

盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响

唐 玲, 李倩中*, 荣立苹, 李淑顺

(江苏省农业科学院 园艺研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 南京 210014)

摘要:以鸡爪槭幼苗为材料, 采用盆栽方法, 研究了不同盐浓度[0.042%(对照)、0.2%、0.4%和0.6%]对鸡爪槭幼苗生长的伤害和叶绿素荧光参数的影响。结果显示: 当土壤 NaCl 含量为 0.2%、0.4%和0.6%时, 鸡爪槭幼苗分别表现为轻度、中度和重度盐害; 叶片含水量、叶绿素 a 和 b 及叶绿素总含量均随盐浓度的增加而显著下降, 花色素苷含量则表现为随盐浓度的增大而显著上升, 分别比对照高出 48.7%、280.3%和382.7%; 叶片叶绿素荧光参数 PSII 潜在活性(F_v/F_o)、潜在量子效率(F_v/F_m)、光化学量子产量($Yield$)、光合电子传递速率(ETR)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和光化学猝灭系数(qP)均随着盐浓度的增大呈显著下降趋势, 但非光化学猝灭系数(NPQ)在低盐胁迫时则较对照显著提高, 0.2%NaCl 处理时比对照显著增加 33.3%, 而高盐胁迫下则显著下降。研究表明, 盐胁迫显著抑制了鸡爪槭幼苗叶片叶绿素合成和光合作用进行, 而幼苗叶片在低盐胁迫下则可能通过增加 PSII 反应中心非辐射热能量耗散来保护光合机构不受损害, 从而表现出一定的耐盐胁迫能力。

关键词:鸡爪槭; 盐胁迫; 叶片含水量; 色素; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.7

文献标志码: A

Effects of Salt Stress on the Growth and Leaf Chlorophyll Fluorescence in *Acer palmatum* Seedlings

TANG Ling, LI Qianzhong*, RONG Liping, LI Shushun

(Institute of Horticulture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Nanjing 210014, China)

Abstract: The effects of different concentrations of NaCl[0.042%(CK), 0.2%, 0.4% and 0.6%] on the injury and chlorophyll fluorescence in *Acer palmatum* seedlings were performed by pot experiment. The results showed that the salt injury of *A. palmatum* seedlings tuned on mild, moderate and severe respectively when the soil salt contents were set at 0.2%, 0.4% and 0.6%. Leaf water content, chlorophyll a and chlorophyll b and the total contents of chlorophyll significantly decreased with the increased salt concentration. At the same time, the anthocyanin content significantly increased with the increased salt concentration by 48.7%, 280.3% and 382.7% higher than those of CK respectively. Leaf F_v/F_o , F_v/F_m , $Yield$, ETR , Φ_{PSII} and qP significantly decreased with the increased salt concentration, while NPQ significantly increased under low concentration stress and decreased under high concentration stress compared with control. NPQ of the treatments under 0.2% NaCl stress was 33.3% higher than those of CK significantly. It suggested that leaf chlorophyll biosynthesis and photosynthesis were significantly inhibited under salt stress in *A. palmatum*. While the moderate salt stress could protect photosynthetic apparatus from damage by increasing the energy consumption of PSII reaction center, so the seedling leaves show a certain ability of salt stress tolerance.

Key words: *Acer palmatum*; salt stress; leaf water content; pigment; chlorophyll fluorescence

收稿日期: 2015-06-25; 修改稿收到日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(31300584); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(12)5091]

作者简介: 唐 玲(1983—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事观赏植物育种栽培研究及园艺工程技术研究, E-mail: tangling1983@126.com

* 通信作者: 李倩中, 研究员, 主要从事观赏植物育种栽培研究及园艺工程技术研究。E-mail: liqianzhong2013@163.com

中国盐碱地面广大,各类盐碱地面积总计 9 913.3 万公顷^[1],包括许多城市土地也有不同程度的盐碱化^[2],致使很多城市绿化树种在盐胁迫条件下生长。而前人大量研究表明,盐胁迫能直接影响树木的生长发育,尤其在光合作用方面,表现为叶片气孔导度减弱,叶绿素含量降低,光合效率下降,导致树木生长发育不同程度受害,如柳枝稷叶片净光合速率在盐胁迫下显著下降^[3],桑树幼苗在高盐胁迫下最大荧光、最大光化学效率、潜在光化学效率和 PSⅡ 有效光化学量子效率显著降低^[4],杨树在盐胁迫下叶绿体结构受到破坏而引起叶绿体色素含量下降、光合能力减弱^[5-6];但也有研究发现一些苗木叶片在盐胁迫下能维持或提升净光合速率,表现出较好的耐盐性^[7]。

