

氯化钠胁迫对香樟幼苗光合色素和叶绿素荧光参数的影响

王金平¹, 张金池^{1*}, 岳健敏¹, 傅致远¹, 印荣华², 陈义高²

(1. 南京林业大学林学院, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2. 大丰林场, 盐城 224100)

摘要: 通过研究氯化钠胁迫下香樟 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗叶片光合色素和叶绿素荧光参数的变化规律, 为香樟耐盐性的研究以及沿海地区的引种栽培提供理论依据。以温室大棚中培育的实生香樟幼苗为实验材料, 设置2‰、6‰ 2种盐梯度(质量浓度), 清水为对照(CK), 通过测定苗高相对生长量、基径相对生长量以及受胁迫后第7天(初期)、第39天(前期)、第76天(中期)、第120天(后期)幼苗叶片相对含水量、光合色素和荧光参数, 研究盐胁迫对香樟光合机构的影响。结果表明, 香樟幼苗受胁迫程度随着胁迫时间的延长而加深; 6‰的盐浓度能显著抑制香樟生长, 严重损害其光合机构; 2‰的盐浓度胁迫下, 香樟的生长量和光合功能并未受显著影响, 胁迫后期, 香樟可能由于气温显著降低而进入冬季休眠, 耐盐性降低, 2‰的盐浓度也影响了其光合机构功能, 而此时CK光合功能也有所下降, 但仍明显高于2‰的盐浓度处理。

关键词: 香樟; 氯化钠胁迫; 光合色素; 荧光参数

中图分类号: S718; Q945

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)04-0617-06

Effects of salt stress on photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence parameters of camphor seedlings

WANG Jinping¹, ZHANG Jinchi¹, YUE Jianmin¹, FU Zhiyuan¹, YIN Ronghua², CHEN Gaoyi²

(1. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, The Forestry College of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 2. Dafeng Forest Farm, Yancheng 224100)

Abstract: To provide a theoretical basis for the salt stress research and the introduction to the coastal area of Jiangsu Province for *Cinnamomum camphora*, the change of leaf photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence parameters of camphor seedlings under NaCl stress in different times was studied. Camphor seedlings cultivated in the greenhouse were treated with 2‰ and 6‰ (mass concentration) NaCl, and water as the control. On the 7th day (initial stage), the 39th day (earlier stage), the 76th day (medium term) and the 120th day (late period) after NaCl treatment, the relative high growth and relative base diameter growth before and after the experiment, leaf relative water content, photosynthetic pigment and fluorescence parameters were measured. Results showed that the damage degree became greater with the increase of salt-stress time; the photosynthetic apparatus was damaged severely and the growth of camphor was inhibited obviously under the salt stress of 6‰, but it did not be affected significantly under the salt stress of 2‰; however, in the late period, the ability of salt tolerance of camphor decreased, and the salt stress of 2‰ could also affect its photosynthetic function. Although the photosynthesis of CK also decreased at that time, but it was still stronger than that of the 2‰ salt treatment, which was probably caused by the dormancy due to a significant decrease of temperature.

Key words: *Cinnamomum camphora*; NaCl stress; photosynthetic pigment; chlorophyll fluorescence parameters

随着经济的发展, 人们对生存环境的要求越来越高, 而常绿阔叶树种的缺乏越来越制约着沿海地

区的环境绿化。香樟 (*Cinnamomum camphora*) 为高大常绿乔木, 是南方珍贵用材和优良的绿化树种,

收稿日期: 2017-02-26

基金项目: 江苏省科学技术计划项目 (BE2012344), 林业公益性行业科研专项 (201504406), 江苏省高校自然科学研究重大项目 (15KJA220004)和江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 共同资助。

作者简介: 王金平, 博士研究生。E-mail: 943517134@qq.com

* 通信作者: 张金池, 教授, 博士生导师。E-mail: zhangjc8811@163.com

且较耐水湿,在南方沿海地区极具应用价值,但南方沿海地区土壤普遍存在不同程度的盐渍化,因此,研究香樟的耐盐机理可为其在南方沿海地区的引种栽培提高依据。目前国内外对其耐盐性研究较少,相关的研究多集中于盐胁迫对香樟 K^+ 、 N^+ 含量^[1]、生理特性^[2-5]和光合作用^[6]等方面,而对于香樟在盐胁迫下叶片的光合功能随时间的变化则研究较少。

