

郭卫珍, 张亚利, 奉树成. NaCl 胁迫对 2 个山茶品种盐害及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 562-569.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.03.003

## NaCl 胁迫对 2 个山茶品种盐害及叶绿素荧光特性的影响

郭卫珍, 张亚利, 奉树成

(上海植物园/上海城市植物资源开发应用工程技术研究中心, 上海 200231)

**摘要:** 以束花品种玫瑰春和茶梅品种小玫瑰为试验材料, 采用 Hoagland 营养液水培法, 研究了不同浓度(0 mmol/L、20 mmol/L、40 mmol/L、80 mmol/L、120 mmol/L) NaCl 处理对 2 个山茶品种盐害及叶绿素荧光特性的影响, 并就此探讨 2 个品种的耐盐性差异。结果表明, 未经盐胁迫处理的小玫瑰的  $qP$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $ETR$  值均显著高于玫瑰春 ( $P < 0.05$ ); 低盐浓度(20 mmol/L、40 mmol/L)胁迫下, 2 个山茶品种的盐害较轻, 叶绿素荧光参数均与对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 此时小玫瑰的盐害率、盐害指数以及  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  的下降幅度均小于玫瑰春; 随着盐浓度的增加, 2 个山茶品种的盐害率和盐害指数增大,  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  均降低, 且盐浓度越高, 降低幅度越明显。其中较高盐浓度(120 mmol/L)胁迫下, 玫瑰春的盐害率和盐害指数小于小玫瑰, 此外玫瑰春的  $qN$  值上升幅度以及其他 5 个叶绿素荧光参数的下降幅度均显著低于小玫瑰 ( $P < 0.05$ )。综上得出, 低盐浓度 ( $\leq 40$  mmol/L) 对供试的 2 个山茶品种的生长影响较小, 其中小玫瑰在非盐处理环境下的实际光化学效率和电子传递速率优于玫瑰春, 在低盐浓度(20 mmol/L、40 mmol/L)下的耐盐性高于玫瑰春, 在较高盐浓度(120 mmol/L)时玫瑰春的耐盐性高于小玫瑰, 具有潜在的耐盐能力。

**关键词:** 山茶; NaCl 胁迫; 盐害; 叶绿素荧光特性

**中图分类号:** S685.140.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2021)03-0562-08

## Effects of NaCl stress on salt injury and chlorophyll fluorescence characteristics of two *Camellia* cultivars

GUO Wei-zhen, ZHANG Ya-li, FENG Shu-cheng

(Shanghai Research Center of Urban Plant Resources Development and Application & Engineering and Technology, Shanghai Botanical Garden, Shanghai 200231, China)

**Abstract:** *Camellia* hybrid Meigui Chun and *C. sasanqua* Xiao Meigui were used as experiment materials and water culture methods using Hoagland nutrient solution was adopted to study the influence of different NaCl concentrations (0 mmol/L, 20 mmol/L, 40 mmol/L, 80 mmol/L, 120 mmol/L) on salt injury and chlorophyll fluorescence characteristics of two camellia varieties, and the difference of two camellia varieties in salt tolerance was discussed. The results showed that, the photochemical quenching coefficient ( $qP$ ), actual photochemical quantum efficiency ( $\Phi_{PSII}$ ) and electron transport rate

( $ETR$ ) value of Xiao Meigui were significantly higher than Meigui Chun without salt stress treatment ( $P < 0.05$ ). Under salt stresses with low concentrations (20 mmol/L, 40 mmol/L), the salt injury of two camellia cultivars was slight and the chlorophyll fluorescence parameters showed no significant difference compared with CK ( $P > 0.05$ ), and the salt injury degree, salt injury index and decline range of PS II maximum photochemical efficiency ( $F_v/F_o$ )

收稿日期: 2020-10-17

基金项目: 上海市绿化和市容管理局 2018 年科学技术项目 (G18030-2); 上海市科学技术委员会项目 (18DZ2283500、19DZ1203704)

作者简介: 郭卫珍 (1988-), 女, 山西太谷人, 硕士, 工程师, 主要从事植物筛选与适应性研究。(E-mail) guowz@shbg.org

通讯作者: 奉树成, (E-mail) shbg2009@126.com

$F_m$ ) and PS II potential activity ( $F_v/F_o$ ) of Xiao Meigui were less than those of Meigui Chun. As the salt concentration increased, the salt injury degree and salt injury index of two camellia varieties increased, while  $F_v/F_m$  and  $F_v/F_o$  decreased, the decrease range became more obvious as the salt concentration increased. Under higher salt concentration (120 mmol/L) stress, the salt injury degree and salt injury index of Meigui Chun were less than those of Xiao Meigui. In addition, the increase range of non-photochemical quenching coefficient ( $qN$ ) and the decrease range of other five chlorophyll fluorescence parameters of Meigui Chun were significantly less than those of Xiao Meigui ( $P<0.05$ ). In summary, two camellia cultivars can grow normally under low salinity stresses ( $\leq 40$  mmol/L), and the practical photochemical efficiency and electron transfer rate of Xiao Meigui are better than those of Meigui Chun without salt stress. Under low salt concentrations (20 mmol/L, 40 mmol/L), salt tolerance of Xiao Meigui is higher than Meigui Chun, but the salt tolerance of Meigui Chun is higher than that of Xiao Meigui under salt stress with high concentration (120 mmol/L), which shows potential ability of salt tolerance.

