

NaCl 胁迫对 5 个树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

彭方仁, 朱振贤, 谭鹏鹏, 梁有旺

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 采用温室盆栽方法, 研究了不同质量浓度 (1、2 和 3 g · L⁻¹) NaCl 胁迫对香椿 [*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Mey.)、北美红栎 (*Quercus rubra* L.) 和常绿白蜡 (*Fraxinus griffithii* Clarke) 1 年生实生苗叶片叶绿素荧光参数的影响。结果表明, 5 个树种的 PS II 最大光能转换效率 (F_v/F_m)、稳态荧光参数 (F_s)、PS II 有效光化学量子效率 (F'_v/F'_m)、PS II 非循环光合电子传递速率 (ETR) 和 PS II 实际光化学效率 (Φ_{psII}) 总体上均随 NaCl 质量浓度的提高而逐渐减小, 不同处理间及不同树种间各参数均有极显著差异 ($P < 0.01$)。常绿白蜡的 F_v/F_m 值在 2 或 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下显著小于对照, 刺槐、香椿和楸树的 F_v/F_m 值仅在 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下显著小于对照, 而北美红栎各处理组的 F_v/F_m 值均显著小于对照。随 NaCl 质量浓度的提高, 刺槐的 F_s 值呈先减小后增大的趋势, 且在 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下高于对照, 但差异不显著; 其他 4 个树种各处理组的 F_s 值均小于对照。5 个树种幼苗叶片的 F'_v/F'_m 值和 Φ_{psII} 值的变化趋势与 F_v/F_m 值的变化趋势基本一致。随 NaCl 质量浓度的提高, 香椿幼苗叶片的 ETR 值呈先减小后增大的趋势, 且在 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下高于对照; 其他 4 个树种各处理组的 ETR 值均小于对照。不同树种的 F_v/F_m 值、 F_s 值、 F'_v/F'_m 值、ETR 值和 Φ_{psII} 值与 NaCl 质量浓度均呈极显著的负相关关系。研究结果显示, 5 个树种对 NaCl 胁迫的适应能力存在差异, 刺槐、香椿和楸树对 NaCl 胁迫的耐性较强, 常绿白蜡的耐性较弱, 北美红栎对 NaCl 胁迫最敏感。

关键词: 树种; NaCl 胁迫; 耐盐性; 叶绿素荧光参数

中图分类号: Q945.78; S728.5.03 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)03-0042-06

Effect of NaCl stress on chlorophyll fluorescence parameter in leaf of five tree species seedling

PENG Fang-ren, ZHU Zhen-xian, TAN Peng-peng, LIANG You-wang (College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(3): 42-47

Abstract: Effects of NaCl stress with different concentrations (1, 2 and 3 g · L⁻¹) on chlorophyll fluorescence parameter in leaf of one-year-old seedling of *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem., *Robinia pseudoacacia* L., *Catalpa bungei* C. A. Mey., *Quercus rubra* L. and *Fraxinus griffithii* Clarke were studied by pot-culture method in greenhouse. The results show that maximal photochemical efficiency of PS II in dark (F_v/F_m), fluorescence in stable state (F_s), photochemical efficiency of PS II in light (F'_v/F'_m), intrinsic PS II efficiency (ETR) and actual photochemical efficiency of PS II in light (Φ_{psII}) in leaf of five tree species seedling generally decrease gradually with rising of NaCl concentration, and there are highly significant differences ($P < 0.01$) among different treatment groups or different tree species. The F_v/F_m value of *F. griffithii* under 2 or 3 g · L⁻¹ NaCl stress conditions is significantly lower than that of the control, but that of *R. pseudoacacia*, *T. sinensis* and *C. bungei* only under 3 g · L⁻¹ NaCl stress condition is significantly lower than that of the control, while that of *Q. rubra* in all treatment groups is significantly lower than that of the control. With rising of NaCl concentration, the F_s value of *R. pseudoacacia* appears the trend of first decreasing and then increasing, and under 3 g · L⁻¹ NaCl stress condition that is higher than that of the control but the difference is not significant. While, that of other four tree species all are lower in all treatment groups than that of the control. The

