

混合盐胁迫对 3 个乔木树种 生理指标及 K^+ 和 Na^+ 分布的影响

郭金博¹, 杜丽娟^{1,2}, 范文才¹, 施 钦¹, 殷云龙¹, 华建峰^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014; 2. 上海上实现代农业开发有限公司, 上海 200040]

摘要: 模拟滨海盐渍土离子组分,研究了不同浓度(3、5 和 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)混合盐胁迫条件下 3 个乔木树种台湾含笑 [*Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.]、‘中山杉 406’ (*Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’) 和女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.) 叶片相对电导率、丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶活性以及不同器官中 Na^+ 和 K^+ 的吸收与分布。结果表明:除 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组的女贞外,各处理组 3 个乔木树种全部存活。3 个乔木树种叶片的相对电导率和 MDA 含量均随着混合盐浓度的提高而增大。各处理组 3 个乔木树种叶片的相对电导率从高到低依次为台湾含笑、女贞、‘中山杉 406’,MDA 含量则基本上与之相反。随着混合盐浓度的提高,台湾含笑叶片中过氧化物酶(POD)活性显著升高,5 和 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组的过氧化氢酶(CAT)活性显著高于 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组及对照组($0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐),不同处理组间超氧化物歧化酶(SOD)活性差异不显著。 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组‘中山杉 406’叶片中 SOD 和 CAT 活性显著高于 3 和 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组及对照组;3、5 和 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组间的 POD 活性则差异不显著,但显著高于对照组。混合盐胁迫下女贞叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性均无显著变化。随着混合盐浓度的提高,3 个乔木树种根、茎和叶片中 Na^+ 含量总体上呈升高的趋势,3 个乔木树种不同器官中 K^+ 含量的变化趋势各异, K^+/Na^+ 比则总体上呈下降的趋势。各处理组‘中山杉 406’根、茎和叶片的 K^+/Na^+ 比总体上高于台湾含笑和女贞。综合而言,供试 3 个乔木树种中‘中山杉 406’的耐盐性最强,是沿海地区盐碱地改良以及造林绿化的优选树种。

关键词: 混合盐胁迫; 乔木树种; 耐盐性; 生理指标; 抗氧化酶活性; K^+/Na^+ 比

中图分类号: Q948.113; S728.603 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)04-0045-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.04.06

Effect of mixed salt stress on physiological indexes, and K^+ and Na^+ distribution of three arbor species GUO Jinbo¹, DU Lijuan^{1,2}, FAN Wencai¹, SHI Qin¹, YIN Yunlong¹, HUA Jianfeng^{1,①}
(1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Shanghai Shangshi Modern Agricultural Development Co., Ltd., Shanghai 200040, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(4): 45-53

Abstract: By simulating ion components of coastal saline soil, relative electric conductivity, malondialdehyde (MDA) content, and antioxidant enzyme activities in leaves, and absorption and distribution of Na^+ and K^+ in different organs of three arbor species of *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg., *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’, and *Ligustrum lucidum* Ait. under different concentrations (3, 5, and $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) of mixed salt stresses were investigated. The results show that three arbor species in each treatment group all survive except for *L. lucidum* treated with $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of mixed salt stress. Both relative electric conductivity and MDA content in leaves of three arbor species increase with enhancing of mixed salt stress concentration. Relative electric conductivity in leaves of three arbor

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)1004); 江苏省创新能力建设计划(科技实施类)(BM2015019); 江苏省自然科学基金青年基金项目(31700588)

作者简介: 郭金博(1989—),女,河南商水人,硕士研究生,主要研究方向为植物资源与生态环境。

①通信作者 E-mail: jfhua2009@gmail.com

species in each treatment group from high to low is *M. compressa*, *L. lucidum*, *T. hybrid* ‘Zhongshanshan 406’, while their MDA content is on the contrary basically. With enhancing of mixed salt concentration, peroxidase (POD) activity in leaves of *M. compressa* increases significantly, and its catalase (CAT) activity in 5 and 8 g · kg⁻¹ mixed salt stress treatment groups are significantly higher than that in 3 g · kg⁻¹ mixed salt stress treatment group and the control group (0 g · kg⁻¹ mixed salt), while there is no significant difference in superoxide dismutase (SOD) activity among different treatment groups. SOD and CAT activities in leaves of *T. hybrid* ‘Zhongshanshan 406’ in 8 g · kg⁻¹ mixed salt stress treatment group are significantly higher than those in 3 and 5 g · kg⁻¹ mixed salt stress treatment groups and the control group; while there is no significant difference in POD activity among 3, 5, and 8 g · kg⁻¹ mixed salt stress treatment groups, but their POD activity is higher than that in the control group. There is no significant change in SOD, POD, and CAT activities in leaves of *L. lucidum* under mixed salt stress. With enhancing of mixed salt stress concentration, Na⁺ content in roots, stems, and leaves of three arbor species shows an upward trend in general, K⁺ content in different organs of three arbor species shows different changing trends, and K⁺/Na⁺ ratio shows a downward trend in general. K⁺/Na⁺ ratio in roots, stems, and leaves of *T. hybrid* ‘Zhongshanshan 406’ in each treatment group is generally higher than that in *M. compressa* and *L. lucidum*. In general, *T. hybrid* ‘Zhongshanshan 406’ has the best salt tolerance among three arbor species tested, indicating that it is the optimal tree species for saline land improvement, and afforestation and greening in coastal areas.