**Key words:** *Camellia*; NaCl stress; salt injury; chlorophyll fluorescence characteristics

山茶(*Camellia*)作为世界名花和中国十大传统名花之一,观赏价值极高,在园林中的应用也十分广泛。传统山茶喜酸性土壤,而目前全世界正面临着土壤盐碱化的难题,中国盐碱地面积占现有耕地面积的10%<sup>[1-2]</sup>,可见盐碱土壤已成为限制山茶栽培和应用范围扩大的主要问题之一。目前,关于山茶耐盐碱方面的研究较少,张亚利等<sup>[3]</sup>对部分山茶在华东地区的生长情况及栽培土壤进行分析,认为影响其生长的土壤因子主要是pH和水溶性盐浓度(EC),郭卫珍等<sup>[4]</sup>通过观测发现山茶品种玫玉能够适应低盐浓度的土壤环境。

玫瑰春是由连蕊茶组(*Camellia* Sect. *Theopsis* Cohen-Stuart)原种杂交选育获得的束花品种,兼适应性好、抗逆性强等特性,具有广阔的应用前景,但对其耐盐性尚未进行系统研究。林田等<sup>[5]</sup>通过研究发现茶梅(*C. sasanqua*)具有较好的土壤适应性,在上海大部分地区的土壤环境中生长良好。因此,试验选取束花茶花品种玫瑰春(*C. hybrid* Meigui Chun)和茶梅品种小玫瑰(*C. sasanqua* Xiao Meigui)进行耐盐性试验,通过不同浓度的NaCl处理,研究2个山茶品种在短期(1 d)和长期(10 d、20 d、30 d)盐胁迫下的盐害情况和叶绿素荧光参数的变化,以此分析2个品种的耐盐性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验材料为玫瑰春和小玫瑰的10年生苗,选取生长状态良好、没有病虫害且长势基本一致的成熟枝条,将其培养于Hoagland营养液中。试验设置了5个不同浓度的NaCl处理:0 mmol/L(CK)、20

mmol/L(T1)、40 mmol/L(T2)、80 mmol/L(T3)、120 mmol/L(T4),采取随机取样的方式,将枝条插入250 ml的锥形瓶中,每瓶插3个枝条,每个处理9瓶,每瓶装营养液200 ml。试验在生产大棚内进行,温度保持在20~25℃,每7 d更换1次营养液。试验组出现90%以上的植株死亡时试验结束。

### 1.2 测定方法

1.2.1 盐害指数和盐害率的测定 分别在盐处理后1 d、10 d、20 d和30 d时对所有枝条进行观测和统计,盐害分级标准参照骆建霞等<sup>[6]</sup>的方法:

盐害分级标准,0级:未出现盐害症状;1级:轻度盐害,约20%叶片的叶缘变黄,或者约20%叶片出现黄斑;2级:中度盐害,约50%叶片的叶缘变黄,或者约50%叶片出现黄斑;3级:重度盐害,大部分叶片的叶缘焦黄,或者大部分叶片出现黄斑;4级:极重度盐害,叶片焦枯、脱落,枝枯,植株死亡。

盐害指数及盐害率的计算公式:

盐害指数 =  $\Sigma$ (盐害级数 × 相应盐害级枝数) / (总枝数 × 盐害最高级数) × 100%;

盐害率 = 出现盐害症状枝数 / 总枝数 × 100%。

1.2.2 叶绿素荧光参数的测定 选取枝条的第3片完整成熟叶片,于晴天上午使用装配有荧光叶室的Li-6400光合测定仪测定叶片的叶绿素荧光参数。试验前先将叶片进行30 min的暗处理,随后再采用500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 作用光活化20 min以上,可分别测得PS II最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II潜在活性( $F_v/F_o$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )、非光化学猝灭系数( $qN$ )、实际光化学量子效率( $\Phi_{\text{PS II}}$ )和光合电子传递速率(ETR)。每个处理选取5片叶子,分

别在处理 0 d、1 d、10 d、20 d 和 30 d 时进行测定。

### 1.3 数据统计与处理

数据统计及分析采用 Microsoft excel 2010 和 SPSS 18.0, 作图采用 Origin 8.5 和 Microsoft excel 2010。

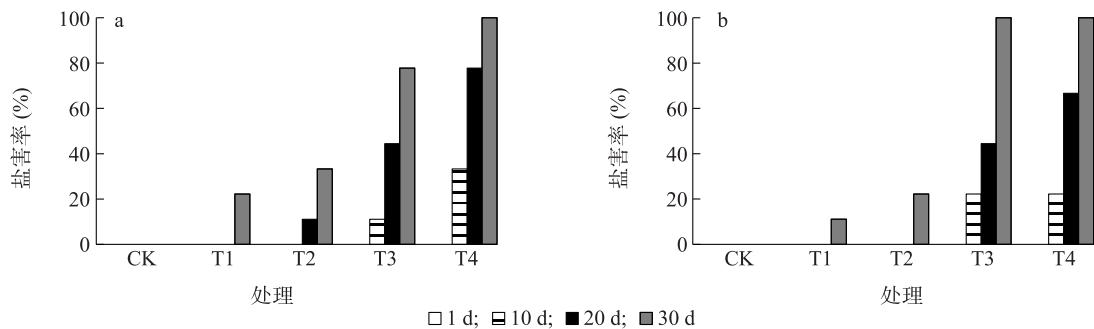
## 2 结果与分析

### 2.1 NaCl 胁迫对 2 个山茶品种的盐害

对供试的 2 个山茶品种的外部形态进行观测, 发现玫瑰春和小玫瑰在不同盐浓度胁迫 1 d 时, 叶片未出现任何盐害症状; 胁迫 10 d 时, 仅 120 mmol/L NaCl 处理的叶片出现了轻度盐害, 叶尖和叶缘开始变黄。随着盐浓度增加和胁迫时间的延长, 叶片的盐害程度也逐渐加剧。其中玫瑰春叶片的叶尖、叶缘均开始焦枯, 并出现大面积黄斑; 而小玫瑰叶片的叶尖、叶缘发黄, 且叶脉中部出现大面积黄斑。