change trend of F'_v/F'_m value and Φ_{PSII} value in leaf of five tree species seedling is consistent with that of F_v/F_m value. The ETR value in leaf of *T. sinensis* seedling appears the trend of first decreasing and then increasing with rising of NaCl concentration, and that under $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl stress condition is higher than that of the control. The ETR value of other four tree species is lower in all treatment groups than that of the control. The values of F_v/F_m , F_s , F'_v/F'_m , ETR and Φ_{PSII} of different tree species seedlings all have a highly significant negative correlation with NaCl concentration. It is suggested that the adaptability of five species to NaCl stress is various, in which, the tolerance of *R. pseudoacacia*, *T. sinensis* and *C. bungei* to NaCl stress is stronger, and that of *F. griffithii* is weaker, while *Q. rubra* is the most sensitive to NaCl stress.

Key words: tree species; NaCl stress; salt tolerance; chlorophyll fluorescence parameter

土壤盐渍化对生态环境有严重影响,目前,中国约有 250 万 hm^2 以上的各种盐渍土壤,且有逐年增加的趋势^[1]。土壤盐渍化是农林资源生产力下降的一个主要逆境因素,加强植物抗盐生理和耐盐机制等方面的研究有助于耐盐植物的选育及其在盐碱地综合治理和生态植被恢复中的应用。

叶绿素荧光参数是研究植物光化学效率以及光抑制与光破坏防御的有效工具,被广泛应用于植物生态和植物抗逆性、高光效或抗逆品种筛选、转基因植物的功能分析以及光抑制和光破坏防御机制等方面的研究^[2-8]。近年来,荧光作为研究光能分配的探针,越来越多地被研究人员用于叶绿素荧光动力学特性的研究。通过调节 PS II 反应中心的开放程度来干涉荧光的发射,根据不同情况下荧光的变化来分析光能机构的运行,叶绿素荧光特性已成为植物逆境反应的重要指标^[9-13]。

针对江苏沿海地区造林树种单一的情况,作者以适应性强、材质优良的香椿[*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey.)、常绿白蜡(*Fraxinus griffithii* Clarke)和北美红栎(*Quercus rubra* L.)等 5 种常见的沿海地区造林树种为研究对象,通过不同质量浓度 NaCl 胁迫条件下 5 个树种 1 年生实生苗叶片叶绿素荧光特性的变化,揭示 NaCl 胁迫条件下 5 个树种的适应性,为沿海地区造林树种的选择提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为刺槐、香椿、楸树、北美红栎和常绿白蜡的 1 年生实生苗。采用盆栽法,盆口直径 30 cm、高 30 cm,盆底部有孔,盆底加塑料托盘。每盆装混

合均匀的土壤 10 kg,土壤中有有机质含量为 $18.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $1.406 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钠含量为 $0.012 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.5。

NaCl 胁迫实验在南京林业大学温室内进行。于 2006 年 3 月将生长良好且长势相对一致的实生苗移栽到花盆中,待幼苗恢复正常生长后于同年 6 月份进行 NaCl 胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 NaCl 胁迫处理 采用完全随机实验设计,NaCl 处理液的质量浓度为 0(CK)、2、4 和 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每处理各 3 次重复,每个重复 3 盆,每盆栽植 1 株实生苗。每 6 天分别用 NaCl 处理液定时浇灌 1 次,每次 1 L,共浇灌 5 次,使土壤中 NaCl 的最终质量浓度分别为 0(CK)、1、2 和 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2.2 叶绿素荧光参数测定 使用 FMS-2 型便携式调制荧光分析仪(英国 Hansatech 公司生产)测定叶绿素荧光参数。在第 1 次处理的 40 d 后于晴朗天气的上午 8:30 至 10:30 选择幼苗的第 3 至第 4 叶序的功能叶进行叶绿素荧光参数的测定。