叶片中光合色素含量是反映植物光合能力的一个重要指标,许多研究证实,环境因子的改变可以引起光合色素含量的变化,进而引起光合功能的改变^[7]。叶绿素荧光参数与光合作用中的各种反应密切相关,包含许多光合作用信息,极易受逆境的影响,它的变化可反映出逆境对光合作用某些过程的影响,是快速、灵敏且无损伤的研究和探测逆境条件下光合机构运转情况的理想方法^[8]。目前关于运用叶绿素荧光技术在较长时间内研究香樟盐胁迫下光化学性能的报道尚未见。本研究通过研究盐胁迫下香樟的生长量、叶片相对含水量和光合色素含量以及荧光参数 (F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 P 、 D 和 E) 随时间的变化,掌握盐胁迫下香樟光合功能的变化规律,为香樟耐盐性的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理方法

2015年5月取苗高超过30 cm、大小和长势一致的半年生自培幼苗36株,定植于25 cm×25 cm的花盆中,培养基质为沙:蛭石=1:1(体积比),重量大致为3.5 kg,苗木生长期间保证水分供应,5月份至9月份,每隔25 d浇一次Hoagland's营养液,每次浇0.5 L。9月初进行盐处理,由于相关研究^[6]表明,香樟在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (2.925‰)浓度的NaCl胁迫28 d后光合色素和光合作用会显著降低,因此香樟的耐盐性应该在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,本实验设置2种盐处理,盐浓度分别为2‰(低盐浓度)、6‰(高盐浓度),以清水处理为对照(CK),来研究香樟在低盐和高盐浓度胁迫下光合色素和荧光参数随时间的变化规律,每个处理12棵,每个处理3个重复,实验开始时持续一周不浇水,然后一次性分别加入盐浓液浓度为0、7%和21%(NaCl质量浓度)各100 mL,以后每周浇一次水,为防止盐分流失,处理时花盆下放置拖盘,渗出的溶液再倒回盘中。相对含水量、光合色素和叶绿素荧光参数分别在9月8日(胁迫后第7天)、10月10日(胁迫后第39天)、11月16日(胁迫后第76天)和12月30日(胁迫后第120天)进行测定(表1)。

1.2 测定方法

苗高、基径相对生长量分别在9月8日,12月30日进行测定,每个处理12棵,苗高采用卷尺测量分别记为 M_0 、 M_1 ,基径采用电子游标卡尺测量,分别记为 J_0 、 J_1 ,苗高相对生长量: $MR=(M_1-M_0)/M_0$,基径相对生长量: $JR=(J_1-J_0)/J_0$ 。叶片相对含水率(RWC)采用蒸馏水浸泡及烘干称重法^[9]测定,光合色素采用乙醇-丙酮提取法测定^[10]。叶绿素荧光参数利用叶绿素荧光成像系统(CFI)测定:每个处理随机选择3株,每株选择3片成熟叶,测定前,鲜叶暗适应30 min,之后于荧光室中进行最大光化学效率(F_v/F_m)、有效光化学量子产量(F_v'/F_m')、实际光化学量子产量($Yield=\Phi_{PSII}=F_q'/F_m'$)的测定,测定过程中仪器光强设定为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,非循环光合电子传递速率($ETR=\Phi_{PSII} \times I \times a \times f$,其中 I 为光强, a 为吸收入射光的比例,通常为80%, f 为能量分布比例的估计值,在 C_3 植物中常为50%)^[11],PSII吸收的光能能量耗散分配比率^[12](PSII光化学反应能量耗散: $P=q_p \times F_v'/F_m'$,天线色素热耗散: $D=1-F_v'/F_m'$,过剩光能耗散: $E=(1-q_p) \times F_v'/F_m'$)。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对香樟苗高、基径相对生长量和叶片相对含水量的影响