盐害率和盐害指数分别反应了植株的盐害数量和盐害程度<sup>[6]</sup>, 2 个山茶品种的盐害率和盐害指数

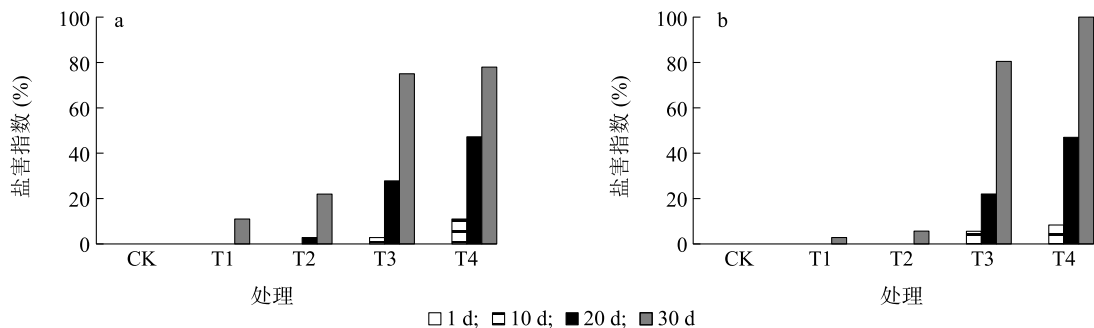
随着盐浓度的增加及胁迫时间的延长均呈上升趋势 (图 1、图 2)。20 mmol/L NaCl 处理 30 d 时, 2 个品种开始出现轻度盐害, 玫瑰春的盐害率为 22.22%, 是小玫瑰的 2 倍, 玫瑰春的盐害指数为 11%, 而小玫瑰的仅为 2.00%; 40 mmol/L NaCl 处理 20 d 时, 玫瑰春的盐害率达到 11.11%, 而小玫瑰未出现盐害症状, 处理 30 d 时, 玫瑰春的盐害率为 33.33%, 盐害指数为 22%, 分别较小玫瑰高出 11.11 个百分点和 16.4 个百分点; 80 mmol/L NaCl 处理 30 d 时, 2 个品种的盐害指数均达到了 80% 左右, 小玫瑰的盐害率已到达 100.00%, 较玫瑰春高出 22 个百分点, 此时小玫瑰出现极重度盐害, 玫瑰春则为重度盐害; 2 个品种在 120 mmol/L NaCl 处理 20 d 时, 盐害率和盐害指数分别超过 60.00% 和 40.00%, 与胁迫 10 d 时相比大幅增长, 均为重度盐害。胁迫 30 d 时, 玫瑰春仍为重度盐害, 小玫瑰则为极重度盐害, 此时 2 个品种盐害率都已到达 100.00%, 小玫瑰的盐害指数为 100%, 较玫瑰春高出 22 个百分点。



a: 玫瑰春, b: 小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 分别表示 5 个不同浓度 (0 mmol/L、20 mmol/L、40 mmol/L、80 mmol/L、120 mmol/L) NaCl 处理。

图 1 盐胁迫下 2 个山茶品种的盐害率

Fig.1 Salt injury rate of two *Camellia* cultivars under different salt treatments



a: 玫瑰春, b: 小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理见图 1 注。

图 2 盐胁迫下 2 个山茶品种的盐害指数

Fig.2 Salt injury index of two *Camellia* cultivars under different salt treatments