鸡爪槭作为重要的城市观赏与绿化树种,其需求量大,且较为适合盐碱地种植^[2],在土地盐碱化城市生态绿化过程中起着不可或缺的作用。但迄今为止,鸡爪槭对盐胁迫的生理响应机制仍然不明确,且研究报道甚少,不利于鸡爪槭种植水平的提高和品种改良。因此,本研究设置不同的土壤盐浓度,分析鸡爪槭叶色和叶绿素荧光参数对盐胁迫的响应,以明确盐胁迫对鸡爪槭叶片光合特性的影响机制,为鸡爪槭的栽培管理水平提升和品种改良提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

试验地设在江苏省农业科学院园艺研究所智能温室内。试材为生长健壮、长势一致、生长良好的一年生鸡爪槭幼苗,苗高 30 cm 左右。鸡爪槭幼苗采自江苏省农业科学院园艺研究所槭树资源圃。

1.2 试验处理

试验于 2011 年 7 月~9 月间进行,温室内平均温度为 28 ℃,平均相对湿度为 73%,光照强度为 0~800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7 月中旬将鸡爪槭幼苗移栽到 30 cm×25 cm×15 cm 的塑料花盆中,每盆 1 株,栽培基质为珍珠岩,每周浇灌 1 次 Hoagland 完全营养液(每盆 1 L),缓苗 15 d,之后再进行试验处理。依据预试验的筛选结果,试验共设置 4 个盐分梯度,土壤 NaCl 含量分别为 0.042%(对照)、0.2%、0.4%、0.6%,每处理 3 次重复,每重复 10 盆,随机排列。根据试验观察,盐处理 60 d 之后不同处理植株生长表现出明显差异,具体为:叶片出现不同程度卷曲或脱落,植株生长速度、生长量出现差

异。NaCl 处理后每隔 5 d 浇灌 1 次营养液。试验期间,盆底放置塑料托盘,浇灌后将渗出的溶液回浇到盆内,基质上层用细沙覆盖保湿,防止水分和盐分流失,其他按常规管理。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片色素含量及含水量 2011 年 9 月 21 日(盐胁迫处理后 60 d),选取枝条中部成熟叶片沿中脉两侧打孔取叶圆片按朱广廉等的方法测定叶绿素含量^[8];叶片花色素苷(*Ant*)含量测定参照马志本等的方法(以 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示)^[9];同期取新鲜叶片于天平上称其鲜质量 W_1 ,放入烘箱内 105 ℃ 杀青 0.5 h,转入 80 ℃ 烘干,称其干质量 W_2 ,然后计算叶片含水量。叶片含水量(%) = $[(W_1 - W_2) / W_1] \times 100\%$ 。

1.3.2 盐害指数 NaCl 处理后每 5 d 观察 1 次受害表现,第 60 天计算盐害指数(*SI*)和盐害率(*P*)^[10]。盐害分级标准为^[11]:0 级,无盐害症状;1 级,轻度盐害,有少部分叶尖、叶缘或者叶脉变黄;2 级,中度盐害,有大约 1/2 的叶尖、叶缘焦枯;3 级,重度盐害,大部分叶尖、叶缘焦枯或落叶;4 级,极重度盐害,枝枯、叶落、最终死亡。

盐害指数(*SI*) = $\sum(\text{盐害级值} \times \text{相应盐害级株数}) / (\text{总株数} \times \text{盐害最高级值}) \times 100\%$;