由图1A可以看出,随着盐浓度的升高,香樟苗高相对生长量(MR)和基径相对生长量(JR)逐渐下降,MR和JR在低盐浓度下(2‰)与对照差异不显著,在高盐浓度下(6‰)差异显著,分别仅为CK的23.53%和32.05%。由图1B可以看出,随着盐胁迫强度和时间的增加,相对含水量逐渐下降:胁迫时间为7 d时,2种盐处理与CK相比相对含水量差异不显著;当胁迫时间为39 d时,6‰盐浓度处理与CK差异显著,当盐胁迫时间为120 d时,2‰盐浓度处理与CK差异显著(见图1B)。

2.2 盐胁迫对光合色素含量的影响

由图2可以看出,当胁迫时间为7 d时,叶绿素a含量(Chla)、叶绿素b含量(Chlb)、类胡萝卜素含量(Car)、叶绿素总含量(Chl)均随着盐浓度的增加而有所增加,2种盐处理下叶绿素a含量/叶绿素b含量和类胡萝卜素含量/叶绿素总含量与CK相比差异不显著;当胁迫时间为39 d时,与胁迫7 d相比CK处理下的光合色素含量几乎不变,2‰处理下略升高,6‰处理下下降较明显,Car/Chl比值略升高,此时,2种盐处理下的光合色素含量和Car/Chl比值均高于CK,Chla/Chlb比值均低于

CK, 但光合色素含量、Chla/Chlb 比值和 Car/Chl 比值与 CK 的差异不显著; 当胁迫时间为 76 d 时, 与胁迫 39 d 相比光合色素含量在 CK 处理下几乎不变, 6‰和 2‰处理下均下降显著, 2 个盐处理下的 Car/Chl 比值均上升显著, 而 3 个处理下的 Chla/Chlb 比值变化不大, 6‰处理下的光合色素含量显著低于 CK、Chla、Chlb 和 Car 分别比 CK 低 70.87%、70.21% 和 61.48%, 而 2‰和 6‰2 种盐处理下的 Car/Chl 比值显著高于 CK, 分别比 CK 高 14.64%和 30.96%, 此时, 光合色素含量随着盐浓度的升高而明显降低, Car/Chl 比值随着盐浓度的上升明显上升, 3 个处理

下的 Chla/Chlb 比值差异不显著; 当盐胁迫时间为 120 d 时, 与胁迫 76 d 相比光合色素含量在 6‰处理下几乎不变, 在 2‰处理下下降不显著, CK 处理下下降显著, 3 个处理下的 Chla/Chlb 比值均下降显著, 而 Car/Chl 比值在 CK 处理下上升显著, 在 6‰和 2‰处理下变化不显著, CK 处理下的 Chla/Chlb 比值与胁迫 7 d 相比差异不显著。此时, 与 CK 相比, 2‰和 6‰2 种盐处理下的光合色素含量和 Car/Chl 比值均差异不显著, Chla/Chlb 比值则显著降低, 分别降低 16.65%和 12.05%。

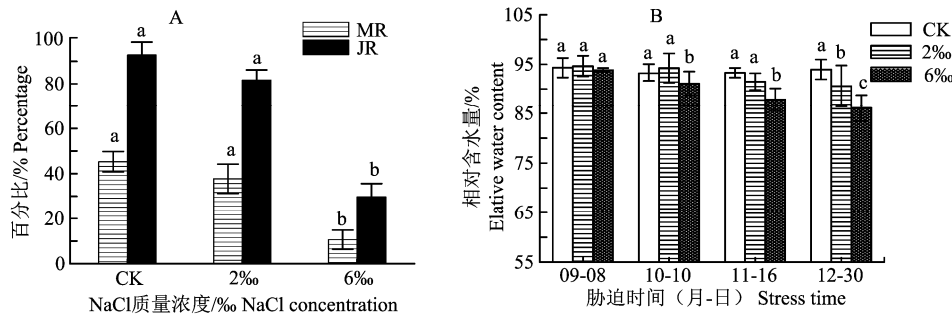


图 1 盐胁迫对香樟苗高、基径相对生长量和相对含水量的影响

Figure 1 Effects of NaCl stress on the MR, JR and relative water content of *Cinnamomum camphora*