Key words: mixed salt stress; arbor species; salt tolerance; physiological index; antioxidant enzyme activity; K⁺/Na⁺ ratio

土壤盐碱化是全世界面临的重要的生态和环境问题。中国盐碱土总面积约 3.6 × 10⁷ hm², 其中耕地盐碱化面积达 9.2 × 10⁶ hm², 占全国耕地总面积的 6.62%^[1]。当前, 国内土地资源日益紧缺, 盐碱地因被视为丰富的后备土地资源而受到广泛关注、治理和开发^[2-3]。以乔木为主的林业生态工程是国内盐碱地生态改良的重要措施, 如沿海防护林工程和基于林工程等^[4]。要充分发挥乔木在盐碱地林业生态工程中的作用, 首先要筛选出耐盐乔木树种, 然后研究乔木树种的耐盐机制, 进而提高乔木树种的耐盐能力。

中国盐碱地土壤中主要致害离子为 Na⁺、Cl⁻、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻, 这些离子可引发植物体内的渗透胁迫、氧化胁迫和离子毒害等次生伤害^[5]。盐胁迫下植物被迫吸收有毒害作用的盐离子, 产生超氧阴离子自由基(O₂⁻), 增加质膜的透性, 而超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的协同作用可将 O₂⁻ 催化成 H₂O, 从而使 O₂⁻ 维持在较低水平, 减轻质膜受到的伤害^[6-7]。植物的抗盐性与盐分的吸收、运输、分配、排泄、生物膜功能、离子区域化作用以及抗盐物质的合成和积累等过程密切相关^[8]。Shabala 等^[9]的研究结果表明: 盐胁迫下 K⁺ 主动积累, K⁺/Na⁺ 比升高有利于植物在逆境下调节气孔关闭, 减少水分散失, 同时有利于植物渗透势的保持, 而植物体内 K⁺/Na⁺ 比的降低, 会对植物产生毒害

作用, 耐盐植物体内的 K⁺/Na⁺ 比较为稳定; 魏永胜等^[10]认为, K⁺ 在细胞液中积累可以提高细胞液浓度、降低渗透势、保持膨压以及维持细胞正常代谢; 王树凤等^[11]的研究结果显示: 盐胁迫下弗吉尼亚栎(*Quercus virginiana* Mill.) 可将 Na⁺ 和 Cl⁻ 集中在根系, 有效减小地上部的离子毒害; 也有研究指出, 植物体内 K⁺ 呈区域化分布, 以调节不同细胞器、细胞及器官间水分的数量和移动方向^[12]。

国内外有关耐盐碱方面的研究较多只考虑了单一盐胁迫对植物的影响, 且研究对象集中于高粱 [*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench]、水稻 (*Oryza sativa* Linn.)、亚麻 (*Linum usitatissimum* Linn.)、盐角草 (*Salicornia europaea* Linn.)、狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.] 和紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.) 等农作物、草本和灌木^[13-18], 有关乔木耐盐碱方面的研究相对较少。邹丽梅^[19]和任丽昀等^[20]研究认为, 乔木层的物种丰富度指数和多样性指数均高于灌木层, 能形成更加稳定的生态系统。相对于低矮灌木和草本, 乔木的根系发达, 生物量较大, 景观效果丰富, 同时耐盐木本植物可长期累积盐离子。台湾含笑 [*Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.]、‘中山杉 406’ (*Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’) 和女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.) 的耐盐阈值及耐盐潜力较高, 在沿海地区盐碱地改良以及造林绿化过程中有较

显著优势^[21-22]。目前盐碱地区的绿化植物比较单一,耐盐性较强且兼具景观和生态价值的乔木在盐碱地区有着广阔的应用前景。

本研究模拟滨海土壤的盐分组成,对台湾含笑、‘中山杉 406’和女贞 3 种乔木树种进行混合盐胁迫,研究了叶片膜透性、抗氧化酶活性以及不同器官中 Na^+ 和 K^+ 的吸收和分布等,明确不同乔木树种对混合盐胁迫的响应,以期为提高乔木树种的耐盐能力和沿海地区绿化树种的选择提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试台湾含笑、‘中山杉 406’和女贞均为生长良好、长势一致的 2 年生幼苗,购自江苏省沭阳绿杨园艺花木场。栽培容器为底部直径 25 cm、上部直径 30 cm、高 40 cm 的圆形塑胶花盆。每盆装 5.0 kg 基质 [$V(\text{珍珠岩}):V(\text{泥炭土}):V(\text{黄泥土})=1:2:5$]。将实验幼苗装盆后先在温室外培养 2 个月,然后移入温室内,缓苗 2 周后进行混合盐胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 于 2011 年 6 月在江苏省中国科学院植物研究所温室(地理坐标为北纬 $32^{\circ}30'$ 、东经 $118^{\circ}49'$)内进行实验。根据中国科学院南京土壤研究所分析测定的滨海盐渍土离子组分(Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的含量分别为 0.252、0.313、0.012 和 0.002 mol·kg⁻¹,占土壤总离子含量的 95.38%),并参照文献[23]中混合盐溶液各盐分的组成和含量,采用 NaCl、Na₂SO₄ 和 NaHCO₃ 配置质量浓度 50 g·L⁻¹混合盐溶液。