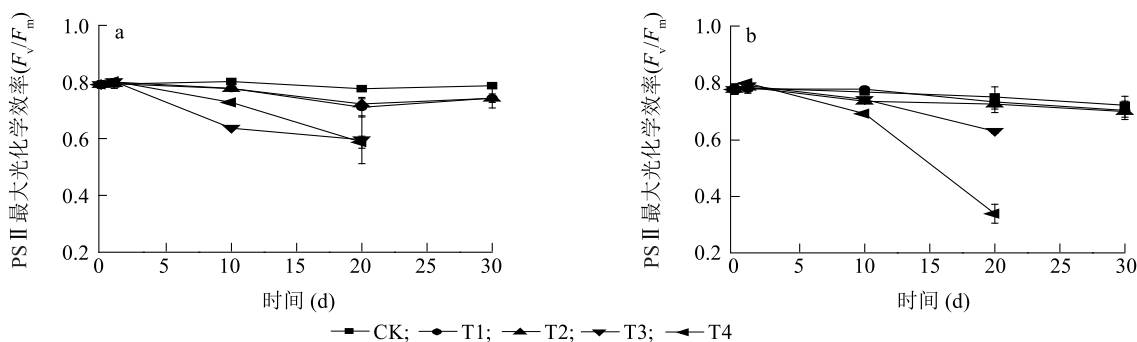
## 2.2 NaCl胁迫对2个山茶品种叶绿素荧光特性的影响

### 2.2.1 NaCl胁迫对2个山茶品种PSⅡ最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和潜在光化学效率( $F_v/F_o$ )的影响

$F_v/F_m$ 表示PSⅡ的最大光能转换效率,是反映PSⅡ活性大小的指标<sup>[7-8]</sup>。由图3可以看出,在NaCl胁迫期间,玫瑰春和小玫瑰的 $F_v/F_m$ 总的变化趋势相似,盐胁迫浓度越高, $F_v/F_m$ 降低幅度越明显,其中80 mmol/L和120 mmol/L NaCl处理30 d时,2个山茶品种的植株均已死亡。NaCl胁迫1 d时,2个品种的 $F_v/F_m$ 相比未处理前变化较小,各处理的 $F_v/F_m$ 值均为0.8左右且无显著差异( $P>0.05$ )。玫瑰春在20 mmol/L和40 mmol/L NaCl处理第10 d时相比空白对照均降低了2.5%,与空白对照存在显著差异( $P<0.05$ ),盐胁迫第20 d时分别降低了

9.0%、7.7%,盐胁迫第30 d时均降低了6.1%,与空白对照无显著差异( $P>0.05$ );80 mmol/L和120 mmol/L NaCl处理的 $F_v/F_m$ 值大幅降低,第10 d相比空白对照降低了8.8%、20.0%,第20 d降低了23.1%、24.4%,均与其他3个处理存在显著差异( $P<0.05$ )。小玫瑰在20 mmol/L、40 mmol/L和80 mmol/L NaCl处理20 d时, $F_v/F_m$ 值下降幅度均较玫瑰春低,且与空白对照无显著差异( $P>0.05$ );而在120 mmol/L NaCl处理20 d时, $F_v/F_m$ 值下降了54.7%,下降幅度显著高于玫瑰春( $P<0.05$ )。

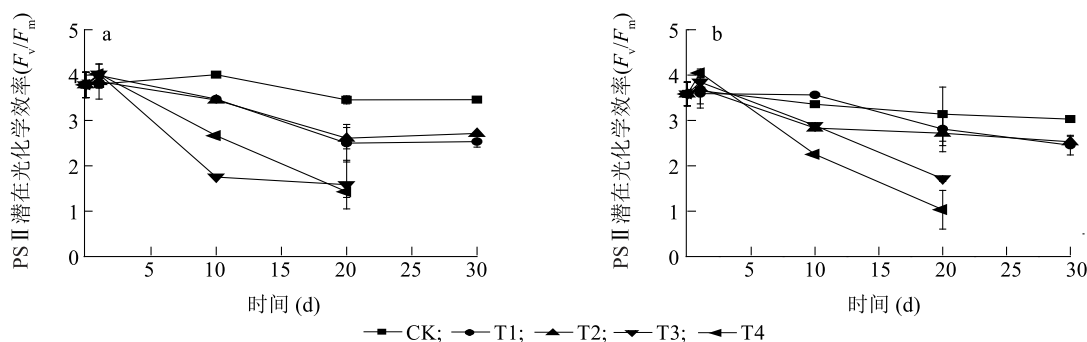
$F_v/F_o$ 反映了PSⅡ的潜在活力<sup>[9]</sup>。在5个不同浓度NaCl胁迫期间,玫瑰春和小玫瑰的 $F_v/F_o$ 总的变化趋势与 $F_v/F_m$ 相似,小玫瑰只有在120 mmol/L NaCl处理20 d时, $F_v/F_o$ 值的降幅较玫瑰春大,其他盐浓度处理的降幅均小于玫瑰春(图4)。



a:玫瑰春,b:小玫瑰。CK、T1、T2、T3和T4处理见图1注。

图3 盐胁迫对2个山茶品种PSⅡ最大光化学效率的影响

Fig.3 Effects of NaCl stress on PSⅡ maximum photochemical efficiency of two *Camellia* cultivars



a:玫瑰春,b:小玫瑰。CK、T1、T2、T3和T4处理见图1注。

图4 盐胁迫对2个山茶品种PSⅡ潜在光化学效率的影响

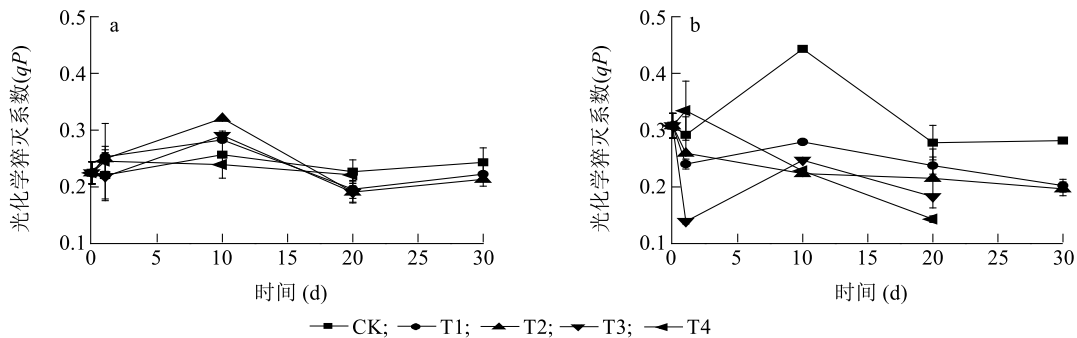
Fig.4 Effects of NaCl stress on PSⅡ potential photochemical efficiency of two *Camellia* cultivars