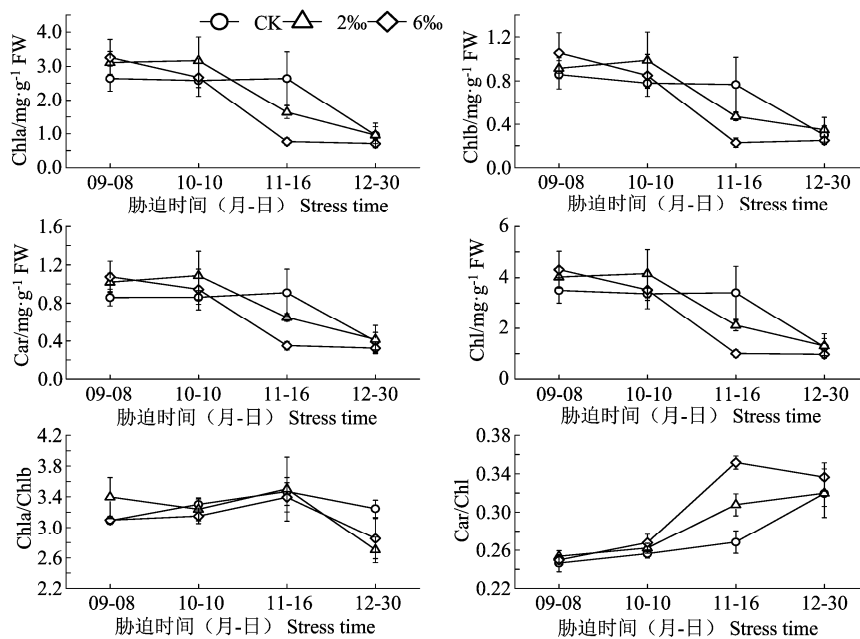


图 2 盐胁迫对香樟叶片光合色素含量的影响

Figure 2 Effects of NaCl stress on the photosynthetic pigment contents in leaves of *Cinnamomum camphora*

2.3 盐胁迫对樟树叶片荧光参数的影响

2.3.1 盐胁迫对樟树叶片 F_v/F_m 和 F_v'/F_m' 的影响

图 3 表明, 随着盐胁迫时间的增加, 氯化钠对香樟叶片 F_v/F_m 的影响逐渐显现出来, 胁迫时间在 40 d 内 2 种盐处理下的 F_v/F_m 与 CK 差异不显著, 当胁迫时间达到 76 d 时, 6‰处理下的 F_v/F_m 显著低于

CK, 比 CK 低 13.91%, 当胁迫时间到达 120 d 时, 3 个处理下的 F_v/F_m 差别进一步拉大, 2‰处理下的 F_v/F_m 比 CK 高 10%, 6‰处理下的 F_v/F_m 比 CK 低 17.06%。而 F_v'/F_m' 在胁迫 7 d 时, 2 种盐处理下的值明显高于 CK, 而在胁迫 39 d 时与 CK 差异不显著, 胁迫 76 d 时, 6‰处理下的 F_v'/F_m' 明显低于 CK,

比CK低7.9%，当胁迫时间达120 d时，2‰和6‰盐处理下的 F_v'/F_m' 与CK差异显著，且分别比CK低11.32%和17.90%。

2.3.2 盐胁迫对樟树叶片 Φ_{PSII} 和 ETR 的影响 由图3可以看出，3个处理下香樟叶片 Φ_{PSII} 和 ETR 随着胁迫时间的延长变化规律一样。盐胁迫前期，氯化钠胁迫对樟树叶片 Φ_{PSII} 和 ETR 的影响较小，当

胁迫时间达76 d时，6‰处理下的 Φ_{PSII} 和 ETR 显著低于CK和2‰处理，而2‰处理下的 Φ_{PSII} 和 ETR 与CK相比差异不显著，当胁迫时间达120 d时，2‰的盐处理对 Φ_{PSII} 和 ETR 的影响开始显现出来，且与胁迫76 d相比差异显著，此时2‰和6‰盐处理下的 Φ_{PSII} 和 ETR 均显著低于CK（见图3和表2）。