盐害率(*P*) = $(\text{出现盐害症状株数} / \text{调查总株数}) \times 100\%$ 。

1.3.3 叶绿素荧光参数 盐胁迫处理后第 60 天采用 Li-6400R 便携式荧光-光合作用测量系统的 6400-40 荧光叶室进行叶绿素荧光参数测定,叶片暗适应 20 min 后在 Default fluorometer 模式下测定并计算暗适应下鸡爪槭中上部功能叶片的荧光参数。荧光参数测定时间选在晴天光强稳定的中午前后进行,每处理测 5 片叶作为重复,取平均值并进行标准误分析。初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、稳态荧光 F_s 、光下最大荧光 F_m' 、光下最小荧光 F_0' 等参数可由仪器直接测出。并由此计算出其他各相关指标:可变荧光(F_v) = $F_m - F_0$;PSⅡ 潜在活性(F_v/F_0);PSⅡ 潜在量子效率(F_v/F_m) = $(F_m - F_0)/F_m$;光化学猝灭系数(qP) = $(F' - F_s)/(F_m' - F_0)$ ^[12];非光化学猝灭系数(NPQ) = $F_m/F_m' - 1$;PSⅡ 实际光化学效率(Φ_{PSII}) = $qP(F_v'/F_m') = (F_m' - F_s)/F_m'$ ^[13];光合电子传递速率(ETR) = $(F_m' - F_s)/F_m' \times PFD \times 0.5 \times 0.84$;光化学量子产量($Yield$) = $(F_m' - F)/F_m'$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件进行数据分析,用 SPSS 11.5 软件进行差异显著性分析,并用 SigmaPlot12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫条件下鸡爪槭的盐害指数和盐害率

各盐浓度处理均不同程度影响着鸡爪槭叶片含水量,且随着盐浓度的增大呈逐渐下降趋势(表 1),在 0.2%、0.4%和 0.6%盐浓度下,鸡爪槭叶片含水量分别比对照低 5.25%、6.7%和 23.52%,但仅 0.6%盐浓度下达到显著水平,且也与 0.2%和 0.4%盐浓度之间的差异显著。

同时,通过对鸡爪槭的盐害症状(表 1)分析发现,在 0.2%盐浓度下,有 1/5 的鸡爪槭叶片叶尖和叶缘呈失水萎蔫状,表现出轻度盐害症状;在 0.4%盐浓度下,约有 1/2 的鸡爪槭叶片叶尖和叶缘失水萎蔫并有焦枯,表现出中度盐害症状;在 0.6%盐浓度下,鸡爪槭植株出现了重度盐害,叶片大部分失水萎蔫并有焦枯,焦枯面积约达 1/2 以上。另外,各盐处理的鸡爪槭盐害指数和盐害率均随盐浓度的增大呈上升趋势,且不同盐浓度处理间差异均达到显著水平。可见,随着盐胁迫浓度的增加,鸡爪槭叶片含水量逐渐下降,盐害指数和盐害率依次显著增加,分别出现轻度、中度和重度盐害症状。

2.2 盐胁迫对鸡爪槭叶片色素含量的影响

由表 2 可以看出,随着盐胁迫浓度的增加,鸡爪槭幼苗叶片中叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、总叶绿素(Chl)均逐渐降低,叶绿素 a/b(Chl a/Chl b)

则逐渐增加。其中,在 0.2%、0.4%和 0.6%NaCl 处理下,Chl a 含量较对照分别下降了 0.5%、36.3%和 65.8%,Chl b 含量分别下降了 4.6%、50.0%和 78.5%,Chl 含量分别下降了 1.5%、39.6%和 68.8%,Chl a/Chl b 分别增加了 0.02%、27.2%和 59.5%,且在后 2 个浓度下均达到显著水平。同时,鸡爪槭幼苗叶片中含量随着盐浓度的提高而逐渐大幅度增加,0.2%、0.4%和 0.6%NaCl 处理较对照分别显著提高 48.7%、280.3%和 382.7%,且后 2 者 NaCl 处理的花色素苷含量差异并不显著。由此可见,各浓度盐胁迫致使鸡爪槭幼苗叶片叶绿素含量不同程度降低,而使其 Chl a/Chl b 和花色素苷含量不同程度增加,且盐浓度越高升降幅度越大;同等盐浓度胁迫下,花色素苷含量的变化幅度最大,随后依次是 Chl b 含量、Chl a 含量和 Chl a/Chl b 的值,即盐胁迫明显促进了鸡爪槭叶片花色素苷的合成,却破坏了 Chl b 和 Chl a 的合成,且 Chl b 受破坏的程度更大。

