

盐胁迫和洗盐处理对贴梗海棠生理特性的影响

李 景¹ 刘群录^{1,2} 唐东芹^{1,2} 张婷婷¹

(1 上海交通大学农业与生物学院,农业部都市农业(南方)重点开放实验室 2 上海城市植物资源开发与应用工程技术研究中心)

摘要:以贴梗海棠 3 年生盆栽苗为材料,经 50、100 和 150 mmol/L NaCl 处理 14 d,随后进行洗盐处理,测定其间盐害指数、叶绿素含量、相对电导率、MDA 含量、抗氧化酶活性和可溶性蛋白质含量的变化,探讨了贴梗海棠的耐盐性。结果表明:随土壤中 NaCl 浓度的增加及处理时间的延长,盐害指数、相对电导率和 MDA 含量呈上升趋势,而叶绿素含量和可溶性蛋白质含量则不断降低,表明贴梗海棠在盐胁迫下受害严重。即使在 50 mmol/L NaCl 处理中仍表现出明显的盐害症状,证明贴梗海棠属于盐敏感植物。在盐胁迫初期,贴梗海棠中 SOD 酶的活性随 NaCl 浓度升高显著升高,各盐处理在第 7 天时达到最大;而在第 14 天急剧下降。50 mmol/L NaCl 处理的 CAT 活性高于对照,并随胁迫时间延长而升高,到第 14 天时达到最大值。而在 100 和 150 mmol/L NaCl 处理中 CAT 活性至第 7 天时达到最大值,在第 14 天时迅速下降。APX 和 POD 与 CAT 有类似的变化趋势。说明抗氧化酶系统在贴梗海棠抵御盐胁迫过程中具有重要作用。洗盐处理 37 d 后,50 mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠的各项生理指标可恢复到对照处理的水平。而 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠也有显著的恢复,但是恢复速度和程度低于 50 mmol/L NaCl 处理,说明植物在盐胁迫中的恢复能力与其所受到的盐害程度明显相关,也可作为评价植物耐盐性的指标。

关键词:贴梗海棠;盐胁迫;洗盐处理;耐盐性

中图分类号:S687.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2011)06-0040-07

LI Jing¹; LIU Qun-lu^{1,2}; TANG Dong-qin^{1,2}; ZHANG Ting-ting². **Effects of salt stress and salt leaching on the physiological characteristics of *Chaenomeles speciosa*.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) **33**(6) 40-46 [Ch, 34 ref.]

1 School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Key Laboratory of Urban Agriculture (South) of Ministry of Agriculture, 200240, P. R. China;

2 Shanghai Engineering Research Center of Sustainable Plant Innovation, 200231, P. R. China.

To evaluate salt tolerance of *Chaenomeles speciosa*, salt injury index, chlorophyll content, relative conductivity, MDA content, antioxidant enzyme activities and soluble protein content were measured during the pot-cultured 3-year-old seedlings exposed to 50, 100 and 150 mmol/L NaCl for 14 days and following salt leaching for 37 days. The results showed that, the salt injury index, relative conductivity and MDA content increased with the increase of NaCl concentration and exposure periods, while chlorophyll content and soluble protein content decreased, indicating that *C. speciosa* suffered serious salt injury during salt exposure, even in 50 mmol/L NaCl treatment. So *C. speciosa* was one of salt-sensitive shrubs. During the early stage of salt stress, the superoxide dismutase (SOD) activity was enhanced in a salt concentration and exposure duration dependent manner, and reached the maximum on the 7th day, then turned to sharply decrease on the 14th day. In 50 mmol/L treatment, the catalase (CAT) activity was higher than that of control, and rose with salt exposure extension, and maximized on the 14th day. While in 100 and 150 mmol/L NaCl treatment, the maximum of CAT activity shifted to the 7th day, and the activity decreased rapidly on the 14th day. The ascorbic acid peroxidase (APX) and peroxidase (POD) had the similar variation trend with the CAT activity. The results demonstrated that the antioxidant enzymes played important role in *C. speciosa* resisting to salt stress. After salt leaching for 37

收稿日期:2011-06-15

基金项目:上海市科学技术委员会项目(09dz1205003)、“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAJ10B04-5)。

第一作者:李景。主要研究方向:植物抗逆生理。电话:021-34205731 Email:lj737125@163.com 地址:200240 上海市东川路 800 号上海交通大学农生楼 74 信箱。

责任作者:刘群录,博士,副教授。主要研究方向:植物抗逆生理。电话:021-34205730 Email:liuql5730@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

days, the physiological indexes of 50 mmol/L NaCl treatment recovered to the control level. *C. speciosa* in 100 and 150 mmol/L NaCl treatments also apparently recovered from salt injury during salt leaching, but with lower speeds and less degrees compared with that of 50 mmol/L treatment. The results indicate that the recovering ability from salt injury has a close relation with salt injury degree, which might be used as a physiological index to evaluate plant salt tolerance.