2.2.2 NaCl胁迫对2个山茶品种光化学猝灭系数( $qP$ )和非光化学猝灭系数( $qN$ )的影响  $qP$ 表示的是PSⅡ吸收的光能用于光化学电子传递的部分,代

表了PSⅡ反应中心的开放程度<sup>[10]</sup>。如图5所示,玫瑰春在盐胁迫1 d时, $qP$ 值相比未处理前变化较小,5个处理之间无显著差异( $P>0.05$ );盐胁迫10

d 时,仅 40 mmol/L NaCl 处理显著高于空白对照 ( $P<0.05$ );盐胁迫 20 d 时,4 个盐浓度处理的  $qP$  值较空白对照均有所降低,其中 40 mmol/L 和 80 mmol/L NaCl 处理显著低于空白对照 ( $P<0.05$ );盐胁迫 30 d 时,0 mmol/L、20 mmol/L、40 mmol/L NaCl 处理的  $qP$  值略有增高,但 3 个处理之间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。小玫瑰在盐胁迫 1 d 时,120 mmol/L NaCl 处理下的  $qP$  值上升并显著高于空白对照 ( $P<0.05$ ),其他 3 个处理均下降,其中 80 mmol/L NaCl

处理显著低于空白对照 ( $P<0.05$ );胁迫 10 d 时,4 个盐浓度处理的  $qP$  值均显著低于空白对照 ( $P<0.05$ );胁迫 20 d 时, $qP$  值大小依次为  $CK>T1>T2>T3>T4$ ,且 5 个处理之间均存在显著差异 ( $P<0.05$ );胁迫 30 d 时,20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 处理的  $qP$  值仍显著低于空白对照 ( $P<0.05$ )。其中小玫瑰在未经盐胁迫时小玫瑰的  $qP$  值显著高于玫瑰春 ( $P<0.05$ ),在 120 mmol/L 处理 20 d 时小玫瑰的  $qP$  值则显著低于玫瑰春 ( $P<0.05$ )。



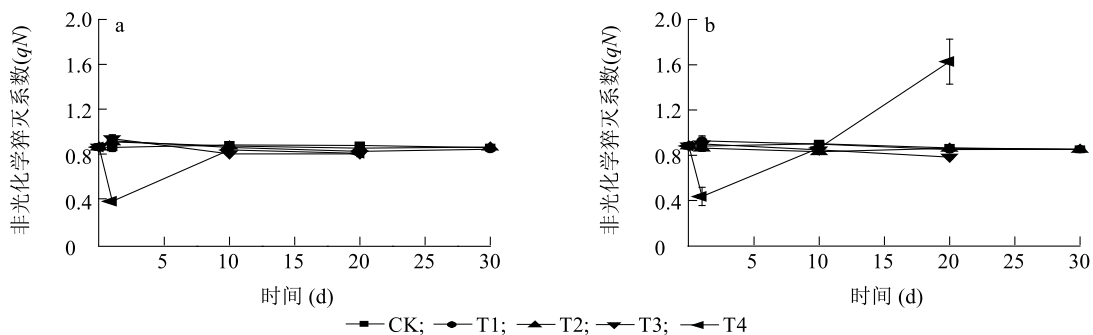
a: 玫瑰春, b: 小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理见图 1 注。

图 5 盐胁迫对 2 个山茶品种光化学淬灭系数的影响

Fig.5 Effects of NaCl stress on photochemical quenching coefficient of two *Camellia* cultivars

$qN$  表示的是 PS II 吸收的光能以热的形式耗散的部分<sup>[11]</sup>。由图 6 可以看出,玫瑰春和小玫瑰在盐胁迫 1 d 时,120 mmol/L NaCl 处理的  $qN$  值降低,并显著低于其他 4 个处理 ( $P<0.05$ ),随后上升;2 个品种在胁迫 10 d 时,4 个盐浓度处理的  $qN$  值均

显著低于空白对照 ( $P<0.05$ );胁迫 20 d 时,玫瑰春 4 个盐浓度处理的  $qN$  值显著低于空白对照 ( $P<0.05$ ),而小玫瑰 120 mmol/L NaCl 处理的  $qN$  值则大幅上升,并显著高于其他 4 个处理组 ( $P<0.05$ ),且该处理的  $qN$  值也显著高于玫瑰春 ( $P<0.05$ )。



a: 玫瑰春, b: 小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理见图 1 注。

图 6 盐胁迫对 2 个山茶品种非光化学淬灭系数的影响

Fig.6 Effects of NaCl stress on non-photochemical quenching coefficient of two *Camellia* cultivars