2.3 盐胁迫对鸡爪槭叶片叶绿素荧光参数的影响

2.3.1 PS II 潜在活性和最大光化学量子效率

F_v/F_m 表示反应中心 PS II 的潜在活性,可变荧光与最大荧光的比值(F_v/F_m)表示 PS II 的最大光能转化效率^[14]。鸡爪槭叶片中 PS II 的潜在活性(F_v/F_m)和最大光化学量子效率(F_v/F_m)均随着盐浓度的增大呈逐渐下降趋势(图 1)。在 0.2%、0.4%和 0.6%盐浓度下,鸡爪槭叶片 PS II 的潜在活性分别比对照显著下降了 17.3%、30.2%和 32.7%,而 0.4%和 0.6%盐浓度之间的差异却不显著。鸡爪槭叶片最大光化学量子效率在 0.2%盐浓度处理下

表 1 不同 NaCl 浓度处理后鸡爪槭叶片的含水量、盐害指数及盐害率

Table 1 Water content,salt injury indexes and salt injury rates of *A. palmatum* with NaCl treatments

NaCl 浓度 NaCl concentration/%	含水量/% Water content	盐害指数/% Salt injury index	盐害率/% Salt injury rate	盐害症状 Salt injury symptom
0.042(CK)	72.42±4.24a	0d	0d	正常生长 Natural growth condition
0.2	67.17±3.70a	2.80c	3.44c	轻度盐害,约 1/5 的叶尖和叶缘失水萎蔫状 Mild salt injury,about 20% leaf opex and leaf margin of the seedlings showed injury symptoms such as water loss and wilting
0.4	65.72±3.80a	20.21b	17.21b	中度盐害,约 1/2 的叶尖和叶缘失水萎蔫并有焦枯 Moderate salt injury,about 50% leaf opex and leaf margin of the seedlings showed injury symptoms such as water loss,wilting and withered
0.6	48.90±5.58b	50.65a	42.33a	重度盐害,约 4/5 叶尖和叶缘失水萎蔫并有焦枯,焦枯面积约达 1/2 以上 Severe salt injury,about 80% leaf opex and leaf margin of the seedlings showed injury symptoms such as water loss,wilting and more than half area of these leaves became dry rot

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同
Note:Different normal letters indicate significant difference among salt treatments at 0.05 level. The same as below

表 2 盐胁迫对鸡爪槭叶片色素含量的影响
Table 2 Effects of salt stress on pigment content in leaves of *A. palmatum*

NaCl 浓度 NaCl concentration/%	Chl a /(mg · g ⁻¹)	Chl b /(mg · g ⁻¹)	Chl(a+b) /(mg · g ⁻¹)	Chl a/b	花色素苷 Anthocyanin /(nmol · g ⁻¹)
0.042(CK)	2.20±0.06a	0.69±0.03a	2.89±0.03a	3.17±0.22c	21.93±2.78c
0.2	2.19±0.02a	0.66±0.01a	2.85±0.02a	3.30±0.02c	32.61±4.75c
0.4	1.40±0.05b	0.35±0.02b	1.75±0.06b	4.04±0.10b	83.41±10.01b
0.6	0.75±0.03c	0.15±0.01c	0.90±0.04c	5.06±0.25a	105.85±14.93a

注:表中测定值均为鲜质量
Note: All measured data are fresh weight

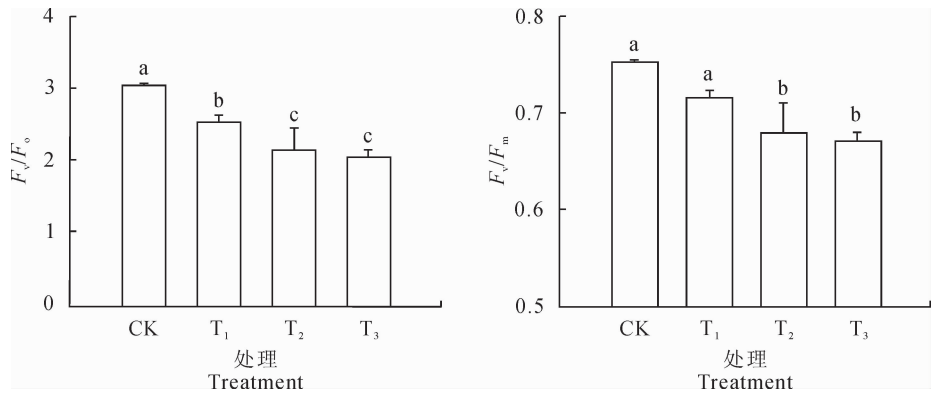


图 1 不同 NaCl 浓度下鸡爪槭幼苗叶片的 F_v/F_o 和 F_v/F_m
CK、T₁、T₂ 和 T₃ 分别为 0.042% (对照)、0.2%、0.4% 和 0.6% NaCl 浓度处理;不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 1 The F_v/F_o and F_v/F_m in leaves of *A. palmatum* under salt stress
CK, T₁, T₂ and T₃ indicate 0.042% (control), 0.2%, 0.4% and 0.6% NaCl treatments, respectively.
Different normal letters indicate significant difference among salt treatments at 0.05 level. The same as below