Key words *Chaenomeles speciosa*; salt stress; salt leaching; salt tolerance

贴梗海棠 (*Chaenomeles speciosa*) 是蔷薇科 (Rosaceae) 木瓜属植物, 其花色丰富, 它的花期为 3—4 月, 是园林中主要春季花木之一, 也是理想的花果树桩盆景材料^[1]。贴梗海棠的果实叫皱皮木瓜, 是我国特有的珍稀水果之一; 皱皮木瓜可作为药用, 其中所含甾醇、有机酸、黄酮、五环三萜等成分, 可以起到抗肿瘤、抗炎抗菌的作用, 具有很高的药用价值^[2]。贴梗海棠还可以作为监测臭氧的指示植物^[3]。

前人对贴梗海棠的研究主要集中在栽培管理^[4]、组培快繁^[5]、挥发性成分研究^[6]、干旱胁迫^[7]、药用价值^[8]以及品种分类等方面的研究^[9]。樊华^[10]和许卉^[11]分别通过盆栽试验和大田试验研究了贴梗海棠的耐盐性。但是二人测得的贴梗海棠耐盐性有所不同, 可能是由于所用试验材料或栽培条件的差异造成的。在研究植物抗旱性时, 常通过比较植物在复水处理中的恢复程度和速率来判断不同植物的抗旱性^[12-14]或不同处理^[15]对植物抗旱性的影响。在本研究中, 我们借鉴了类似的方法, 研究了不同 NaCl 处理的贴梗海棠在洗盐处理中的恢复过程, 为用这种方法研究植物的耐盐性进行了一定的尝试。为了进一步确定贴梗海棠的耐盐性, 我们通过盆栽试验, 测定了其生理指标的变化。为其新品种在城市绿化中的应用提供科学依据, 同时为发掘耐盐园林植物、丰富盐碱地区的园林植物资源提供一定的参考。

1 材料和方法

1.1 材料

选择健康、生长一致的 3 年生贴梗海棠苗, 栽植于花盆中, 基质为珍珠岩: 蛭石: 园土 (1: 1: 1), 放置于露天, 正常浇水管理 2 个月后将转入上海交通大学农业与生物学院温室中。于 2010 年 7 月 23 日开始进行盐处理。

1.2 试验设计

试验设置 4 个 NaCl 浓度, 根据祁淑艳^[16]的方法, 分别为 0、50、100、150 mmol/L, 对应轻度盐渍土 (0.4% 以下)、中度盐渍土 (0.4% ~ 0.6%) 和重度盐渍土 (0.6% 以上)。每种植物每个处理设置 3 个重复, 每个重复 3 株苗。为避免高浓度盐处理造成

冲击效应^[17], 每 3 天增加 50 mmol/L NaCl 直至达到终浓度, 达到终浓度时开始计算盐胁迫的天数。以后每 3 d 定时、定量浇灌相应浓度的盐溶液, 每 6 d 浇 1 次 1/2 Hoagland 营养液配制的 NaCl 溶液。达到终浓度后第 1、7 和 14 天取植株叶片测定生理指标。盐处理 18 d 后开始进行洗盐处理, 只浇 1/2 Hoagland 营养液, 每隔 3 天浇 1 次, 洗盐 37 d 后取植株相同部位叶片测定生理指标。

1.3 试验方法

叶绿素含量测定参照刘秀丽的方法^[18]。参考赵世杰^[19]的方法, 利用改良的硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定 MDA 含量。可溶性糖含量的测定用蒽酮比色法。可溶性蛋白含量的测定用考马斯亮蓝 G-250 染色法。酶液的制备参考章崇玲^[20]的方法, 用于测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 以及超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性。比色分析在 Thermo Evolution 60 分光光度计上进行测定, 每个数据重复测定 3 次。

采用改进相对电导法 (RC) 测定植物的膜透性^[21]。将叶片用去离子水洗净, 置于试管中, 放入摇床震荡 24 h 之后, 用 DDS-II A 型电导仪测定初始电导值 L_1 , 封口沸水浴 20 min, 待冷至室温后测定其电导值 L_2 , 测定纯水电导率 L_0 , 其计算公式如下:

$$RC = \frac{L_1 - L_0}{L_2 - L_0} \times 100\%$$

盐害指数的计算参照杜中军等^[22]人的方法略作修改。分别于盐处理 7、10、13、16 d 和洗盐处理 37 d 时进行观察记录, 计算盐害指数 (SI)。盐害级别参考周万海^[23]的方法。盐害分级标准为: 0 级为无盐害症状; 1 级为轻度盐害, 有少部分叶尖、叶缘或者叶脉变黄; 2 级为中度盐害, 有大约 1/2 的叶尖、叶缘焦枯; 3 级为重度盐害, 大部分叶尖、叶缘焦枯或落叶; 4 级为极重度盐害, 枝枯、叶落、最终死亡。