测定时,叶片暗适应 20 min 后测定初始荧光参数 F_0 ,加强 1 个强闪光($6000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)后脉冲 0.8 s 测定最大荧光参数 F_m ;5 s 后,开启作用光,待荧光达到稳态时测定稳态荧光参数 F_s ,然后加强 1 个强闪光($6000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),脉冲 0.8 s 测定强闪光下最大荧光参数 F'_m ,关闭作用光 5 s 后暗适应 3 s,再打开远红光 5 s 后测定远红光下荧光参数 F'_0 及 PS II 的非循环光合电子传递速率 ETR。以上各荧光参数重复测定 5 次。其他荧光参数由以下公式计算:可变荧光(F_v) = $F_m - F_0$; 光下最大可变荧光(F'_v) = $F'_m - F'_0$; PS II 最大光能转换效率(F_v/F_m) = $(F_m - F_0)/F_m$; PS II 有效光化学量子效率(F'_v/F'_m) = $(F'_m - F'_0)/F'_m$; PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII}) =

$$(F'_m - F'_s) / F'_m。$$

1.3 数据处理

采用 Excel 和 SAS 9.0 软件对实验数据进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对不同树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

NaCl 胁迫条件下不同树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化及多重比较结果见表 1, 方差分析结果见表 2。

2.1.1 对 PS II 最大光能转换效率 (F_v/F_m) 的影响
在叶绿素荧光参数中, PS II 最大光能转换效率 (F_v/F_m) 是反映光抑制的可靠指标, F_v/F_m 值越低证

明其发生光抑制的程度越高^[14]。由表 1 可见, 香椿、刺槐、楸树和常绿白蜡 4 个阔叶树种幼苗叶片的 F_v/F_m 值均随着 NaCl 质量浓度的提高而减小; 不同处理组北美红栎幼苗叶片的 F_v/F_m 值差异不显著, 但各处理组的 F_v/F_m 值均低于对照组。说明在 NaCl 胁迫条件下 5 个树种幼苗叶片均受到光抑制, 推测叶片的 PS II 反应中心可能受到不同程度的损伤。

多重比较结果显示, 在 1 和 2 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 香椿、刺槐和楸树幼苗叶片的 F_v/F_m 值与对照组间差异不显著, 而在 3 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, F_v/F_m 值显著下降。在 2 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 常绿白蜡幼苗叶片的 F_v/F_m 值较对照组显著下降, 但在 3 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 F_v/F_m 值仅为对照组的 66%。在 1 和 2 $g \cdot L^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 北美红栎幼

表 1 NaCl 胁迫条件下不同树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化及多重比较结果¹⁾

Table 1 Change and multiple comparison result of chlorophyll fluorescence parameter in leaf of different tree species seedling under NaCl stress condition¹⁾

| NaCl 质量浓度/ $g \cdot L^{-1}$ Conc. of NaCl | F_v/F_m | F_s | F'_v/F'_m | ETR | Φ_{PSII} |
|--|-------------|----------|-------------|-------------|---------------|
| 香椿 <i>Toona sinensis</i> (A. Juss.) Roem. | | | | | |
| 0 (CK) | 0.83±0.00a | 564±93a | 0.73±0.01a | 0.85±0.10b | 0.83±0.00a |
| 1 | 0.83±0.01a | 517±110a | 0.71±0.02a | 0.72±0.23b | 0.83±0.01a |
| 2 | 0.81±0.02ab | 536±90a | 0.72±0.02a | 0.65±0.14b | 0.81±0.02ab |
| 3 | 0.78±0.05b | 280±46b | 0.64±0.08b | 1.19±0.33a | 0.78±0.05b |
| 刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L. | | | | | |
| 0 (CK) | 0.82±0.01a | 428±80a | 0.69±0.05a | 1.44±0.15a | 0.82±0.01a |
| 1 | 0.80±0.01a | 402±90a | 0.65±0.05a | 1.00±0.21b | 0.80±0.01a |
| 2 | 0.80±0.01a | 350±26a | 0.61±0.03a | 0.93±0.22b | 0.80±0.01a |
| 3 | 0.71±0.09b | 513±205a | 0.65±0.14a | 0.88±0.28b | 0.71±0.09b |
| 楸树 <i>Catalpa bungei</i> C. A. Mey. | | | | | |
| 0 (CK) | 0.84±0.02a | 535±56a | 0.71±0.05a | 1.86±0.23a | 0.84±0.02a |
| 1 | 0.83±0.03a | 406±111b | 0.66±0.05a | 1.58±0.26ab | 0.83±0.03a |
| 2 | 0.80±0.03a | 401±92b | 0.65±0.03a | 1.27±0.35b | 0.80±0.03a |
| 3 | 0.68±0.12b | 280±51b | 0.56±0.09b | 0.93±0.21c | 0.68±0.12b |
| 常绿白蜡 <i>Fraxinus griffithii</i> Clarke | | | | | |
| 0 (CK) | 0.82±0.02a | 443±66a | 0.64±0.05a | 1.74±0.36a | 0.82±0.02a |
| 1 | 0.79±0.04a | 290±55b | 0.56±0.08a | 1.71±0.34a | 0.79±0.04a |
| 2 | 0.60±0.18b | 253±67b | 0.44±0.13b | 1.22±0.77ab | 0.60±0.18b |
| 3 | 0.54±0.10b | 239±35b | 0.41±0.10b | 1.01±0.26b | 0.54±0.10b |
| 北美红栎 <i>Quercus rubra</i> L. | | | | | |
| 0 (CK) | 0.83±0.01a | 357±25a | 0.68±0.04a | 1.78±0.15a | 0.83±0.01a |
| 1 | 0.68±0.10b | 173±51b | 0.39±0.07b | 0.90±0.31b | 0.68±0.10b |
| 2 | 0.68±0.17b | 168±41b | 0.48±0.11b | 1.14±0.70b | 0.68±0.17b |
| 3 | 0.74±0.07b | 181±46b | 0.47±0.08b | 1.00±0.30b | 0.74±0.07b |

