters of chlorophyll fluorescence induction kinetics of *pinus armandi* and its relations with the growth of tree height. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 474 ~ 479.
- [28] Zhang M Q, Chen R K, Yu S L. The mathematical analysis on metabolism of active oxygen of sugarcane under water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22 (6) : 263 ~ 267.
- [29] Bowler C, Van Montagu T, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1992, 43: 83 ~ 16.

- [30] Sun G R, Guan Y, Yan X F. Effect of Na_2CO_3 stress on defensive enzyme system of *Puccinellia tenuiflora* seedlings. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(1): 34 ~ 38.
- [31] Sreenivasulu N, S Ramanjulu, Ramachandra-Kini K. Total peroxidase activity and peroxidase isoforms as modified by salt stress in two cultivars of fox-tail millet with differential salt tolerance. *Plant Sci*, 1999, 141: 1 ~ 9.
- [32] Giridarakumar S, Madhusudhan KV., Sreenivasulu N, et al. Stress responses in two genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Indian J. Exp. Biol.* 2000, 38: 192 ~ 195.
- [33] Feng J C, Hu X L, Su J L, et al. The effects of water-retaining agent on chlorophyll a fluorescence parameters of *Robinia pseudoacacia* under drought stress. *Acta Botanica. Borea li -Occidentalia. Sinica*, 2002, 22(5): 1144 ~ 1149.
- [34] Krause U H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis. *Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1991, 42: 313 ~ 349.
- [35] Sunyo J. Variation in antioxidant metabolism of young and mature leaves of *Arabidopsis thaliana* subjected to drought. *Plant Science*, 2004, 166: 459 ~ 466.
- [36] Wen Y, Shuang L, Fu Y F. Effects of phosphate deficiency on the lipid composition in cucumber thylakoid membranes and PS II particles. *Plant Science*, 2004, 166: 1575 ~ 1579.
- [37] Mishra S K, Subrahmanyam D, Singhal G S. Interaction between salt and light stress on the primary process of photosynthesis. *Plant Physiol.*, 1991, 138: 92 ~ 96
- [38] Morales F, Abadia A, Gomez-Aparis J. Effects of combined NaCl and CaCl_2 salinity on photosynthetic parameters of barley grown in nutrient solution. *Plant Physiol*, 1992, 86: 419 ~ 426
- [39] Abady'a A, Belkohodja R, Morales F. Effects of salinity on the photosynthetic pigment composition of barley (*Hordeum vulgare* L.) growth under a triple-line-source sprinkler system in the field. *Plant Physiol*, 1999, 154: 392 ~ 400
- [40] Congming Lu, Nianwei Qiu, Qingtao Lu. Does salt stress lead to increased susceptibility of photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors? *Plant Science*, 2002, 163: 1063 ~ 1068.
- [41] Aro E M, Virgin I and Anderson B. Photoinhibition and D1 protein degradation in peas acclimated to different growth irradiance. *Plant Physiol*, 1993, 103: 835 ~ 843.
- [42] Veerana S, Jorg L, Peier S, et al. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52: 123 ~ 129.

参考文献:

- [1] 刘友良,毛才良,汪良驹.植物耐盐性研究进展. *植物生理学通讯*,1987,7(4):1~7.
- [2] 韦存虚,王建波,孙国荣.盐生植物星星草叶表皮具有泌盐功能的蜡质层. *生态学报*,2004,24(11):2451~2456.
- [3] 李景信,孙国荣,阎秀峰.松嫩盐碱草地植物生理生态学研究.哈尔滨:东北林业大学出版社,1996.
- [4] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲.叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用. *经济林研究*,2002,20(4):14~18.
- [5] 林世青,许春辉,张其德,等.叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的作用. *植物学通报*,1992,9(1):1~16.
- [9] 刘家尧,衣艳君,张其德.盐胁迫对不同抗盐性小麦叶片荧光诱导动力学的影响. *植物学通报*,1998,15(2):46~49.
- [10] 梁海水,李会平,郑均宝,杨敏生,王进茂. NaCl 胁迫对欧洲黑杨组植株叶片光系统 II 功能的影响. *河北林果研究*,2000,15(6):101~104.
- [11] 朱新广,张其德,匡廷云. NaCl 对小麦光合功能的伤害主要是由离子效应造成的. *植物学通报*,2000,17(4):360~365.
- [12] 朱新广,张其德,匡廷云. NaCl 胁迫对 PS II 光能利用和耗散的影响. *生物物理学报*,1999,15(4):787~791.
- [15] 陈少裕.膜脂过氧化与植物逆境胁迫. *植物学通报*,1989,6(4):211~217.
- [16] 孙国荣,阎秀峰,肖玮.星星草耐盐碱生理机制的初步研究. *武汉植物学研究*,1997,15(2):162~166.
- [17] 阎秀峰,肖玮,孙国荣.盐胁迫下星星草幼苗的生理反应 I 盐胁迫对星星草幼苗膜透性的影响. *黑龙江畜牧兽医*,1994,3:1~3.
- [21] 冯玉龙,冯志立,曹坤芳.砂仁叶片光破坏的防御. *植物生理学报*,2001,27(6):483~488.
- [22] 汪良驹,刘卫琴,孙国荣,等. ALA 对萝卜不同叶位叶片光合作用与叶绿体荧光特性的影响. *西北植物学报*,2005,25(3):488~496.
- [23] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学通报*,1999,16(4):444~448.
- [27] 唐礼俊,李渤生,唐崇钦等.华山松叶绿素荧光诱导动力学参数的地理变异及其与树高生长的关系. *植物生态学报*,1997,21(5):474~479.
- [28] 张木清,陈如凯,余松烈.水分胁迫下蔗叶活性氧代谢的数学分析. *作物学报*,1996,22(6):263~267.
- [30] 孙国荣,关扬,阎秀峰.盐胁迫对星星草幼苗保护酶系统的影响. *草地学报*,2001,9(1):34~38.
- [33] 冯建灿,胡秀丽,苏金乐,毛训甲,杨文斑.保水剂对干旱胁迫下刺槐叶绿素 a 荧光动力学参数的影响. *西北植物学报*,2002,22(5):1144~1149.