盐害指数 (SI) =

$$\frac{\sum (\text{盐害级值} \times \text{相应盐害级值株数})}{\text{总株数} \times \text{盐害最高级值}} \times 100\%$$

1.4 数据分析

数据利用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析

和 Duncan 检验。用字母法标记,不同的大写字母表示同一盐浓度下不同处理时间的显著性差异,不同小写字母表示同一处理时间不同盐浓度的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫下贴梗海棠盐害指数的变化

随盐浓度的增加和胁迫时间的延长,贴梗海棠的盐害指数呈上升趋势(表 1)。在盐胁迫处理 7 d

时,100 和 150 mmol/L NaCl 处理盐害指数分别达到 27.8% 和 47.2%,与对照相比均达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。处理 13 d 后 50 mmol/L NaCl 处理也开始出现盐害症状,并且与对照的差异达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。到 16 d 时,盐害指数进一步升高,胁迫症状进一步加重。洗盐处理之后,原来 50 mmol/L NaCl 处理的植株可完全恢复,而原 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的盐害症状明显减轻,但与对照仍有极显著的差异 ($P < 0.01$)。

表 1 贴梗海棠盐害指数在盐胁迫下的变化

Tab. 1 Changes of salt injury index of *C. speciosa* under salt stress

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d				洗盐处理/d
	7	10	13	16	37
0	0.0 ± 0.0 ^{aA}	0.0 ± 0.0 ^{aA}	0.0 ± 0.0 ^{aA}	0.0 ± 0.0 ^{aA}	0.0 ± 0.0 ^{aA}
50	0.0 ± 0.0 ^{aA}	0.0 ± 0.0 ^{aA}	25.0 ± 0.0 ^{bB}	38.9 ± 9.6 ^{bC}	0.0 ± 0.0 ^{aA}
100	27.8 ± 4.8 ^{bA}	50.0 ± 8.3 ^{bB}	61.1 ± 4.8 ^{cC}	72.2 ± 4.8 ^{cD}	27.8 ± 4.8 ^{bA}
150	47.2 ± 12.7 ^{cA}	66.7 ± 8.3 ^{cB}	72.2 ± 4.8 ^{dC}	86.1 ± 4.8 ^{dD}	33.3 ± 8.3 ^{bA}

2.2 NaCl 胁迫对贴梗海棠叶片叶绿素含量的影响

叶绿素代谢是一个动态平衡过程,盐胁迫使叶绿素含量发生变化,从而打破了这种平衡。贴梗海棠叶绿素含量随盐浓度的升高和胁迫时间的延长呈下降的趋势(表 2)。盐胁迫 1 d 时,150 mmol/L NaCl 处理的叶绿素含量与对照相比就达到了显著水平 ($P < 0.05$),其他处理无显著差异。7 d 时,50 mmol/L NaCl 处理达到显著水平 ($P < 0.05$),100 和 150 mmol/L NaCl 处理则达到极显著差异 ($P < 0.01$)。14 d 时,与对照相比,各个处理叶绿素含量

分别下降 34.3%、46.7%、49.7%,差异均达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。这可能是由于逆境胁迫激活了叶绿素降解酶的活性^[24]。同时叶绿素含量的降低也有助于过量激发能的有效散失,减少活性氧自由基的生成,使其免受氧化胁迫的危害^[25]。

洗盐处理后,原 50 mmol/L NaCl 处理可恢复至对照水平;而原 100 和 150 mmol/L NaCl 处理可分别恢复至对照处理的 73.6% 和 70.4%,差异仍达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 2 NaCl 胁迫对贴梗海棠叶绿素含量的影响

Tab. 2 Influence of NaCl stress on chlorophyll content of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	3.8 ± 0.2 ^{bA}	3.8 ± 0.1 ^{cA}	3.9 ± 0.1 ^{cA}	4.5 ± 0.2 ^{bB}
50	3.5 ± 0.1 ^{bB}	3.5 ± 0.01 ^{bB}	2.5 ± 0.3 ^{bA}	4.1 ± 0.4 ^{bC}
100	3.5 ± 0.3 ^{bC}	2.2 ± 0.1 ^{aA}	2.0 ± 0.1 ^{aA}	3.3 ± 0.2 ^{aB}
150	3.3 ± 0.1 ^{aB}	2.2 ± 0.1 ^{aA}	1.9 ± 0.1 ^{aA}	3.1 ± 0.2 ^{aB}