在 2011 年 6 月中旬植株进入快速生长期后进行混合盐胁迫处理。结合平衡水分蒸发逐次加入混合盐溶液^[24],每次间隔 2 d,保证盐分尽可能均匀分布于基质中。共设置 0(CK)、3、5 和 8 g·kg⁻¹ 4 个混合盐处理组。3 g·kg⁻¹混合盐处理组 1 次加入混合盐溶液 300 mL;5 g·kg⁻¹混合盐处理组分 2 次加入混合盐溶液,依次加入 300 和 200 mL;8 g·kg⁻¹混合盐处理组分 3 次加入混合盐溶液,依次加入 300、200 和 300 mL;对照组仅浇灌自来水。各乔木树种供试幼苗随机分为 4 组,每处理组 7 株幼苗,即 7 次重复。为避免盆内盐分和水分流失,每个盆下放置托盘,混合盐胁迫期间定时定量浇水,定期清洗托盘内渗出的盐

分和基质,倒回原盆中。盐胁迫时间从混合盐溶液浇灌完毕后开始计算,共胁迫 45 d。其中,8 g·kg⁻¹混合盐处理组胁迫 14 d 时女贞的大部分植株叶片从顶梢开始发黄,胁迫 23 d 时植株叶片开始脱落,胁迫 28 d 时植株全部死亡。

1.2.2 指标测定方法 混合盐胁迫处理 45 d 时从各处理组选择 4 株代表性植株,单株取样,从不同方向取新梢中上部大小一致的功能叶 10 枚(每片约 0.1 g),置于冰壶中立即带回实验室,用液氮处理后置于-80℃冰箱保存,用于各项生理指标的测定。采用相对电导法^[25]⁸⁹测定叶片相对电导率;采用硫代巴比妥酸法^[25]²⁸⁰测定丙二醛(MDA)含量;采用 NBT 光化学还原法^[25]¹⁷²测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法^[25]¹⁶⁷测定过氧化物酶(POD)活性;采用分光速率法^[25]¹⁶⁹测定过氧化氢酶(CAT)活性。

各处理组随机选择 4 株代表性植株,将各单株进行编号,将其根、茎和叶片分开,洗净后分别烘干、粉碎,用浓 HNO₃ 和 HClO₄ 消化后,采用 ICP-AES 电感耦合等离子体发射光谱仪(北京华科天成科技有限公司)测定 Na^+ 和 K^+ 含量。同时,选用中国地质科学院地球物理地球化学勘探研究所提供的植物标准样品[GBW07603(GSV-2)]控制分析的准确性。

1.3 数据处理

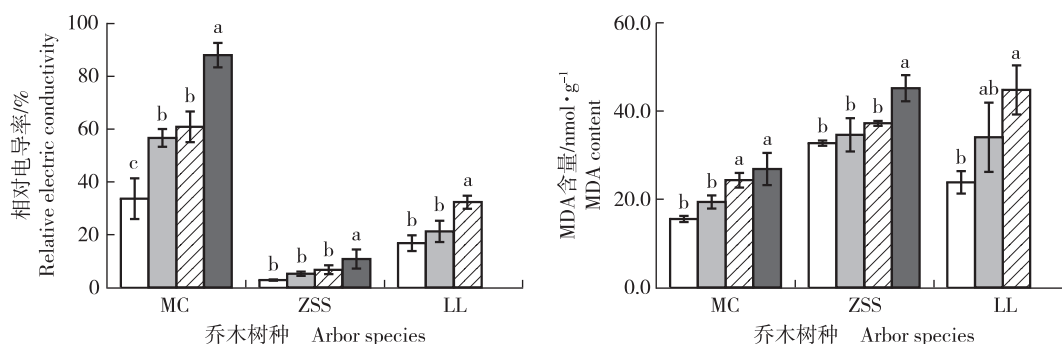
采用 EXCEL 2010 和 SPSS 16.0 统计分析软件对实验数据进行统计和方差分析,采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验($P<0.05$)。采用 Origin Pro 9.1 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 混合盐胁迫对 3 个乔木树种叶片膜系统的影响

不同浓度混合盐胁迫下 3 个乔木树种叶片相对电导率和丙二醛(MDA)含量见图 1。

2.1.1 对叶片相对电导率的影响 由图 1 可见:混合盐胁迫下,各处理组 3 个乔木树种叶片的相对电导率从高到低依次为台湾含笑、女贞、‘中山杉 406’。随着混合盐浓度的提高,3 个乔木树种叶片的相对电导率均呈逐渐升高的趋势。8 g·kg⁻¹混合盐处理组台湾含笑叶片的相对电导率显著高于 3 和 5 g·kg⁻¹混合盐处理组及对照组(0 g·kg⁻¹混合盐)($P<0.05$),而 3 和 5 g·kg⁻¹混合盐处理组的相对电导率显著高于对照组。8 g·kg⁻¹混合盐处理组‘中山杉 406’



□: $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 (CK) $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt (CK); ▨: $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt; ▩: $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt; ■: $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt. MC: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; ZSS: ‘中山杉 406’ *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’; LL: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait. 同一乔木树种不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases within the same arbor species indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$). $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐胁迫下女贞植株全部死亡 All plants of *Ligustrum lucidum* Ait. die under $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt stress.