¹⁾ F_v/F_m : PS II 最大光能转换效率 Maximal photochemical efficiency of PS II in dark; F_s : 稳态荧光参数 Fluorescence in stable state; F'_v/F'_m : PS II 有效光化学量子效率 Photochemical efficiency of PS II in light; ETR: PS II 非循环光合电子传递速率 Intrinsic PS II efficiency; Φ_{PSII} : PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II in light. 同一树种中同列不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column of same tree species indicate the significant difference ($P < 0.05$).

表 2 NaCl 胁迫条件下叶绿素荧光参数的方差分析¹⁾Table 2 Variance analysis of chlorophyll fluorescence parameter under NaCl stress condition¹⁾

| 变异来源 Source of variation | 自由度 D_f | 各参数的 F 值 F value of different parameters | | | | |
|-----------------------------|--------------|--|----------|-------------|----------|---------------|
| | | F_v/F_m | F_s | F'_v/F'_m | ETR | Φ_{PSII} |
| 处理 Treatment | 3 | 15.11 ** | 22.52 ** | 17.03 ** | 12.65 ** | 17.33 ** |
| 树种 Tree species | 4 | 8.50 ** | 33.36 ** | 28.61 ** | 10.68 ** | 4.77 ** |
| 交互 Mutual | 12 | 3.13 ** | 4.69 ** | 3.25 ** | 3.08 ** | 2.98 ** |
| 误差 Error | 80 | | | | | |
| 总计 Total | 99 | | | | | |

¹⁾ F_v/F_m : PS II 最大光能转换效率 Maximal photochemical efficiency of PS II in dark; F_s : 稳态荧光参数 Fluorescence in stable state; F'_v/F'_m : PS II 有效光化学量子效率 Photochemical efficiency of PS II in light; ETR: PS II 非循环光合电子传递速率 Intrinsic PS II efficiency; Φ_{PSII} : PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II in light. **: $P < 0.01$.

苗叶片的 F_v/F_m 值均为对照组的 82%, 但在 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 F_v/F_m 值增加至对照组的 89%。上述结果说明, 常绿白蜡和北美红栎对 NaCl 胁迫较为敏感, 在中、低质量浓度的 NaCl 胁迫条件下 F_v/F_m 值呈现较大幅度减小; 而香椿、刺槐和楸树的 F_v/F_m 值在 NaCl 质量浓度较高时才明显减小, 而且减小幅度不大, 表现出较好的耐盐性。

方差分析结果显示(表 2), 在 NaCl 胁迫条件下, 不同胁迫处理组间的 F_v/F_m 值存在极显著差异 ($F = 15.11, P < 0.01$), 不同树种间的 F_v/F_m 值也存在极显著差异 ($F = 8.50, P < 0.01$)。