2.3 NaCl 胁迫对细胞膜透性的影响

植物细胞膜是植物进行物质代谢、能量转换和信号传递的重要场所。其完整性反映了植物受逆境胁迫伤害的程度。本研究中以相对电导率表示贴梗海棠细胞膜透性的变化。

如表 3 所示,贴梗海棠叶片的相对电导率随盐浓度的上升和胁迫时间的延长而上升。盐胁迫处理 1 d 后,150 mmol/L NaCl 处理的相对电导率与对照相比差异达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。处理 7 d 时,100 和 150 mmol/L NaCl 处理与对照的差异均达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。盐胁迫 14 d 时,随 NaCl 浓度的升高,相对电导率迅速上升;50、100 和

150 mmol/L NaCl 处理分别比对照升高了 58.8%、70.59% 和 129.4%,均达到了极显著差异水平 ($P < 0.01$)。这些结果说明贴梗海棠叶片细胞膜的完整性在盐胁迫下受到了严重的伤害。

洗盐处理后,各盐处理的相对电导率均有不同程度的下降。相比于盐胁迫 14 d 时,原 50、100 和 150 mmol/L 处理的相对电导率分别下降了 12.9%、21.8% 和 42.1%。但是与洗盐处理后的对照相比,差异仍达到了显著差异水平 ($P < 0.05$) 或极显著差异水平 ($P < 0.01$) (表 3)。说明洗盐处理后,贴梗海棠叶片的细胞膜的完整性得到了部分的恢复。

表 3 NaCl 胁迫对贴梗海棠叶片相对电导率的影响

Tab. 3 Influence of NaCl stress on electrolyte leakage of *C. speciosa* leaves

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	16.3 ± 2.1 ^{AA}	17.6 ± 1.7 ^{AA}	17.9 ± 1.8 ^{AA}	14.6 ± 1.4 ^{AA}
50	17.9 ± 1.4 ^{AA}	19.2 ± 0.8 ^{AA}	20.1 ± 1.4 ^{BB}	17.5 ± 1.5 ^{BA}
100	18.1 ± 1.6 ^{AA}	24.7 ± 1.7 ^{BB}	29.8 ± 1.1 ^{CC}	23.3 ± 0.8 ^{CB}
150	28.1 ± 0.6 ^{BB}	31.6 ± 1.9 ^{CC}	39.9 ± 1.0 ^{DD}	23.1 ± 1.3 ^{CA}

2.4 NaCl 胁迫对膜脂过氧化的影响

在逆境胁迫条件下,植物叶片往往发生膜脂过氧化作用。MDA 是植物细胞膜脂过氧化产物之一,其含量的高低可以反应逆境胁迫下植物被伤害程度的大小,是膜脂过氧化程度的重要标志。

贴梗海棠 MDA 含量的变化与相对电导率的变化基本一致,均随着盐浓度的增加及胁迫时间的延长而增加(表 4)。盐胁迫处理 1 d 时,各个处理并无显著差异,远不如相对电导率反应灵敏。盐胁迫处理 7 d 后,50 mmol/L 处理与对照没有显著性差

异,100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 MDA 含量则分别达到显著($P < 0.05$)和极显著差异水平($P < 0.01$)。处理 14 d 时,MDA 含量进一步升高,50 mmol/L 与对照相比达到了显著性差异($P < 0.05$),100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 MDA 含量分别比对照升高 73.3% 和 80.0%,差异均达到了极显著水平($P < 0.01$)。洗盐处理后,各处理的 MDA 含量均迅速下降。与对照没有明显的差异。结果说明,盐胁迫对贴梗海棠产生了明显的氧化伤害。解除盐胁迫后,贴梗海棠叶片的细胞膜的氧化伤害大大降低。

表 4 NaCl 胁迫对贴梗海棠丙二醛含量的影响

Tab. 4 Influence of NaCl stress on MDA content of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	39.9 ± 6.9 ^{AB}	43.5 ± 6.5 ^{AB}	45.9 ± 2.1 ^{AB}	21.0 ± 3.0 ^{AA}
50	41.0 ± 5.2 ^{AB}	44.4 ± 3.5 ^{AB}	59.6 ± 3.3 ^{BC}	20.4 ± 1.2 ^{AA}
100	40.9 ± 4.5 ^{AB}	55.0 ± 3.1 ^{BC}	78.5 ± 6.0 ^{CD}	20.9 ± 2.8 ^{AA}
150	45.6 ± 7.9 ^{AB}	66.8 ± 3.0 ^{CC}	81.9 ± 4.8 ^{CD}	23.9 ± 2.8 ^{AA}