图 1 不同浓度混合盐胁迫下 3 个乔木树种叶片相对电导率和丙二醛 (MDA) 含量的比较
Fig. 1 Comparison on relative electric conductivity and malondialdehyde (MDA) content in leaves of three arbor species under different concentrations of mixed salt stresses

叶片的相对电导率也显著高于其他处理组和对照组, 但 3 和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组以及对照组间的相对电导率差异不显著。5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组女贞叶片的相对电导率显著高于 3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组和对照组, 但后二者间的相对电导率差异不显著。说明随着混合盐浓度的提高, 供试 3 个乔木树种叶片的相对电导率均增加, 细胞膜损伤加重; 混合盐胁迫下 3 个乔木树种叶片的细胞膜稳定性从高到低依次为 ‘中山杉 406’、女贞、台湾含笑。

2.1.2 对叶片中 MDA 含量的影响 由图 1 还可见: 随着混合盐浓度的提高, 3 个乔木树种叶片中 MDA 含量均呈逐渐升高的趋势。5 和 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组台湾含笑叶片中 MDA 含量分别为 24.30 和 $26.85 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别为对照组的 1.57 和 1.73 倍, 显著高于对照组, 但 2 个处理组间差异不显著。 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组 ‘中山杉 406’ 叶片中 MDA 含量为 $45.17 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于其他处理组和对照组, 但 3 和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组以及对照组间的 MDA 含量差异不显著。5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组女贞叶片中 MDA 含量为 $44.78 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 为对照组的 1.88 倍, 且二者间存在显著差异。

2.2 混合盐胁迫对 3 个乔木树种叶片中抗氧化酶活性的影响

不同浓度混合盐胁迫下 3 个乔木树种叶片中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性的比较结果见表 1。

表 1 不同浓度混合盐胁迫下 3 个乔木树种叶片中抗氧化酶活性的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on activity of antioxidant enzyme activities in leaves of three arbor species under different concentrations of mixed salt stresses ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

混合盐浓度/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt concentration	不同抗氧化酶活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ Activity of different antioxidant enzymes		
	SOD	POD	CAT
台湾含笑 <i>Michelia compressa</i>			
0 (CK)	$56.45 \pm 2.99a$	$36.06 \pm 1.37d$	$65.90 \pm 27.67b$
3	$57.24 \pm 1.31a$	$54.00 \pm 4.45c$	$88.83 \pm 10.71b$
5	$62.87 \pm 11.95a$	$64.06 \pm 1.94b$	$143.10 \pm 27.38a$
8	$60.25 \pm 6.35a$	$73.00 \pm 4.78a$	$125.76 \pm 28.57a$
‘中山杉 406’ <i>Taxodium hybrid</i> ‘Zhongshanshan 406’			
0 (CK)	$69.72 \pm 7.09b$	$5.20 \pm 1.50b$	$74.03 \pm 5.80b$
3	$66.24 \pm 14.75b$	$15.63 \pm 1.72a$	$71.82 \pm 16.66b$
5	$68.24 \pm 5.65b$	$17.91 \pm 4.41a$	$79.28 \pm 10.59b$
8	$81.23 \pm 13.00a$	$22.94 \pm 7.75a$	$118.31 \pm 30.42a$
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>			
0 (CK)	$52.15 \pm 3.86a$	$59.78 \pm 1.85a$	$169.02 \pm 3.52a$
3	$58.45 \pm 5.28a$	$71.60 \pm 13.26a$	$175.20 \pm 28.06a$
5	$57.77 \pm 0.33a$	$78.38 \pm 17.54a$	$134.43 \pm 12.77a$
8	—	—	—