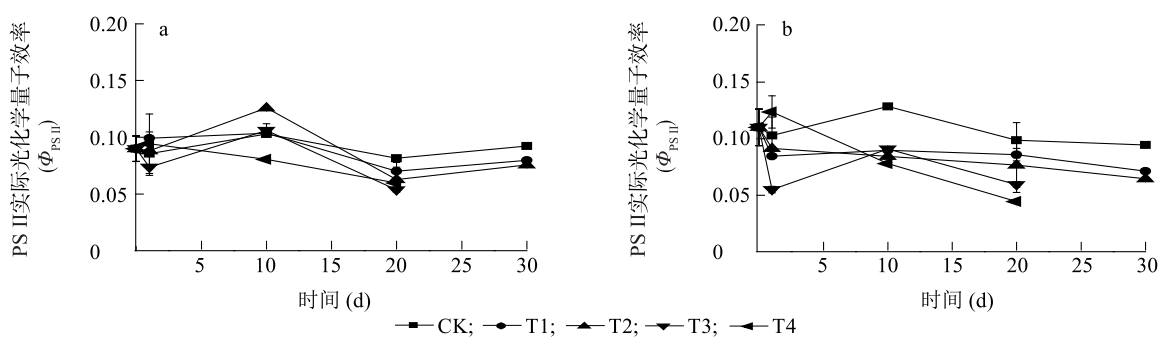
2.2.3 NaCl 胁迫对 2 个山茶品种实际光化学量子效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 和光合电子传递效率 ( $ETR$ ) 的影响  
 $\Phi_{PSII}$  是 PS II 的实际光化学量子效率,可以用来表征

植物的光合能力,  $ETR$  是表观光合电子传递速率<sup>[12]</sup>。由图 7 和图 8 可以看出,玫瑰春在盐胁迫 1 d 时,  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值相比未处理前变化较小,5 个处



理之间也无显著差异( $P>0.05$ );盐胁迫 10 d 时,40 mmol/L NaCl 处理的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值显著高于空白对照( $P<0.05$ ),120 mmol/L NaCl 处理则显著低于空白对照( $P<0.05$ );胁迫 20 d 时,4 个盐浓度处理下的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值均显著低于空白对照( $P<0.05$ ),其大小依次为 CK>T1>T2>T4>T3;胁迫 30 d 时,20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 处理的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值显著低于空白对照( $P<0.05$ )。小玫瑰在盐胁迫 1 d 时,120 mmol/L NaCl 处理下的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值上升并与空白对照差异显著( $P<0.05$ ),其他 3 个处理均下降,其中 80 mmol/L NaCl 处理与空白对照

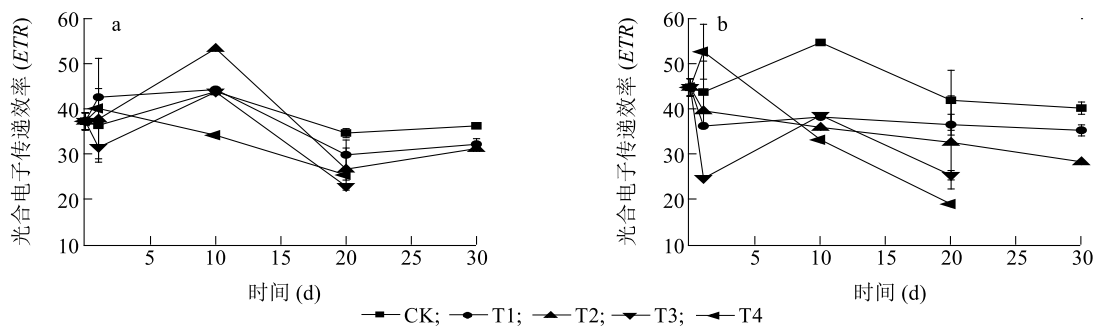
差异显著( $P<0.05$ );盐胁迫 10 d 时,4 个盐浓度处理的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值均显著低于空白对照( $P<0.05$ );盐胁迫 20 d 时, $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值大小依次为 CK>T1>T2>T3>T4,且 5 个处理之间均存在显著差异( $P<0.05$ );胁迫 30 d 时, $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值大小依次为 CK>T1>T2,且 3 个处理之间均存在显著差异( $P<0.05$ )。其中未经盐胁迫的小玫瑰的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值显著高于玫瑰春( $P<0.05$ ),120 mmol/L NaCl 处理 20 d 时小玫瑰的  $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值则显著低于玫瑰春( $P<0.05$ )。



a:玫瑰春,b:小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理见图 1 注。

图 7 盐胁迫对 2 个山茶品种实际光化学量子效率的影响

Fig.7 Effects of NaCl stress on actual photochemical quantum efficiency of two *Camellia* cultivars



a:玫瑰春,b:小玫瑰。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理见图 1 注。

图 8 盐胁迫对 2 个山茶品种光合电子传递效率的影响

Fig.8 Effects of NaCl stress on photosynthetic electron transport rate of two *Camellia* cultivars

### 3 讨论

植物的耐盐性是在遗传和环境等因子共同作用下表现出的综合性状<sup>[13]</sup>。盐胁迫会造成许多生理生化等代谢过程紊乱,并引发叶片焦枯、脱落以及植株死亡等症状<sup>[14-16]</sup>。随着盐浓度及胁迫时间的增加,2 个品种的盐害率和盐害指数均增加,这与北美

豆梨<sup>[17]</sup>和野皂荚<sup>[18]</sup>等植物在不同盐浓度胁迫下的研究结果一致。2 个山茶品种在 20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 处理下的盐害率和盐害指数均低于 35%,而在 80 mmol/L 和 120 mmol/L NaCl 处理后期,2 个品种的盐害指数和盐害率均大于 75%,由此得出低盐浓度( $\leq 40$  mmol/L)对供试的 2 个山茶品种影响较小。玫瑰春在 80 mmol/L 和 120 mmol/L