2.1.2 对稳态荧光参数 (F_s) 的影响 如表 1 所示, 随 NaCl 质量浓度的提高, 香椿、刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎 5 个树种幼苗叶片的稳态荧光参数 (F_s) 总体上呈减小的趋势。多重比较结果显示, 在 1 和 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 香椿和刺槐幼苗叶片的 F_s 值与对照组相比略有减小, 但差异不显著; 在 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 香椿幼苗叶片的 F_s 值较对照组显著降低, 为对照组的 50%, 而刺槐幼苗叶片的 F_s 值则较对照组显著提高, 为对照组的 120%; 在 1、2 和 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 楸树、常绿白蜡和北美红栎幼苗叶片的 F_s 值均显著低于对照。

方差分析结果显示(表 2), 在 NaCl 胁迫条件下, 不同处理组间的 F_s 值存在极显著差异 ($F = 22.52, P < 0.01$), 不同树种间幼苗叶片的 F_s 值也存在极显著差异 ($F = 33.36, P < 0.01$)。

2.1.3 对 PS II 有效光化学量子效率 (F'_v/F'_m) 的影响 在光适应条件下, PS II 有效光化学量子效率 (F'_v/F'_m) 反映了有热耗散存在时 PS II 反应中心完全开放时的光化学效率, 也称为天线转换效率^[15]。从表 1 可知, 在 1、2 和 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下, 香椿、

刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎 5 个树种幼苗叶片的 F'_v/F'_m 值呈减小的趋势。多重比较结果显示, 各胁迫处理组 5 个树种幼苗叶片的 F'_v/F'_m 值变化趋势与 F_v/F_m 值较一致, 但香椿、刺槐和楸树叶片的 F'_v/F'_m 值的变化幅度小于常绿白蜡和北美红栎。

方差分析结果显示(表 2), NaCl 胁迫条件下, 不同胁迫处理组间的 F'_v/F'_m 值存在极显著差异 ($F = 17.03, P < 0.01$), 不同树种间的 F'_v/F'_m 值也存在极显著差异 ($F = 28.61, P < 0.01$)。

2.1.4 对 PS II 非循环光合电子传递速率 (ETR) 的影响 PS II 非循环光合电子传递速率 (ETR) 是实际光照强度条件下的表观电子传递速率^[16], 也是实际光照强度下的非循环电子传递速率的反映。如表 1 所示, 除香椿外, 刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎 4 个树种幼苗叶片的 ETR 值总体上均随 NaCl 质量浓度的提高呈降低的趋势, 表明在光照条件下, $1 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫可使刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎幼苗叶片的光化学电子传递量明显减少; 而随着 NaCl 质量浓度的提高, 香椿幼苗叶片的 ETR 值呈先减小后增加的趋势, 当 NaCl 质量浓度达到 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其 ETR 值比对照增加了 40%, 可能是香椿通过自身的可逆调节提高了电子传递速率, 用以应对暂时的高强度胁迫环境, 但随着胁迫时间的延长, 其 ETR 值仍然难以改变下降的趋势。

方差分析结果显示(表 2), 在 NaCl 胁迫条件下, 不同处理组间的 ETR 值存在极显著差异 ($F = 12.65, P < 0.01$), 不同树种间的 ETR 值也存在极显著差异 ($F = 10.68, P < 0.01$)。

2.1.5 对 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 的影响 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 是在光照条件下 PS II 反应中心部分关闭时的实际光化学效率, 该指标反映了叶片

用于光合传递的能量占所吸收的光能比例,其值大小可反映 PS II 反应中心的开放程度^[14]。由表 1 可见,在 1 和 2 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,香椿、刺槐和楸树幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值与对照组接近;在 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,香椿、刺槐和楸树幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值均显著降低,分别为对照组的 94%、87% 和 81%。在 1 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,常绿白蜡幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值较对照组略有降低,但差异不显著;在 2 和 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,常绿白蜡幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值较对照组显著降低,分别为对照组的 73% 和 66%。在 1、2 和 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,北美红栎幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值均较对照组有所降低,但差异不显著,分别为对照组的 82%、82% 和 89%。上述分析结果表明,经 1、2 和 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫处理后,供试 5 个树种幼苗叶片的 Φ_{PSII} 值总体上低于对照组,NaCl 胁迫对 5 个树种幼苗叶片的实际光化学效率有抑制作用。