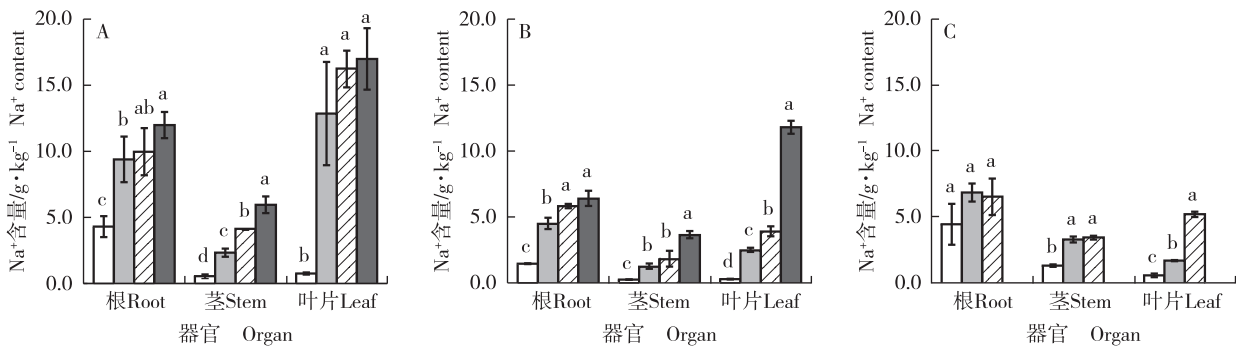
¹⁾ SOD: 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase. 同列中不同小写字母表示同一乔木树种在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference among different treatments within the same arbor species ($P < 0.05$). —: $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐胁迫下女贞植株全部死亡 All plants of *Ligustrum lucidum* Ait. die under $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt stress.

由表 1 可见: 除 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组 ‘中山杉 406’ 叶片中 SOD 活性较对照组 ($0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐) 显

著升高外,不同浓度混合盐处理组间3个乔木树种叶片中SOD活性均差异不显著。

随着混合盐浓度的提高,3个乔木树种叶片中POD活性逐渐升高,其中,台湾含笑叶片POD活性显著升高($P<0.05$),3、5和8 g·kg⁻¹混合盐处理组的POD活性分别为对照组的1.50、1.78和2.02倍;3、5和8 g·kg⁻¹混合盐处理组‘中山杉406’叶片中POD活性均显著高于对照组,但不同处理组间差异不显著;3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组以及对照组间女贞叶片中POD活性的差异不显著。

5和8 g·kg⁻¹混合盐处理组台湾含笑叶片中CAT活性显著高于3 g·kg⁻¹混合盐处理组和对照组;8 g·kg⁻¹混合盐处理组‘中山杉406’叶片中CAT活性显著高于3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组以及对照组;3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组以及对照组间女贞叶片中CAT活性的差异不显著。



□: 0 g·kg⁻¹混合盐(CK) 0 g·kg⁻¹ mixed salt (CK); ▨: 3 g·kg⁻¹混合盐 3 g·kg⁻¹ mixed salt; ▩: 5 g·kg⁻¹混合盐 5 g·kg⁻¹ mixed salt; ■: 8 g·kg⁻¹混合盐 8 g·kg⁻¹ mixed salt. 同一乔木树种同一器官不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$) Different lowercases within the same arbor species and the same organ indicate the significant difference among different treatments ($P<0.05$). 8 g·kg⁻¹混合盐胁迫下女贞植株全部死亡 All plants of *Ligustrum lucidum* Ait. die under 8 g·kg⁻¹ mixed salt stress.

A: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; B: ‘中山杉406’ *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’; C: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.

图2 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中Na⁺含量的比较

Fig. 2 Comparison on Na⁺ content in roots, stems, and leaves of three arbor species under different concentrations of mixed salt stresses

3、5和8 g·kg⁻¹混合盐处理组台湾含笑叶片中Na⁺含量均显著高于对照组,但3个处理组间差异不显著;‘中山杉406’和女贞叶片中Na⁺含量在不同浓度混合盐处理组间均差异显著。

2.3.2 对K⁺含量的影响 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中K⁺含量见图3。由图3可见:随着混合盐浓度的提高,台湾含笑和‘中山杉406’根中K⁺含量均逐渐降低,而女贞根中K⁺含量则逐渐升高。8 g·kg⁻¹混合盐处理组台湾含笑和‘中山

2.3 混合盐胁迫对3个乔木树种根、茎和叶片中K⁺和Na⁺含量的影响

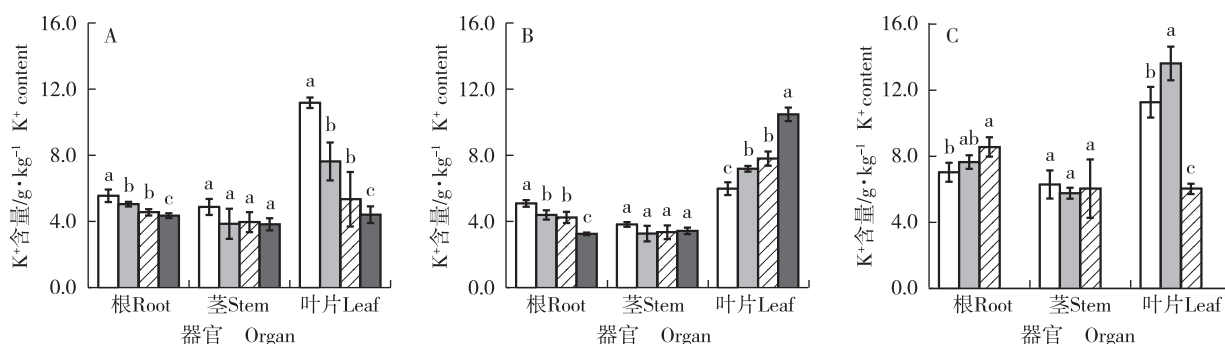
2.3.1 对Na⁺含量的影响 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中Na⁺含量见图2。由图2可见:随着混合盐浓度的提高,台湾含笑、‘中山杉406’和女贞根、茎和叶片中Na⁺含量总体上呈升高的趋势。