NaCl 处理下的盐害率和盐害指数要小于小玫瑰, 20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 处理下两品种则正好相反。

叶绿素荧光仪能够快速测出叶片光系统对光能的吸收、传递、耗散和分配等指标<sup>[19-21]</sup>。光合作用作为植物生长发育的基础, 对盐胁迫十分敏感, 因此叶绿素荧光技术也被广泛应用于植物抗盐机理研究及抗盐能力评价<sup>[22-23]</sup>。非环境胁迫下  $F_v/F_m$  稳定且不受物种和生长条件的影响, 受到胁迫时才会明显下降<sup>[24]</sup>。本试验中盐胁迫浓度越高时, 2 个山茶品种的  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  降低幅度越明显, 由此可知 NaCl 胁迫对这 2 个山茶品种的 PS II 反应中心均造成了不同程度的伤害<sup>[25-27]</sup>, 这可能是因为 NaCl 胁迫会导致 QA(D2 蛋白)到 QB(D1 蛋白)部分电子传递的中断, 进而降低了 PS II 的原初光能转化效率<sup>[28]</sup>, 且胁迫时间越长, 盐浓度越高, 对 PS II 的伤害就越大<sup>[29]</sup>。玫瑰春和小玫瑰在 20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 胁迫 30 d 时,  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  均与空白对照无显著差异 ( $P>0.05$ ), 表明 20 mmol/L 和 40 mmol/L NaCl 胁迫对这 2 个山茶品种 PS II 反应中心的损害较小。玫瑰春在 120 mmol/L NaCl 胁迫 20 d 时,  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  的下降幅度显著低于小玫瑰 ( $P<0.05$ ), 而在 20 mmol/L、40 mmol/L 和 80 mmol/L NaCl 胁迫时的下降幅度均较小玫瑰高。即在 120 mmol/L NaCl 长时间胁迫下, 玫瑰春 PS II 的光能转化效率和潜在活性较小玫瑰高, 20 mmol/L、40 mmol/L 和 80 mmol/L NaCl 胁迫下两品种则正好相反。

未经盐胁迫的小玫瑰  $qP$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $ETR$  值均显著高于玫瑰春 ( $P<0.05$ ), 可见小玫瑰在非盐胁迫环境下的实际光化学效率和电子传递速率均优于玫瑰春; 盐胁迫 1 d 时, 玫瑰春的  $qP$ 、 $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值相比未处理前变化较小, 而小玫瑰在 120 mmol/L NaCl 处理下的 3 个值则显著高于对照 ( $P<0.05$ ), 表明 120 mmol/L NaCl 短期胁迫能使小玫瑰的实际光化学效率和电子传递速率在短时间内上升, 随后大幅下降; 胁迫 20 d 时, 120 mmol/L NaCl 处理玫瑰春  $qP$ 、 $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  值的降幅要显著低于小玫瑰 ( $P<0.05$ ), 表明在 120 mmol/L NaCl 长时间胁迫下, 玫瑰春光合机构的自我保护能力要高于小玫瑰, 其光化学效率及电子传递速率维持较高水平, 有利于形成 ATP 和 NADPH, 从而促进光合产物的形成<sup>[30-31]</sup>。

盐胁迫 1 d 时, 120 mmol/L NaCl 处理的两品种  $qN$  值均显著下降 ( $P<0.05$ ), 表明 120 mmol/L NaCl 短期胁迫能够抑制 2 个山茶品种利用热耗散途径来散失过剩激发能<sup>[32]</sup>。随着对盐胁迫的适应, 2 个品种的  $qN$  值均逐渐上升, 当 120 mmol/L NaCl 胁迫 20 d 时, 玫瑰春的  $qN$  值保持不变, 而小玫瑰的  $qN$  值继续上升并显著高于其他 4 个处理 ( $P<0.05$ )。该结果表明小玫瑰在 120 mmol/L NaCl 长期胁迫下用于光化学电子传递的份额减少, 并通过增加 PS II 反应中心的非辐射热能量耗散来避免光合系统受到损害<sup>[33-34]</sup>, 而玫瑰春对 120 mmol/L NaCl 长期胁迫具有一定的适应性。

## 4 结 论

综上所述, 2 个山茶品种可在低盐浓度 ( $\leq 40$  mmol/L) 的介质中正常生长, 其中小玫瑰在非盐胁迫环境下的实际光化学效率和电子传递效率优于玫瑰春, 低盐浓度 (20 mmol/L、40 mmol/L) 胁迫下小玫瑰的耐盐性高于玫瑰春, 而较高盐浓度 (120 mmol/L) 时玫瑰春的耐盐性高于小玫瑰, 具有潜在的耐盐能力。本研究为揭示山茶属植物的抗盐机理和筛选抗盐品种提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] YOSHIDA Y, MARUBODEE R, TANAKA E O, et al. Salt tolerance in wild relatives of adzuki bean, *Vigna angularis* (Willd.) Ohwi et Ohashi [J]. Genet Resour Crop Evol, 2016, 63: 627-637.
- [2] 石 婧, 刘东洋, 张风华. 不同品种 (品系) 棉花对盐胁迫的生理响应与耐盐性评价 [J]. 江苏农业学报, 2020, 36 (4): 828-835.
- [3] 张亚利, 王立翠, 李 健, 等. 部分茶花品种在上海的栽培土壤及生长状况分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31 (1): 729-735.
- [4] 郭卫珍, 张亚利, 莫健彬, 等. 茶花新品种 '玫玉' 耐盐性初探 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29 (4): 74-79.
- [5] 林 田, 李天菲, 杨 华, 等. 茶梅品种资源的收集保存、鉴定评价及种质创新 [J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13 (2): 207-211.
- [6] 骆建霞, 史燕山, 吕 松, 等. 3 种木本地被植物耐盐性的研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (12): 121-124, 129.
- [7] 李尚中, 樊廷录, 王 勇, 等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用率的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (12): 458-466.
- [8] 韦金河, 闻 婧, 张 俊, 等. 夏季遮光对 3 种槭树 PS II 叶绿素