表1 不同时间不同处理之间光合色素的多重比较
Table 1 Multi-comparison of photosynthetic pigments in different treatments in different time

日期 Date	Chla			Chlb			Car			Chl			Chla/b			Car/Chl		
	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰
2015-09-08	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aB	aA	aAB	aC	aB	aB
2015-10-10	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aAB	aA	aAB	aBC	aB	aB
2015-11-16	aA	aB	bB	aA	abB	bB	aA	aB	bB	aA	aB	bB	aA	aA	aA	cB	bA	aA
2015-12-30	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	bB	bB	aA	aA	aA

注：不同小写字母代表同一时间不同处理间在0.05水平差异显著；不同大写字母代表同一处理不同时间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant differences at the 0.05 level among different treatments at the same time; different capital letters indicate significant differences at the 0.05 level among different time in the same treatments. The same below.

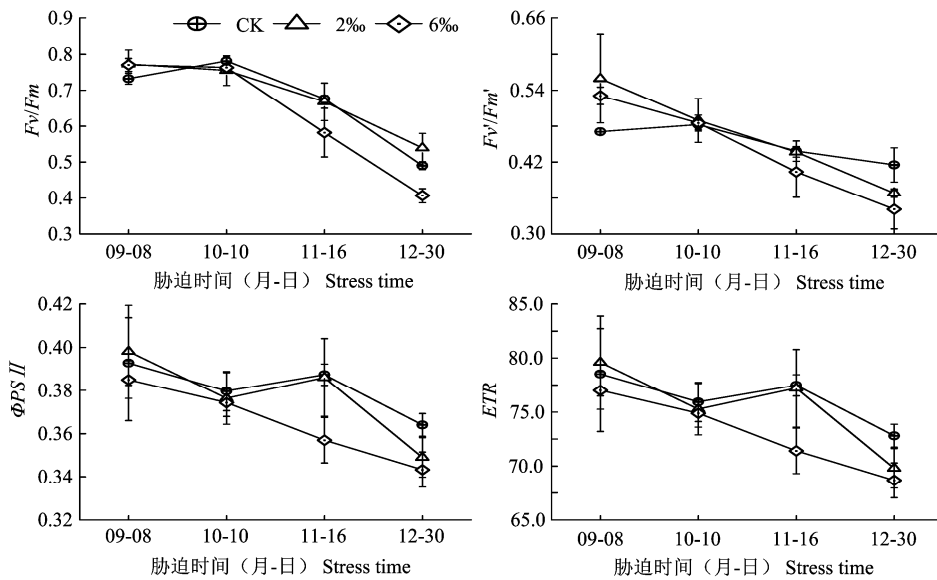


图3 盐胁迫对香樟 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 和 ETR 的影响
Figure 3 Effects of NaCl stress on F_v/F_m , F_v'/F_m' , Φ_{PSII} and ETR of *Cinnamomum camphora*

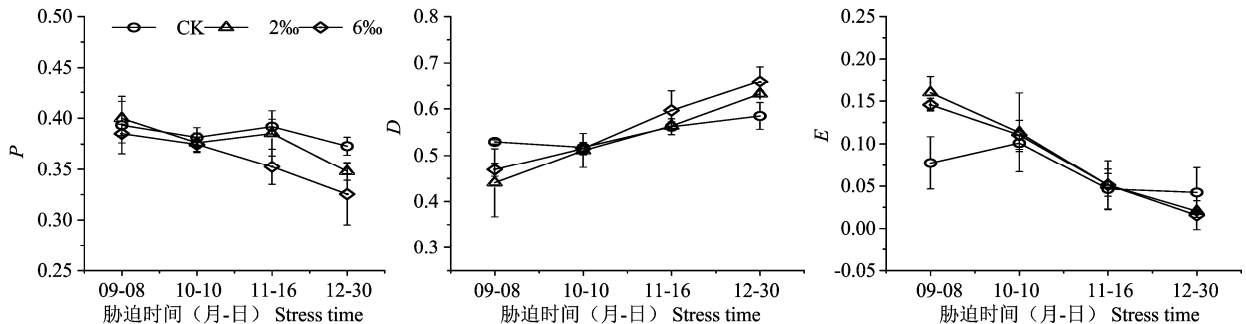


图4 盐胁迫对樟树叶片 PS II 吸收光能分配比例的影响
Figure 4 Effects of NaCl stress on PS II absorb light energy distribution proportion of *Cinnamomum camphora* leaf