混合盐胁迫显著增加了台湾含笑和‘中山杉406’根中Na⁺含量($P<0.05$),而不同浓度混合盐处理组间女贞根中Na⁺含量无显著差异。

随着混合盐浓度的提高,台湾含笑茎中Na⁺含量显著升高。8 g·kg⁻¹混合盐处理组‘中山杉406’茎中Na⁺含量显著高于3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组和对照组(0 g·kg⁻¹混合盐),3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组间‘中山杉406’和女贞茎中Na⁺含量均差异不显著,但均显著高于对照组。

杉406’根中K⁺含量显著低于3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组和对照组;3和5 g·kg⁻¹混合盐处理组间台湾含笑和‘中山杉406’根中K⁺含量均差异不显著,但显著低于对照组。5 g·kg⁻¹混合盐处理组女贞根中K⁺含量显著高于对照组,但3 g·kg⁻¹混合盐处理组根中K⁺含量与5 g·kg⁻¹混合盐处理组和对照组间均差异不显著。

3个乔木树种茎中K⁺含量均在对照组中最高,但各处理组间均差异不显著。



□: $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 (CK) $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt (CK); ▨: $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt; ▩: $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt; ■: $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt. 同一乔木树种同一器官不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercases within the same arbor species and the same organ indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$). $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐胁迫下女贞植株全部死亡 All plants of *Ligustrum lucidum* Ait. die under $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt stress.

A: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; B: ‘中山杉 406’ *Taxodium* hybrid ‘Zhongshanshan 406’; C: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.

图3 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中 K^+ 含量的比较

Fig. 3 Comparison on K^+ content in roots, stems, and leaves of three arbor species under different concentrations of mixed salt stresses

随着混合盐浓度的提高,3个乔木树种叶片中 K^+ 含量的变化趋势存在差异,其中,台湾含笑叶片中 K^+ 含量逐渐降低,‘中山杉 406’叶片中 K^+ 含量逐渐升高,女贞叶片中 K^+ 含量则先升高后降低。对照组中台湾含笑叶片中 K^+ 含量显著高于3、5和 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组;3和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理间叶片中 K^+ 含量差异不显著,但显著高于 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组。‘中山杉 406’叶片中 K^+ 含量的变化趋势与台湾含笑相反, $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组中‘中山杉 406’叶片中 K^+ 含量显著高于3和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组以及对照组;3和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理间叶片中 K^+ 含量差异不显著,但显著高于对照组。 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组女贞叶片中 K^+ 含量最高,对照组叶片中 K^+ 含量次之, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组叶片中 K^+ 含量最低,且三者间存在显著差异。

2.3.3 对 K^+/Na^+ 比的影响 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中 K^+/Na^+ 比的比较见表2。由表2可见:随着混合盐浓度的提高,台湾含笑和‘中山杉 406’根、茎和叶片中 K^+/Na^+ 比均呈逐渐下降的趋势,且对照组这2个乔木树种各器官的 K^+/Na^+ 比均显著高于3、5和 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组。3、5和 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组间仅‘中山杉 406’根中 K^+/Na^+ 比差异显著,而台湾含笑根、茎和叶片以及‘中山杉 406’茎和叶片中 K^+/Na^+ 比均差异不显著。对照组以及3和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组间女贞根中 K^+/Na^+ 比差异不显著;对照组女贞茎中 K^+/Na^+

表2 不同浓度混合盐胁迫下3个乔木树种根、茎和叶片中 K^+/Na^+ 比的比较 ($\bar{X} \pm \text{SD}$)¹⁾

Table 2 Comparison on K^+/Na^+ ratio in roots, stems, and leaves of three arbor species under different concentrations of mixed salt stresses ($\bar{X} \pm \text{SD}$)¹⁾

混合盐浓度/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt concentration	不同器官的 K^+/Na^+ 比 K^+/Na^+ ratio in different organs		
	根 Root	茎 Stem	叶片 Leaf
台湾含笑 <i>Michelia compressa</i>			
0 (CK)	1.34±0.32a	9.85±1.53a	15.88±1.66a
3	0.55±0.10b	1.66±0.21b	0.65±0.29b
5	0.47±0.08b	0.97±0.15b	0.34±0.13b
8	0.36±0.03b	0.65±0.10b	0.26±0.07b
‘中山杉 406’ <i>Taxodium</i> hybrid ‘Zhongshanshan 406’			
0 (CK)	3.65±0.08a	20.78±2.02a	27.46±5.03a
3	0.99±0.13b	2.75±0.65b	2.95±0.18b
5	0.73±0.06c	2.10±1.00b	2.04±0.28b
8	0.51±0.05d	0.95±0.11b	0.89±0.07b
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>			
0 (CK)	1.71±0.52a	4.92±0.98a	21.25±4.17a
3	1.13±0.12a	1.76±0.07b	8.18±0.41b
5	1.34±0.19a	1.78±0.59b	1.16±0.08c
8	—	—	—

¹⁾ 同列中不同小写字母表示同一乔木树种在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercases in the same column indicate the significant difference among different treatments within the same arbor species ($P < 0.05$). —: $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐胁迫下女贞植株全部死亡 All plants of *Ligustrum lucidum* Ait. die under $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ mixed salt stress.