2.5 NaCl 胁迫对贴梗海棠的抗氧化酶系统的影响

为了避免 NaCl 处理产生的氧化胁迫伤害,植物在长期的进化适应过程中形成了一系列的抗氧化酶,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等,可清除活性氧,维持活性氧代谢平衡,保护膜的结构和功能。

2.5.1 NaCl 胁迫对 SOD 活性的影响

随着盐胁迫时间的延长贴梗海棠的 SOD 活性先上升后下降(表 5)。在处理 1 d 时,50 mmol/L

NaCl 处理的 SOD 活性上升,但与对照没有显著性差异。100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 SOD 活性,则分别达到显著($P < 0.05$)和极显著差异水平($P < 0.01$)。各处理均在 7 d 时达到最大值,与同期对照相比分别增加了 12.4%、25.5%、26.1%。50 mmol/L NaCl 处理的 SOD 活性与对照相比达到了显著性差异($P < 0.05$),100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 SOD 活性,均达到了极显著水平($P < 0.01$)。盐胁迫 14 d 后,各个盐处理的 SOD 活性均急剧下降,并低于对照,且均达到了极显著水平($P < 0.01$)。

表 5 NaCl 胁迫对贴梗海棠 SOD 活性的影响

Tab. 5 Influence of NaCl stress on SOD activity of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	15.5 ± 1.2 ^{AA}	16.2 ± 0.8 ^{AA}	13.8 ± 0.6 ^{CB}	14.5 ± 0.6 ^{AA}
50	16.9 ± 0.2 ^{AB}	18.1 ± 0.6 ^{BC}	12.9 ± 0.5 ^{BA}	15.9 ± 1.5 ^{AB}
100	17.2 ± 1.0 ^{BB}	20.2 ± 0.8 ^{CC}	4.1 ± 1.3 ^{AA}	17.6 ± 1.4 ^{BB}
150	20.1 ± 0.2 ^{CB}	22.3 ± 1.1 ^{DC}	2.5 ± 0.9 ^{AA}	19.6 ± 1.1 ^{CB}

洗盐处理后,各盐处理的 SOD 酶活性均大幅上升,并高过了对照处理。其中,原 50 mmol/L NaCl 处理的 SOD 活性与对照相比无显著性差异,但是原 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 SOD 活性,则分别达

到显著($P < 0.05$)和极显著差异水平($P < 0.01$)。

2.5.2 NaCl 胁迫对 CAT 活性的影响

随着胁迫时间的延长,不同浓度 NaCl 处理的 CAT 活性变化趋势不同(表 6)。在盐胁迫期间,50

mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠 CAT 活性一直呈现上升趋势,至 14 d 时达到最大值,比同时期对照高 51.2%。

表 6 NaCl 胁迫对贴梗海棠 CAT 活性的影响
Tab. 6 Influence of NaCl stress on CAT activity of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	16.8 ± 1.4 ^{aA}	17.0 ± 2.5 ^{aA}	20.9 ± 2.0 ^{cA}	16.8 ± 2.7 ^{aA}
50	17.1 ± 1.9 ^{aA}	23.7 ± 1.9 ^{bB}	31.6 ± 2.6 ^{dC}	17.3 ± 0.1 ^{aA}
100	20.5 ± 1.6 ^{bB}	41.9 ± 2.5 ^{cD}	15.3 ± 1.8 ^{bA}	26.2 ± 2.5 ^{bC}
150	20.3 ± 1.7 ^{bB}	44.8 ± 1.5 ^{cD}	10.5 ± 1.5 ^{aA}	29.5 ± 2.7 ^{bC}

在 100 和 150 mmol/L NaCl 处理下, CAT 活性变化趋势是先上升后下降。在胁迫 1 d 时, 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠 CAT 活性高于对照, 差异显著 ($P < 0.05$)。在胁迫 7 d 时, 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 CAT 活性达到最大值, 分别增加了 146.6% 和 163.5%, 与对照相比均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在胁迫 14 d 时, 与对照相比, 100 和 150 mmol/L NaCl 处理分别降低了 26.64% 和 49.7%。

洗盐处理后, 原 50 mmol/L NaCl 处理的 CAT 活性与对照相比无显著性差异; 但是原 100 mmol/L 和 150 mmol/L NaCl 处理的 CAT 活性均高于对照, 并达到极显著差异水平 ($P < 0.01$)。

2.5.3 NaCl 胁迫对 APX 活性的影响

随着时间延长, 不同浓度 NaCl 处理的贴梗海棠

中 APX 活性有不同的变化趋势(表 7)。在盐处理期间, 对照的 APX 酶活性没有明显的变化。50 mmol/L NaCl 处理的酶活性随处理时间延长呈直线上升趋势。到 14 d 时达到最大值, 比对照提高了 174.6%, 差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。而 100 和 150 mmol/L NaCl 处理在第 7 天时达到最大值, 分别比对照升高了 169.8% 和 185.6%; 到第 14 天时, 分别下降为 11.5 和 6.2 U/(g·min), 为同时期对照的 138.0% 和 74.1%。