表 2 不同时间不同处理之间叶绿素荧光参数的多重比较
Table 2 Multi-comparison of chlorophyll fluorescence parameters in different treatments in different time

日期 Date	F_v/F_m			F_v'/F_m'			Φ_{PSII}			P			D			E					
	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰	0	2‰	6‰			
2015-09-08	aA	aA	aA	aAB	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aBC	aC	aC	aAB	aA	aA
2015-10-10	aB	aA	aA	aA	aAB	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aAB	aA	aC	aBC	aC	aA	aAB	aA	aA	aA
2015-11-16	aC	aB	aB	aBC	aBC	aB	aA	aA	bB	aA	abA	bAB	aAB	aAB	aB	aB	aB	aB	aB	aB	aB
2015-12-30	aD	aC	bC	aC	abC	bC	aA	abB	bB	aA	abB	bB	aA	abA	bA	aB	aB	aB	aB	aB	aB

2.3.3 盐胁迫对樟树叶片 PS II 吸收光能分配比例的影响 从图 4 可以看出, 随着氯化钠胁迫时间的增加, PS II 光化学反应能量耗散 (P)、过剩光能耗散 (E) 逐渐降低, 天线色素热耗散 (D) 逐渐增大。胁迫 7 d 时, 氯化钠胁迫对 P 影响不大, 却明显降低了 D , 提高了 E 。胁迫 39 d 时, 2 种盐处理下的 3 个指标与 CK 相比差异不显著, 与胁迫 7 d 相比差异也不显著; 当胁迫时间为 76 d 时, 6‰ 盐处理下的 P 显著低于 CK, 且比 CK 低 12.71%, D 却明显高于 CK, 而 2‰ 盐处理下的 P 、 E 、 D 与 CK 均差异不显著。当胁迫时间达 120 d 时, 3 个处理间的 P 、 D 、 E 均差异进一步变大, 2‰ 和 6‰ 盐处理下的 P 、 E 显著低于 CK, D 显著高于 CK, 且 P 分别比 CK 低 6.68% 和 12.71%, E 分别比 CK 低 51.87%、63.31%, D 分别比 CK 高 8.04% 和 12.71%。

3 讨论与结论

盐胁迫会影响植物生长。本研究表明, 盐胁迫抑制了香樟生长, 2‰ 的盐浓度抑制不明显, 6‰ 的盐浓度抑制作用显著, 说明香樟对低盐具有一定耐受性, 这与前人研究结论^[4]一致。有研究表明, 植物受盐胁迫越严重, 其叶片吸水越困难, 相对含水量也越低。本研究中, 随着胁迫时间的延长, 盐胁迫下香樟叶片相对含水量逐渐降低, 失水越来越严重。

色素是类囊体膜的重要组成成分, 是光能的受体, 其中 Chla 有利于吸收长波光, Chlb 有利于吸收短波光, Car 既是光合色素, 又是内源抗氧化剂, 除在光合作用中具有一定的功能外, 在细胞内还可吸收剩余能, 猝灭活性氧, 从而防止膜脂过氧化^[13]。Car/Chl 比值的高低与植物忍受逆境的能力有关, Chla/Chlb 比值的变化, 能反映叶片光合活性的强弱^[14]。本研究中, 当胁迫达到一定时间后 Chla、Chlb、Chl 和 Chla/Chlb 均下降, 而 Car/Chl 在不同时间内均是上升的, 表明盐胁迫一定时间后会使得植物叶片叶绿素的合成减少, 这与惠红霞等^[15]研究盐胁迫对枸杞光合功能的影响结果相一致, 但是香樟却需要更长胁迫时间, 光合色素才下降, 这有可能是因为