方差分析结果显示(表 2),在 NaCl 胁迫条件下,不同处理组间的 Φ_{PSII} 值存在极显著差异($F=17.33$, $P<0.01$),不同树种间的 Φ_{PSII} 值也存在极显著差异($F=4.77$, $P<0.01$)。

2.2 NaCl 质量浓度及不同树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的相关性分析

对 NaCl 胁迫条件下 NaCl 质量浓度及不同树种幼苗叶片叶绿素荧光参数的相关性进行分析,结果见表 3。

由表 3 可见,不同树种幼苗叶片的 F_v/F_m 值、 F_s 值、 F'_v/F'_m 值、ETR 值和 Φ_{PSII} 值与 NaCl 质量浓度均呈极显著的负相关关系($P<0.01$),即:叶片各叶绿素荧

光参数均随 NaCl 胁迫浓度的提高而极显著减小。在各荧光参数之间,除 F_s 值与 ETR 值间无显著的相关关系外, F_v/F_m 值、 F_s 值、 F'_v/F'_m 值、ETR 值和 Φ_{PSII} 值之间均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关关系。

3 讨论和结论

暗适应后叶片 PS II 最大光能转换效率(F_v/F_m)的大小是判断植物是否受到光抑制的主要指标,在没有环境胁迫的条件下,植物暗适应后的 F_v/F_m 值一般为 0.80~0.85,由于不同树种对环境胁迫的反应不一样,其 F_v/F_m 值的下降幅度也有所差异^[17]。韩张雄等^[18]对 3 种荒漠植物的研究表明,在 NaCl 胁迫条件下,囊果碱蓬(*Suaeda physophora* Pall.)的 F_v/F_m 值降低幅度较小,而梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]和白梭梭(*H. persicum* Bunge ex Boiss. et Buhse)的 F_v/F_m 值则有明显降低。作者的研究结果显示,在 1 和 2 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,香椿、刺槐和楸树幼苗叶片的 F_v/F_m 值与对照组基本保持在同一水平,均在 0.8 以上,而在 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下, F_v/F_m 值才显著降低,这 3 个树种均表现出较好的耐盐性;而常绿白蜡幼苗叶片则在受到 2 g · L⁻¹ NaCl 胁迫处理后 F_v/F_m 值水平下降,北美红栎幼苗叶片在受到 1 g · L⁻¹ NaCl 胁迫时 F_v/F_m 值低于 0.80,说明这 2 种树种对 NaCl 胁迫较为敏感。

一般来讲,NaCl 胁迫对植物的光合作用具有抑制作用,而且随外界盐浓度的提高,被抑制的程度也越大^[10]。本实验结果也显示,在 1、2 和 3 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,香椿、刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎 5 个树种幼苗叶片的 F_v/F_m 、稳态荧光参数(F_s)、PS II 有效光化学量子效率(F'_v/F'_m)、PS II 非循环光合电子传递速率(ETR)和 PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII})基本是随 NaCl 质量浓度的提高呈降低的趋势,这与惠红霞等^[19]对枸杞(*Lycium barbarum* L.)叶片的研究结果基本一致。主要因为 NaCl 胁迫使 PS II 反应中心活性下降,叶片受到光抑制,PS II 反应中心可能受到不同程度的损伤。尽管供试的 5 个树种的叶绿素荧光参数在不同质量浓度的 NaCl 胁迫条件下略有差异,但并不影响对它们耐盐能力强弱级别的划分。总的来说,刺槐、香椿和楸树的耐盐性较强,常绿白蜡的

表 3 NaCl 胁迫条件下 NaCl 质量浓度及叶片叶绿素荧光参数之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient among NaCl concentration and leaf chlorophyll fluorescence parameters under NaCl stress condition¹⁾

| 参数 Parameter | 相关系数 Correlation coefficient | | | | |
|-----------------|------------------------------|----------|-------------|----------|-----------|
| | C | F_s | F'_v/F'_m | ETR | F_v/F_m |
| F_s | -0.399 ** | | | | |
| F'_v/F'_m | -0.402 ** | 0.799 ** | | | |
| ETR | -0.416 ** | 0.016 | 0.306 ** | | |
| F_v/F_m | -0.494 ** | 0.535 ** | 0.783 ** | 0.453 ** | |
| Φ_{PSII} | -0.504 ** | 0.189 * | 0.485 ** | 0.959 ** | 0.564 ** |