洗盐处理后, 与盐处理 14 d 时相比, 原 50 mmol/L NaCl 处理的 APX 活性下降, 与对照相比无显著性差异; 原 100 mmol/L NaCl 处理没有明显变化; 原 150 mmol/L NaCl 处理的 APX 酶活性升高。与同时期对照相比, 随原来盐浓度的升高, APX 酶活性呈升高趋势。

表 7 NaCl 胁迫对贴梗海棠 APX 活性的影响
Tab. 7 Influence of NaCl stress on APX activity of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	6.8 ± 1.2 ^{aA}	6.5 ± 0.3 ^{aA}	8.3 ± 0.8 ^{aA}	8.2 ± 2.0 ^{aA}
50	7.2 ± 1.7 ^{aA}	14.1 ± 1.0 ^{bB}	22.9 ± 1.9 ^{cC}	8.8 ± 2.0 ^{aA}
100	7.6 ± 0.5 ^{aA}	17.4 ± 1.5 ^{cB}	11.5 ± 1.7 ^{bC}	12.4 ± 2.1 ^{bB}
150	8.1 ± 0.5 ^{aA}	18.4 ± 0.6 ^{cC}	6.2 ± 0.6 ^{aA}	15.9 ± 2.0 ^{bB}

2.5.4 NaCl 胁迫对 POD 活性的影响

在盐胁迫期间, 贴梗海棠的 POD 活性变化与 APX 类似(表 8)。50 mmol/L NaCl 处理的 POD 活性随胁迫时间延长而直线上升, 到第 14 天时达到最大值, 比对照升高了 154.6%。而 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 POD 活性在第 7 天时最高, 分别比对照增加了 99.1% 和 107.1%, 差异达极显著水平

($P < 0.01$); 到第 14 天时均急剧下降, 仅为对照的 85.1% 和 53.5%, 差异明显。

洗盐处理后, 原 50 mmol/L NaCl 处理的 POD 活性下降, 与对照相比无显著性差异。原 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的 POD 活性比盐处理 14 d 时明显升高, 差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 8 NaCl 胁迫对贴梗海棠 POD 活性的影响
Tab. 8 Influence of NaCl stress on POD activity of *C. speciosa*

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	18.7 ± 1.8 ^{aA}	18.1 ± 2.4 ^{aA}	24.6 ± 1.8 ^{bB}	26.5 ± 1.7 ^{aB}
50	20.9 ± 3.3 ^{aA}	42.0 ± 1.2 ^{bC}	62.6 ± 2.5 ^{cD}	27.0 ± 2.5 ^{aB}
100	23.0 ± 2.0 ^{aA}	54.1 ± 2.7 ^{cB}	20.9 ± 2.4 ^{bA}	56.4 ± 2.4 ^{bB}
150	23.1 ± 2.6 ^{aB}	55.5 ± 2.7 ^{cC}	13.2 ± 2.1 ^{aA}	67.5 ± 0.7 ^{cD}

2.6 NaCl 胁迫对贴梗海棠可溶性蛋白质含量的影响

随着盐胁迫时间的延长,不同浓度 NaCl 处理的贴梗海棠其可溶性蛋白质的含量呈下降趋势(表 9)。在盐胁迫 1 d 时,各个处理的可溶性蛋白质含量没有显著差异。到第 7 天时,可溶性蛋白质含量随土壤中 NaCl 浓度的增加而下降。其中 100 和 150 mmol/L NaCl 处理与对照的差异达到了极显著水平($P < 0.01$)。到第 14 天时,各盐处理的可溶性蛋白质含量进一步下降。50、100 和 150 mmol/L

NaCl 处理与对照相比,分别下降了 15.6%、34.8%、37.1%,差异分别达到了显著($P < 0.05$)或极显著水平($P < 0.01$)。

洗盐处理后,原 50、100 和 150 mmol/L NaCl 处理的可溶性蛋白质含量分别比盐处理 14 d 时上升了 27.3%、24.0% 和 26.6%,差异均达显著水平($P < 0.05$)。与同期对照相比,原 100 和 150 mmol/L NaCl 处理的可溶性蛋白质分别下降了 26.7% 和 27.6%,与对照差异达极显著水平($P < 0.01$)。