仅比对照下降了 4.9%,未达到显著水平,而在 0.4%和 0.6%盐浓度下却分别比对照显著下降了 9.9%和 10.7%,而 2 个盐浓度之间则差异不显著。可见,鸡爪槭叶片中 PSⅡ潜在活性在轻度盐胁迫下就受到显著抑制,而其最大光量子效率只在中度和重度盐胁迫下才显著下降,即 PSⅡ潜在活性对盐胁迫更敏感。

2.3.2 实际光量子产量和表观光合电子传递速率

从图 2 看出,鸡爪槭叶片中实际光量子产量(Yield)和表观光合电子传递速率(ETR)均随着盐浓度的增大而逐渐降低,且都与对照差异达到显著水平。在 0.2%、0.4%和 0.6%盐浓度下,鸡爪槭叶片的 Yield 值分别比对照显著降低了 37.9%、64.6%和 77.2%,ETR 值则分别比对照显著降低了 37.9%、64.5%和 77.1%,而 0.4%和 0.6%盐浓度之间的差异均不显著。以上结果表明,不同浓度 NaCl 胁迫均显著抑制了鸡爪槭叶片实际光合量子产量和表观光合电子传递效率。

2.3.3 荧光猝灭动力学 光化学淬灭系数(qP)反

映的是 PSⅡ天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,非光化学淬灭系数(NPQ)反映的是 PSⅡ天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的部分^[15]。从表 3 可以看出,鸡爪槭叶片的实际光化学效率($\Phi_{PSⅡ}$)和光化学淬灭系数(qP)均随盐浓度的增加而逐渐下降,且 0.4%和 0.6%NaCl 处理与对照差异均达到显著水平。

与以上 2 个参数表现不同,鸡爪槭叶片的非光化学淬灭(NPQ)随盐胁迫浓度的增加先升高后降低,并在 0.2%NaCl 处理下达到最高值,并比对照显著增加了 33.3%;而当 NaCl 浓度为 0.4%时, NPQ 有所降低,但仍显著高于对照;而当 NaCl 浓度为 0.6%时, NPQ 已比对照显著降低。以上结果表明,浓度高于 0.4%NaCl 胁迫可使鸡爪槭 PSⅡ的光化学效率显著减低,并显著减少用于光化学途径的能量分配比例,且不能有效启动非辐射热能量耗散机制将过量的光能以热的形式散发掉,从而对光合机构造成伤害。

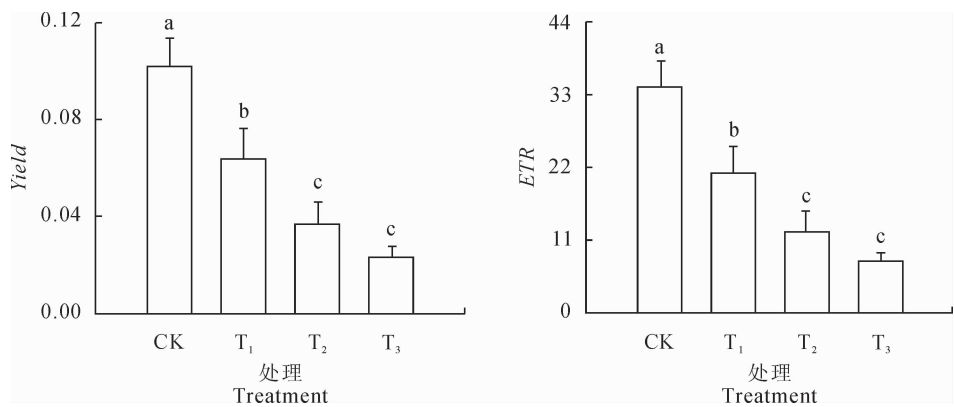


图 2 不同 NaCl 浓度对鸡爪槭叶片 Yield 和 ETR 的影响

Fig. 2 Effects of salt stress on Yield and ETR in leaves of *A. palmatum*

表 3 不同 NaCl 浓度胁迫下鸡爪槭叶片 *qP*、*NPQ* 和 Φ_{PSII} 的变化

Table 3 The *qP*, *NPQ* and Φ_{PSII} in leaves of *A. palmatum* under NaCl stress