乔木叶片色素受胁迫影响所需要的反应时间更长。

叶绿素荧光的变化可以灵敏的反映出逆境对植物光合作用光反应阶段的影响^[16], 进而反映光合作用光化学性能的变化, 进一步揭示盐胁迫下植物光合功能的变化规律。 F_v/F_m (最大光能转化效率) 反映的是光系统 II 反应中心的最大光能转换效率, 非胁迫下该值变化极小, 胁迫环境下明显降低^[17], F_v'/F_m' 为光适应下 PS II 有效光化学量子产量, 反映了在光适应条件下 PS II 反应中心完全开放时的光化学效率^[18], Φ_{PSII} 为作用光下 PS II 实际光化学效率^[19], 能够反映 PS II 反应中心原初光能捕获效率, 是叶片用于光合电子传递的能量占所吸收光能的比例, 常用于表示植物光合作用的电子传递量子产额, 较高的 Φ_{PSII} 值有利于提高植物的光能转化效率, 促进碳同化的高效运转和有机物的积累^[20]。PSII 吸收的光能通常分为 3 部分: 光反应的部分、天线色素耗散的部分和过剩激发能。植物在受到胁迫时 PSII 反应中心受损而导致光反应减少的部分通过天线色素耗散过剩激发能, 从而减少过剩光能对光合机构造成伤害^[12]。柯裕州等^[21]通过 21 d 的研究结果表明桑树叶片叶绿素荧光参数对 NaCl 胁迫的响应除了浓度效应外, 还有明显的时间效应, 且盐浓度越高, 对桑树幼苗的胁迫效应随时间的增加而增大, 本研究的结果具有类似的趋势, 其研究还表明桑树在其可耐受的盐浓度 ($3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 内, 荧光参数不会发生明显的改变, 但是本实验的测定发现香樟即使在低盐浓度 ($2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下, 经过通过较长时间 (120 d) 的胁迫, 荧光参数仍然会发生明显的变化, 至于发生变化的原因下文将进一步分析。

本实验中, 第 7 天时, 2 种盐浓度下的光合色素含量略高于 CK, 而天线色素热耗散 (D) 却低于 CK, 过剩激发能远高于 CK, 因此可以推测此时香樟叶片叶绿素酶活性因受到氯化钠的刺激而增强, 另外, 香樟通过将 D 中的一部分转变成 E , 通过 E 将过剩光能耗散出去, 从而减少了过剩光能对光合机构的伤害, 这是香樟为应对盐胁迫所启动的第 1 套防御机制, 随着胁迫时间的延长, 香樟越来越依

靠 D 将过剩光能耗散。到胁迫第 76 天时, 6‰处理下的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 P 、 $Chla$ 含量、 $Chlb$ 含量、 Car 含量显著低于 CK, 表现出明显的时间胁迫效应, 主要可能是由于叶绿素酶失活, 使叶绿素大量分解^[22], 另外由于类胡萝卜素含量的降低, 减少了对活性氧的猝灭, 导致细胞内积累较多的氧自由基, 破坏叶绿体膜结构, 加速叶绿素的分解^[23], 从而降低光合作用中光能的吸收和传递, Car/Chl 比值的明显上升说明香樟耐受胁迫的能力大大降低了; 而 2‰处理下的 $Chla$ 含量、 $Chlb$ 含量、 Car 含量也明显低于 CK, 但 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 P 与 CK 相比却无差异, 这可能是因为香樟此时启动了另外一套防御机制使得香樟在叶绿素酶活性降低、 Car 内源抗氧化剂减少的情况下, 光合系统的功能却并未受到较严重的损伤。当胁迫时间达 120 d 时, 3 种处理下的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 P 、 $Chla$ 含量、 $Chlb$ 含量、 Car 含量均进一步降低, CK 处理下的这些指标值降低的原因可能是此时气温降低导致叶绿素酶活性降低, 再加上冬天天光强较弱, 植物进入了轻度休眠期, 使得香樟叶片对光能的传递、转化、利用变低, 而 2‰和 6‰处理下的香樟遭受低温和盐双重胁迫, 使得 2‰浓度下的香樟幼苗超过了自我调节能力, F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 P 也大幅度下降, 2 个盐浓度下香樟叶片类囊体垛叠程度可能大幅度降低^[24], 过剩的光能也更加依靠 D 来减少过剩光能对光合机构的伤害。