表 9 NaCl 胁迫对贴梗海棠可溶性蛋白含量的影响

Tab. 9 Influence of NaCl stress on soluble protein content of *C. speciosa*

mg·g⁻¹

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	盐处理/d			洗盐处理/d
	1	7	14	37
0	7.0 ± 0.03 ^{ab}	6.5 ± 0.04 ^{bb}	6.3 ± 0.03 ^{ca}	6.9 ± 0.02 ^{bb}
50	6.6 ± 0.04 ^{ab}	6.4 ± 0.04 ^{bb}	5.3 ± 0.01 ^{ba}	6.8 ± 0.04 ^{bb}
100	6.4 ± 0.02 ^{ac}	5.1 ± 0.02 ^{ab}	4.1 ± 0.03 ^a	5.1 ± 0.06 ^{ab}
150	6.7 ± 0.03 ^{ac}	4.7 ± 0.02 ^{ab}	4.0 ± 0.03 ^a	5.0 ± 0.01 ^{ab}

3 结论与讨论

试验结果表明,在 50 mmol/L NaCl 盐胁迫下,贴梗海棠即发生了明显的盐害现象,同时叶绿素含量和可溶性蛋白质含量下降。说明贴梗海棠是一种盐敏感植物,这与许卉^[11]在大田试验中所得到的结论相同。

在盐胁迫下,贴梗海棠叶片中 MDA 的含量随土壤中 NaCl 浓度的升高和胁迫时间的延长而上升,并且与盐害指数呈正相关关系。这一现象在 Davenport 等人^[26]的研究中也有发现。这些结果说明,氧化胁迫是 NaCl 对贴梗海棠造成盐害的一个重要原因。盐胁迫形成的氧化胁迫可能是由于逆境阻断了光系统 II (PS II) 中的电子传递,使激活态叶绿素分子累积,进而导致氧自由基的大量产生^[27]。氧自由基使膜质发生过氧化作用,造成植物膜透性增加。

为了抵御氧化胁迫,植物可通过调节体内的抗氧化酶系统来清除过量的活性氧。植物体内的抗氧化酶系统包括: SOD、CAT、APX 和 POD,其中 SOD 可将 O₂⁻ 转变为 H₂O₂,生成的 H₂O₂ 为 APX、POD 和 CAT 分解为 H₂O 和 O₂^[28]。抗氧化酶体系协同作用维持植物体内活性氧的代谢平衡,保护膜结构,从而使植物在一定程度上减缓逆境胁迫伤害^[29]。贴梗海棠中 SOD 酶在盐胁迫初期活性显著升高;但是随着胁迫时间的延长转而下降。大麦 (*Hordeum vulgare*)^[30]、构树 (*Broussonetia papyrifera*)^[31]、油菜 (*Broussonetia Papyrifera*)^[32]、玉米 (*Zea mays*)^[33] 等植物中的 SOD 酶活性在盐胁迫也有类似的现象。

贴梗海棠中 CAT、APX 和 POD 这 3 种酶活性在盐胁迫下彼此间有着相类似的变化趋势。在 50 mmol/L NaCl 处理中,这 3 种酶的活性均高于对照,并随胁迫时间的延长而升高,到 14 d 时达到最大值。而 100 和 150 mmol/L NaCl 处理在第 7 天时酶活性达到最大值,至 14 d 时急速下降。说明在低盐胁迫下,贴梗海棠中的抗氧化酶体系在清除氧自由基中起着重要作用;在高盐胁迫中,只在短时期内具有保护作用。在 Kriwoken 等人^[34]的研究中也观察到类似的现象。

在洗盐处理 37 d 后,50 mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠可完全恢复,其盐害指数下降为 0,相对电导率、MDA 含量和抗氧化酶的活性也同时下降,而叶绿素含量和可溶性蛋白质含量上升,与对照没有明显差异。说明经过洗盐处理后,50 mmol/L NaCl 处理的贴梗海棠可从盐胁迫中完全恢复。100 和 150 mmol/L NaCl 处理的盐害指数、相对电导率和 MDA 含量均有明显的下降,同时叶绿素含量和可溶性蛋白质含量均显著增加。但是除了 MDA 含量与对照无显著差异外,其他指标均与对照有显著差异。说明贴梗海棠在高盐胁迫中恢复的程度低于低盐胁迫,即从盐胁迫中恢复的能力也反映了其耐盐性。因此,从盐胁迫中的恢复能力也可作为评价植物耐盐性的指标。

参 考 文 献

- [1] 邢升清. 贴梗海棠盆景的制作及养护[J]. 花木盆景(盆景赏石), 2002(2): 25.
- [2] 宋亚玲. 中药木瓜化学成分及生物活性研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