NaCl 浓度 NaCl concentration/%	<i>qP</i>	<i>NPQ</i>	Φ_{PSII}
0.042(CK)	0.24±0.02a	1.95±0.27b	0.10±0.01a
0.2	0.21±0.05a	2.60±0.24a	0.06±0.01b
0.4	0.13±0.02b	2.21±0.16a	0.04±0.01c
0.6	0.11±0.01b	0.97±0.32c	0.02±0.01c

3 讨 论

不同树种幼苗叶片光合作用对盐胁迫响应不同,柳树^[3]、桑树^[4]、杨树^[5]对盐胁迫较为敏感,其叶片光合作用效率在盐胁迫下显著下降,而核桃、槭树等在高盐胁迫下光合作用效率才显著下降^[7],国槐在一定盐浓度胁迫下光合作用效率则还有所增强^[7]。不同槭属植物对盐胁迫耐性也不一致,鸡爪槭表现出较好的耐盐性^[2]。而光合作用强弱可作为反映植物耐逆与否的重要生理指标,且与叶绿素含量和叶绿素荧光诱导动力学曲线及参数的变化密切相关。已有的研究证实,葡萄幼苗叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、Yield、ETR 和 *qP* 在盐胁迫下同时下降,导致光合作用效率显著下降^[16];桑树幼苗叶片 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 随盐浓度增加逐渐下降且在高盐浓度下达到显著水平^[4]。本研究发现,鸡爪槭幼苗叶片叶绿素 a 和 b 及叶绿素总含量均随盐浓度的增加而显著下降,叶绿素荧光参数 F_v/F_o 也显著下降,表明此时鸡爪槭叶片 PS II 光化学反应中心活性已受到明显影响,潜在活性下降;同时,叶片 F_v/F_m 、Yield、ETR、 Φ_{PSII} 和 *qP* 也随着盐浓度的增大呈显著下降趋势,且高盐胁迫下降尤为显著,这表明盐胁迫下鸡

爪槭叶片捕获的光能用于光化学反应比例降低,而转化为热能消耗的比例升高,将导致光合作用可利用能量下降;但同期 *NPQ* 在低盐胁迫时则较对照显著提高,高盐胁迫下显著下降,又表明低盐胁迫下幼苗叶片可能通过增加 PS II 反应中心非辐射热能量耗散来保护光合机构不受损害,而高盐胁迫下 PS II 反应中心光合机构受到严重损害。本研究同时发现,盐胁迫下鸡爪槭叶片花色素苷含量显著提高,而花色素苷可以吸收光能并耗散叶片过剩光能进而保护光合机构^[17-18],表明在盐胁迫下鸡爪槭能通过提高叶片花色素苷含量来缓解光合机构受损程度。

此外,盐胁迫造成植物叶片光合作用受阻,与叶片含水量密切相关^[19-20]。本研究发现,鸡爪槭叶片含水量在中低盐胁迫条件下没有显著下降,盐害表现较轻;而高盐胁迫条件下显著下降,盐害表现较重。表明较高的叶片含水量有利于维持鸡爪槭幼苗叶片正常代谢活动,这也与叶绿素荧光参数变化趋势相吻合。

综上所述,在盐胁迫条件下,鸡爪槭叶片含水量和叶绿素含量显著下降,PS II 的实际光化学转化效率降低,进而影响叶片光合作用;而同期叶片花色素苷含量显著提高,有助于缓解盐胁迫对叶片光合机构的伤害。但在低盐条件下,鸡爪槭叶片含水量和叶绿素含量以及叶绿素荧光动力学参数没有显著下降,且可能通过 PS II 反应中心非辐射热能量耗散增加来保护光合机构不受损害。在盐胁迫下,鸡爪槭叶片细胞形态也可能发生相应的变化,若能在进行叶绿素荧光特性探讨的基础上,进一步进行叶绿体超微结构变化特征的分析,可更为深入地阐释鸡爪槭对盐胁迫响应的生理机制,这也将作为本研究后续的工作和方向。