本研究通过较长时间 (120 d) 分 4 次对香樟幼苗叶片光合色素和叶绿素荧光参数的测定, 研究结果表明经过近 2 个月的胁迫后, 6‰的盐浓度下幼苗叶片光合系统功能受到严重损害, 2‰的盐浓度虽然降低了幼苗叶片光合色素含量, 但荧光参数与 CK 仍无显著差异, 说明光合系统并未受到损害, 由此证明香樟能耐 2‰的盐浓度, 同时苗高相对生长量、基径相对生长量和叶片相对含水量与 CK 相比未显著降低也证明了这一点。但是当外界温度降低时, 香樟可能由于受到低温而进入冬眠, 导致其在 2‰的盐浓度下光合系统也遭到损伤, 这说明低温能降低香樟对盐胁迫的耐受能力。至于冬天由于休眠香樟耐盐性降低的原因则需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 冯娟. NaCl 胁迫对樟树苗生理特性的影响及氮素的缓解效应[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [2] 赵清贺. 香樟抗寒抗盐生理特性的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [3] 梅海军, 王宁, 李自阳, 等. NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫对香樟幼苗生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6): 30-34.
- [4] 韩浩章, 王晓立, 张颖, 等. 盐胁迫对秋季香樟幼苗抗氧化酶系统和光合特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(5): 1235-1239.
- [5] 王金平, 王舒甜, 岳健敏, 等. 香樟幼苗对 NaCl 胁迫的生理响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 82-89.
- [6] 梅海军, 李自阳, 王宁, 等. NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫对香樟光合特性的影响[J]. 西部林业科学, 2010, 39(4): 26-29.
- [7] 朱新广, 张其德. NaCl 对光合作用影响的研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 332-338.
- [8] GENTY B, BRLANTAIS J M, BAKER N B. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. Biochim Biophys Acta, 1989, 990(1): 87-92.
- [9] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1): 51-55.
- [12] 谢寅峰, 张千千, 刘伟龙, 等. 外源水杨酸对高氯酸胁迫下水花生叶绿素荧光特性的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1457-1465.
- [13] WILLEKENS H, VAN CAMP W, VAN MONTAGU M, et al. Ozone, sulfur dioxide, and ozone ultraviolet-B have similar effect on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana glauca* L [J]. Plant Physiol, 1994, 106: 1007-1014.
- [14] 刘振亚, 刘贞琦. 作物光合作用的遗传及其在育种中的应用研究进展[M]//刘后利. 作物育种研究与进展(第一集). 北京: 北京农业出版社, 1993: 168-183.
- [15] 惠红霞, 许兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2137-2422.
- [16] LLOYD J, KRIEDEMANN P, PRIOR L, et al. Citrus leaf fluorescence: Water and salt effects[J]. Acta Horticulturae, 1986 (175): 333-337.
- [17] 许大全, 张玉忠, 张荣铎. 植物光合作用中的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 237-243.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 吕芳德, 徐德聪, 侯红波, 等. 5 种红山茶叶绿素荧光特性的比较研究[J]. 经济林研究, 2003, 21(4): 4-7.
- [21] 柯裕州, 周金星, 卢楠, 等. 盐胁迫对桑树幼苗光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 林业科学研究, 2009, 22(2): 200-206.
- [22] 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[J]. 植物学通报, 1998, 15(2): 46-49.
- [23] SAKAKI T, KONDO N, SUGAHARA K. Breakdown of photosynthetic pigments and lipids in spinach leaves with ozone fumigation: Role of active oxygens[J]. Physiologia Plantarum, 1983, 59(1): 28-34.
- [24] MCCORD J M, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase: An enzymic function for erythrocyte hemocuprein[J]. J Biol Chem, 1969, 244(22): 6049-6055.