- 荧光参数的影响[J].江苏农业学报,2015,31(1):172-179.
- [9] 查凌雁,刘文科. LED 红蓝光连续光照对五种生菜生长、光合和叶绿素荧光特性的影响[J].植物生理学报,2017,53(9):1735-1741.
- [10] 赵海燕,王建设,林兴,等. NaCl胁迫对海岛棉幼苗光合和荧光特性的影响[J].中国农学通报,2018,34(6):30-38.
- [11] 闫芳,王勤礼,郭有燕,等. NaCl胁迫对祁连山野生黄瑞香叶片光合叶绿素荧光特性的影响[J].西北植物学报,2016,36(6):1182-1189.
- [12] 胡凡波,刘玲,隆小华,等. 外源NO对NaCl胁迫下长春花幼苗生物量和叶绿素荧光的影响[J].生态学杂志,2011,30(8):1620-1626.
- [13] 王小敏,黄涛,朱泓,等. 4个不同种源滨梅的耐盐性综合评价[J].江西农业大学学报,2016,38(3):433-439.
- [14] 郝汉,曹磊,陈伟楠,等. 盐胁迫对榲桲(*Quercus dentata*)幼苗离子平衡及其生理生化特性的影响[J].生态学报,2020,40(19):6897-6904.
- [15] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology,2008,59:651-681.
- [16] KRONZUCKER H J, BRITTO D T. Sodium transport in plants: a critical review[J]. New Phytologist,2011,189:54-81.
- [17] 赵佳伟,李清亚,路斌,等. 不同品种北美豆梨对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价[J].植物生理学报,2019,55(1):23-31.
- [18] 路斌,侯月敏,李欣洋,等. 野皂荚对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性[J].应用生态学报,2015,26(11):3293-3299.
- [19] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between quantum yield of photosynthetic electron transport quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochim Biophys Acta,1989,990:87-92.
- [20] 张玲,王华,周静,等. NaCl胁迫对两种辣椒品种幼苗叶绿素荧光参数等生理特性的影响[J].浙江农业学报,2017,29(4):597-604.
- [21] 吴雪仪,陈红跃,黄永芳,等. 干旱胁迫对6种园林灌木光合生理特性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(22):142-147.
- [22] 朱新广,张其德. NaCl对光合作用影响的研究进展[J].植物学报,1999,16(4):332-338.
- [23] 贾婷婷,常伟,范晓旭,等. 盐胁迫下AM真菌对沙枣苗木光合与叶绿素荧光特性的影响[J].生态学报,2018,38(4):1337-1347.
- [24] 许大全,张玉忠,张荣铨. 植物光合作用的光抑制[J].植物生理学通讯,1992,28(4):237-243.
- [25] SHABALA S N, SHABALA S I, MARTYENKO A I, et al. Salinity effect on bioelectric activity, growth, Na<sup>+</sup> accumulation and chlorophyll fluorescence of maize leaves: a comparative survey and prospects for screening[J]. Aust J Plant Physiol,1998,25:609-616.
- [26] JARUNEE J, USUI K, MATSUMOTO H. Differences in physiological responses to NaCl between salt-tolerant *Sesbania rostrata* Brem. & Oberm, and non-tolerant *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Weed Biology and Management,2003,3:21-27.
- [27] 李远航,贺康宁,张潭,等. 盐胁迫对黑果枸杞光合生理指标的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):82-88.
- [28] WILLEKENS H, CAMP W V, MONTAGU M V, et al. Ozone, sulfur dioxide, and ultraviolet-B have similar effects on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana glauca* L. [J]. Plant Physiol,1994,106:1007-1014.
- [29] 赵昕,吴雨霞,赵敏桂,等. NaCl胁迫对盐芥和拟南芥光合作用的影响[J].植物学通报,2007,24(2):154-160.
- [30] 洪立洲,王茂文,丁海荣,等. NaCl胁迫对马齿苋光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J].西北植物学报,2011,31(12):2516-2521.
- [31] 黄鑫浩,朱凡,胡丰姣,等. 基于Lake模型的Pb胁迫对木荷和栎树幼树叶片叶绿素荧光参数的影响研究[J].生态学报,2018,38(4):1284-1292.
- [32] 方怡然,薛立. 盐胁迫对植物叶绿素荧光影响的研究进展[J].生态科学,2019,38(3):225-234.
- [33] YAMANE K, KAWASAKI M, TANIGUCHI M, et al. Correlation between chloroplast ultrastructure and chlorophyll fluorescence characteristics in the leaves of rice (*Oryza sativa* L.) grown under salinity[J]. Plant Production Science,2008,11(1):139-145.
- [34] TAKAHASHI S, BADGER M R. Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage[J]. Trends in Plant Science,2011,16(1):53-60.

(责任编辑:陈海霞)