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] LI Q ZH(李倩中),SU J L(苏家乐),LIU X H(刘晓宏),*et al.* Salinity tolerance difference of four *Acer* plant[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*(江苏农业科学),2009,**37**(6):227—228(in Chinese).
- [3] ZHAO CH Q(赵春桥),LI J W(李继伟),FAN X F(范希峰),*et al.* Effects of different salt stresses on biomass,quality and photosynthetic physiology in switchgrass[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报). 2015,**35**(19):1—9(in Chinese).
- [4] KE Y ZH(柯裕州),ZHOU J X(周金星),LU N(卢楠),*et al.* Effects of salinity on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence characteristics of Mulberry (*Morus alba*) seedling[J]. *Forest Research*(林业科学研究). 2009,**22**(2):200—206(in Chinese).
- [5] WANG X W(王秀伟),JIA G M(贾桂梅),MAO Z J(毛子军),*et al.* Effect of NaCl tolerance on photosynthetic physiology and growth of seedlings of three poplar clones[J]. *Bulletin of Botanical Research*(植物研究) 2015,**35**(1):27—33(in Chinese).
- [6] JIANG CH Q(姜超强),LI J(李杰),LIU ZH P(刘兆普),*et al.* Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of transgenic poplar under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报),2010,**30**(2):301—308(in Chinese).
- [7] ZHANG CH H(张川红),SHEN Y B(沈应柏),YIN W L(尹伟伦). Effect of salt stress on photosynthesis and growth of four tree species seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学),2002,**38**(2):27—31(in Chinese).
- [8] 朱广廉,钟海文,张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京:北京大学出版社,1990:51—54.
- [9] MA ZH B(马志本),CHENG Y E(程玉娥). The chemical method of anthocyanins content in the surface of apple fruit[J]. *China Fruits*(中国果树),1984,4:49—51(in Chinese).
- [10] LI H Y(李会云),GUO X W(郭修武). Influence of NaCl on activities of protective enzymes and MDA content in grape root stock leaves[J]. *Journal of Fruit Science*(果树学报),2008,**25**(2):240—243(in Chinese).
- [11] DU ZH J(杜中军),ZHAI H(翟衡),LUO X SH(罗新书),*et al.* Salt tolerance identification on apple root stocks[J]. *Journal of Fruit Science*(果树学报),2002,**19**(1):4—7(in Chinese).
- [12] VAN KOOTEN O,SNELJ F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynthesis Research*,1990,**25**(3):147—150.
- [13] GENTY B,BRIANTAIS J M,BAKER N R. The relationship between the quenching of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*,1989,**990**(1):87—92.
- [14] ZHANG SH R(张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报),1999,**16**(4):444—448(in Chinese).
- [15] CHEN J M(陈建明),YU X P(俞晓平),CHENG J A(程家安). The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*(浙江农业学报),2006,**18**(1):51—55(in Chinese).
- [16] XING Q ZH(邢庆振),YU S L(郁松林),NIU Y P(牛雅萍),*et al.* Effects of salt stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence characteristics of grape (Red Globe) seedlings[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*(干旱地区农业研究),2011,**29**(3):96—100(in Chinese).
- [17] PFUNDEL EE,BEN GHZLEN N,MEYER S,*et al.* Investigating UV screening in leaves by two different types of portable UV fluorimeters reveals *in vivo* screening by anthocyanins and carotenoids[J]. *Photosynthesis Research*,2007,**93**(3):205—221.
- [18] PIETRINI F,IANNELLI MA,MASSACCI A. Anthocyanin accumulation in the illuminated surface of maize leaves enhances protection from photoinhibitory risks at low temperature,without further limitation to photosynthesis[J]. *Plant, Cell & Environment*,2002,**25**(10):1 251—1 259.
- [19] SUN J B(孙景波),SUN G Y(孙广玉),LIU X D(刘晓东),*et al.* Effects of salt stress on mulberry seedlings growth,leaf water status, and ion distribution in various organs [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报),2009,**20**(3):543—548(in Chinese).
- [20] WANG D Q(王东清),LI G Q(李国旗),WANG L(王磊). Daily dynamics of photosynthesis and water physiological characteristics of *Apocynum venetum* and *A. cannabinum* under drought stress[J]. *Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报),2012,**32**(6):1 198—1 205(in Chinese).

(编辑:裴阿卫)