比显著高于3和 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组,但2个处理组间差异不显著;随着混合盐浓度的提高,女贞叶片中 K^+/Na^+ 比显著降低。

3 讨论和结论

3.1 混合盐胁迫对膜系统的影响

研究表明:盐胁迫可导致植物细胞膜透性增大,渗透物质外流,而抗盐性强树种的质膜系统稳定性好,不易被破坏^[26],因此,细胞膜透性是研究抗盐性的重要指标。本研究中,台湾含笑、‘中山杉 406’和女贞叶片相对电导率均随着混合盐浓度的提高而升高,且高浓度(8 g·kg⁻¹)混合盐胁迫下的叶片相对电导率显著高于低浓度(3 和 5 g·kg⁻¹)混合盐胁迫(P<0.05),说明随着混合盐浓度的提高,3 个乔木树种叶片的细胞膜透性增大,该结果与胡晓立等^[27]关于李属(*Prunus* Linn.)彩叶植物的研究结果一致。植物在盐胁迫环境下产生大量的 O₂⁻ 和 H₂O₂ 等活性氧(ROS),破坏生物膜,造成丙二醛(MDA)的累积。质膜透性可以直接反映质膜受伤程度,MDA 则间接表示质膜受损伤状况且兼有反馈作用,MDA 含量的高低可反映植物在逆境条件下的受伤害程度^[28]。本研究中,3 个乔木树种叶片的相对电导率和 MDA 含量均随混合盐浓度的提高而升高,表明混合盐胁迫对台湾含笑、‘中山杉 406’和女贞叶片质膜透性造成了损伤。台湾含笑在 3 和 5 g·kg⁻¹混合盐胁迫下以及女贞在 5 g·kg⁻¹混合盐胁迫下的叶片相对电导率显著升高,而‘中山杉 406’在混合盐浓度达到 8 g·kg⁻¹时叶片相对电导率才显著升高,且各处理组‘中山杉 406’叶片相对电导率均低于台湾含笑和女贞,说明供试 3 个乔木树种中‘中山杉 406’耐盐性最强,这可能是由于针叶树种特殊的叶片结构可以对质外体运输的物质起选择作用^[29]。

3.2 混合盐胁迫对抗氧化酶系统的影响

植物为了减轻和修复 ROS 引起的伤害,形成了一整套完整的抗氧化酶系统。耐盐性强的植物如海滨木槿(*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)和白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb.)等具有大量能降低 ROS 的抗氧化酶且能较快清除过氧化物^[30-32]。本研究中,3 和 5 g·kg⁻¹混合盐胁迫下,‘中山杉 406’叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性与对照组(0 g·kg⁻¹混合盐)相比基本维持在比较稳定的低水平,表明该浓度混合盐胁迫下‘中山杉 406’能有效抵御低浓度混合盐胁迫,其细胞膜功能尚未被破坏;高浓度混合盐胁迫下,

‘中山杉 406’叶片中 SOD 活性显著升高,表明此时‘中山杉 406’的抗氧化防御系统开始发挥作用,清除因混合盐胁迫积累的 ROS。台湾含笑叶片中 SOD 活性随混合盐浓度提高并没有显著变化,可能是因为 SOD 在清除 ROS 时被消耗而增加不明显。女贞叶片中 SOD 活性则随着混合盐浓度的提高而呈先升高后降低的趋势,这与不同混合盐胁迫下白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)SOD 活性的变化趋势^[33]相似,推测原因为盐胁迫初期植物通过 SOD 活性的升高适应渗透而产生调节性反应,SOD 作为清除 ROS 的第一层防御发挥作用,但持续盐胁迫下积累的 ROS 可能对女贞抗氧化防御系统造成损伤,致使其 SOD 活性降低,不能有效地保护膜系统^[34]。

过氧化物酶(POD)是植物体内重要的保护酶,当植物体内积累的 ROS 过多就会诱导 POD 活性增强^[35]。汪良驹等^[36]在无花果(*Ficus carica* Linn.)耐盐性方面的研究中得到相同的结果。本研究中,3 种乔木树种叶片的 POD 活性均随着混合盐浓度的提高而升高,说明其抗氧化系统紊乱,进一步加重了叶片质膜系统的伤害。各处理组‘中山杉 406’叶片中 POD 活性均低于台湾含笑和女贞,表明同一浓度混合盐胁迫下‘中山杉 406’植物体内 ROS 积累最少,氧化胁迫最轻。