¹⁾ C: NaCl 质量浓度 Concentration of NaCl; F_v/F_m : PS II 最大光能转换效率 Maximal photochemical efficiency of PS II in dark; F_s : 稳态荧光参数 Fluorescence in stable state; F'_v/F'_m : PS II 有效光化学量子效率 Photochemical efficiency of PS II in light; ETR: PS II 非循环光合电子传递速率 Intrinsic PS II efficiency; Φ_{PSII} : PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II in light. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

耐盐性稍弱一些,而北美红栎对 NaCl 胁迫最为敏感,耐盐性也最弱。

研究表明,利用叶绿素荧光参数可以准确监测植物在光、温、水、盐、养分和病等逆境胁迫条件下的健康状况及生理反应^[20]。本研究结果也显示,NaCl 胁迫对香椿、刺槐、楸树、常绿白蜡和北美红栎 5 个树种幼苗叶片叶绿素荧光参数存在显著影响。NaCl 胁迫能引起叶片叶绿素荧光参数的变化、导致光合作用的异常、影响光合电子的传递过程,这些变化都是 NaCl 胁迫造成树木伤害的主要生理基础,而由于不同树种的遗传基础不同,对 NaCl 胁迫表现出明显不同的适应性。

参考文献:

- [1] 刘小京,刘孟雨. 盐生植物利用与区域农业可持续发展[C]. 北京:气象出版社,2002:1-9.
- [2] 吴永波,薛建辉. 盐胁迫对 3 种白蜡树幼苗生长与光合作用的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2002,26(3):19-22.
- [3] 曹福亮. 中国南方主要造林树种耐盐耐旱机理研究[M]. 北京:中国林业出版社,1999:7-17.
- [4] 张川红,沈应柏,尹伟伦,等. 盐胁迫对几种苗木生长及光合作用的影响[J]. 林业科学,2002,38(2):27-31.
- [5] 邱栋梁,林 鹏. 植物耐盐的分子机理研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2002,10(3):281-292.
- [6] 丁海武,李 莹. 植物耐盐性研究进展[J]. 北华大学学报:自然科学版,2004,5(3):257-263.
- [7] 徐锡增,徐呈祥. 硅对盐胁迫下枣树根尖离子微域分布的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(2):85-88.
- [8] 聂 磊,刘鸿先,彭少麟. 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下桉树苗生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报,2001,10(3):19-24.
- [9] 李青云,葛会波,胡淑明,等. 外源钙对盐胁迫下草莓叶绿素荧光参数的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2006,37(3):482-484.
- [10] 许详明,叶和春,李国凤. 植物抗盐机理的研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(4):379-387.
- [11] 王良桂,张春霞,彭方仁,等. 干旱胁迫对几种楸树苗木叶片荧光特性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(6):119-122.
- [12] Oxborough K. Imaging of chlorophyll *a* fluorescence: theoretical and practical aspects of an emerging technique for the monitoring of photosynthetic performance[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(400):1195-1205.
- [13] Naumann J C, Young D R, Anderson J E. Linking leaf optical properties to physiological responses for stress detection in coastal plant species[J]. Physiologia Plantarum, 2007, 131(3):422-433.
- [14] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报,1999,16(4):444-448.
- [15] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰. 高温胁迫对切花菊‘神马’光合作用与叶绿素荧光的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(10):2149-2154.
- [16] 周朝彬,宋于洋,王炳举,等. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北林学院学报,2009,24(4):5-9.
- [17] Zribi L, Fatma G, Fatma R, et al. Application of chlorophyll fluorescence for the diagnosis of salt stress in tomato "*Solanum lycopersicum* (variety Rio Grande)" [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120(3):367-372.
- [18] 韩张雄,李 利,徐新文,等. NaCl 胁迫对 3 种荒漠植物幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报,2008,28(9):1843-1849.
- [19] 惠红霞,许 兴,李前荣. NaCl 胁迫对枸杞叶片甜菜碱、叶绿素荧光及叶绿素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(3):109-114.
- [20] 李 晓,冯 伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2186-2196.