- [3] 王勋陵,陈庆诚. 利用贴梗海棠作为监测臭氧指示植物的研究[J]. 甘肃环境研究与监测,1985(增刊1):44-46.
- [4] 邓运川,沙刚. 贴梗海棠的栽培管理[J]. 中国花卉园艺,2010(14):34-35.
- [5] 陈昱,叶景丰,马冬菁,等. 贴梗海棠组培快繁技术研究[J]. 北方园艺,2008(8):186-187.
- [6] 王金梅,康文艺. 贴梗海棠挥发性成分研究[J]. 天然产物研究与开发,2010(2):248-252.
- [7] 尹桂彬,李月华,袁德泉,等. 干旱胁迫对西府海棠和贴梗海棠生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(10):5202-5203,5309.
- [8] 彭华胜,程铭恩,王德群,等. 药用木瓜的资源与采收加工调查[J]. 中华中医药杂志,2009(10):1296-1298.
- [9] 郑林,陈红,张雷,等. 木瓜属植物的花粉形态及品种分类[J]. 林业科学,2008,44(5):53-57,176-177.
- [10] 樊华. 15种常见园林绿化植物的耐盐性研究[D]. 重庆:西南大学,2007.
- [11] 许卉. 黄河三角洲盐渍土园林绿化植物筛选及改土措施研究[D]. 济南:山东师范大学,2007.
- [12] 杜建雄,师尚礼,刘金荣,等. 干旱胁迫和复水对草地早熟禾3个品种生理特性的影响[J]. 草地学报,2010(1):73-77.
- [13] 邓丽娟,沈红香,姚允聪. 观赏海棠品种对土壤干旱胁迫的响应差异[J]. 林业科学,2011,47(3):25-32.
- [14] XU L, HAN L, HUANG B. Membrane fatty acid composition and saturation levels associated with leaf dehydration tolerance and post-drought rehydration in Kentucky bluegrass[J]. *Crop Science*, 2011, 51(1):273-281.
- [15] 梁鹏,邢兴华,周琴,等. α -萘乙酸对干旱和复水处理下大豆幼苗生长和光合作用的影响[J]. 大豆科学,2011(1):50-55.
- [16] 祁淑艳,储诚山. 盐生植物对盐渍环境的适应性及其生态意义[J]. 天津农业科学,2005(2):42-45.
- [17] 陈年来,马国军,张玉鑫,等. 甜瓜种子萌发和幼苗生长对NaCl胁迫的响应[J]. 中国沙漠,2006(5):814-819.
- [18] 刘秀丽,宋平,孙成明. 植物叶绿素测定方法的再探讨[J]. 江苏农业研究,1999(3):46-47.
- [19] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994(3):207-210.
- [20] 章崇玲,曾国平,陈建勋. 干旱胁迫对菜苔叶片保护酶活性和膜脂过氧化的影响[J]. 植物资源与环境学报,2000(4):23-26,33.
- [21] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京:科学出版社,2009:78-80.
- [22] 杜中军,翟衡,罗新书,等. 苹果砧木耐盐性鉴定及其指标判定[J]. 果树学报,2002(1):4-7.
- [23] 周万海. 葡萄砧木耐盐性及砧穗特性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2005.
- [24] MIHAILOVIĆ N, LAZAREVIĆ M, DŽELETOVIĆ Z, et al. Chlorophyllase activity in wheat, *Triticum aestivum* L. leaves during drought and its dependence on the nitrogen ion form applied[J]. *Plant Science*, 1997, 129(2):141-146.
- [25] ROUHI V, SAMSON R, LEMEUR R, et al. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2):117-129.
- [26] DAVENPORT S B, GALLEGOS M, BENAVIDES M P, et al. Behaviour of antioxidant defense system in the adaptive response to salt stress in *Helianthus annuus* L. cells[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003, 40(1):81-88.
- [27] KATO M, SHIMIZU S. Chlorophyll metabolism in higher plants VI. Involvement of peroxidase in chlorophyll degradation[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1985, 26(7):1291.
- [28] ASADA K. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1999, 50(1):601-639.
- [29] 杜秀敏,殷文璇,张慧. 超氧化物歧化酶(SOD)研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2003,23(1):48-50.
- [30] 龚明,丁念诚,贺子义. 盐胁迫下大麦和小麦叶片脂质过氧化伤害与超微结构变化的关系[J]. 植物学报,1989,31(11):841-846.
- [31] 杨帆,丁菲,杜天真,等. 构树抗氧化酶系统对盐胁迫的响应[J]. 浙江林业科技,2008,28(1):1-4.
- [32] 金美芳,连阳梅,林炎鸿. NaCl胁迫对油菜幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 福建师大福清分校学报,2009(2):16-20.
- [33] DE AZEVEDO NETO A D, PRISCO J T, ENEAS-FILHO J, et al. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1):87-94.
- [34] KRIWOKEN L K, HEDGE P. Exotic species and estuaries: Managing *Spartina anglica* in Tasmania, Australia[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2000, 43(7):573-584.

(责任编辑 赵勃)