与 POD 活性相比,供试 3 个乔木树种叶片中过氧化氢酶(CAT)活性变化差异较大。女贞叶片中 CAT 活性在混合盐浓度为 3 g·kg⁻¹时达到峰值,随后活性大大降低。台湾含笑叶片中 CAT 活性则在混合盐浓度为 5 g·kg⁻¹时达到峰值,而‘中山杉 406’叶片中 CAT 活性则在混合盐浓度为 8 g·kg⁻¹时最强,显著高于对照组。李国旗等^[37]对杨树(*Populus* spp.)的研究结果表明:耐盐能力较强的植物品种在盐胁迫下酶活性升高幅度大,峰值出现时间晚,且在较长时间内维持较高水平。‘中山杉 406’叶片中 SOD 和 CAT 活性峰值出现较晚,表明其耐盐能力较台湾含笑和女贞高。

3.3 混合盐胁迫对根、茎和叶片中 K⁺和 Na⁺含量的影响

在盐渍条件下,植物对 Na⁺和 Cl⁻的吸收是平衡的,Na⁺和 Cl⁻对植物的伤害作用相似,因此可以用 Na⁺含量来说明由 Na⁺和 Cl⁻共同造成的对植物的毒害作用。盐离子的区隔化是耐盐植物维持体内离子平衡的途径之一^[38]。本研究结果显示:随着混合盐

浓度的提高,供试 3 个乔木树种根、茎和叶片中 Na^+ 含量均升高,台湾含笑和‘中山杉 406’茎中 Na^+ 含量低于根和叶片,女贞植株中 Na^+ 主要积累在根部,茎和叶片中 Na^+ 含量较低,这与王树凤等^[11]的研究结果一致。植物体内 Na^+ 是没有活化的阳离子,过多的 Na^+ 导致抗氧化酶失活,从而对植物造成毒害。 Na^+ 在根部滞留,能够减轻其对地上部分代谢活动的干扰,同时有利于根部利用滞留的 Na^+ 进行渗透调节,降低水势,增强植物根部吸收水分的能力,从而减轻盐胁迫对植物根系造成的渗透胁迫^[39]。 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐处理组‘中山杉 406’叶片中 Na^+ 含量显著升高,可能是因为高浓度混合盐胁迫刺激‘中山杉 406’的 K^+/Na^+ 转运体更快地转运 K^+ 和 Na^+ 。

K^+ 是具有活化作用的一价阳离子,是保障植物正常代谢的关键离子。本研究中,随着混合盐浓度的提高,台湾含笑和‘中山杉 406’根中 K^+ 含量逐渐降低,女贞根中 K^+ 含量逐渐升高;3 个乔木树种茎中 K^+ 含量无显著变化;台湾含笑叶片中 K^+ 含量逐渐降低,女贞叶片中 K^+ 含量则先升高后降低,仅‘中山杉 406’叶片中 K^+ 含量逐渐升高,且在高浓度混合盐胁迫下仍然保持较高的 K^+ 含量。Blumwald^[40] 研究认为,在盐胁迫下耐盐植物的 K^+/Na^+ 转运体仍能保持较高活性,刺激 K^+ 和 Na^+ 交换,减轻植株在盐胁迫下受到的离子毒害。推测‘中山杉 406’符合这一特点,因此能更好的适应盐胁迫环境。

盐胁迫下,植物体内离子平衡受到破坏,降低了植物整体的营养水平^[41]。本研究中,混合盐胁迫造成台湾含笑和‘中山杉 406’根中 K^+ 含量降低、 Na^+ 含量升高,从而使根中 K^+/Na^+ 比随混合盐浓度提高而降低,说明当台湾含笑和‘中山杉 406’受到混合盐胁迫时,大量 Na^+ 进入植物体内,造成植物对 K^+ 的选择性吸收降低。总体上看,供试 3 个乔木树种地上部分(茎和叶片)的 K^+/Na^+ 比明显大于地下部分(根),说明根是与外界 Na^+ 直接接触的器官,最先受到外界 Na^+ 的胁迫,其对 K^+ 的选择性吸收被抑制造成大量的 Na^+ 积累,而地上部分则要经过体内的输导组织及胞间离子扩散吸收 Na^+ ,在时空间隔上受到 Na^+ 胁迫的影响晚于地下部分。莫海波等^[42] 认为,4 种豆科(Fabaceae)植物根、茎和叶中 K^+/Na^+ 比与植株相对于质量均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.475、0.581 和 0.532,而与盐害指数呈极显著负相关,相关系数分别为 0.451、0.449 和 0.549。由此推测,根系

对 Na^+ 的积累及地上部分对 K^+ 的选择性吸收是影响植物耐盐性的重要原因。‘中山杉 406’在高浓度混合盐胁迫下仍能保持较高的 K^+/Na^+ 比,因此,相比于台湾含笑和女贞,‘中山杉 406’的耐盐性更强。

3.4 结论

在混合盐胁迫下,‘中山杉 406’、台湾含笑和女贞的细胞膜稳定性和完整性均遭到一定程度的破坏,质膜失去离子选择性导致土壤盐离子大量进入。低浓度混合盐胁迫下,供试 3 个乔木树种通过抗氧化酶活性的增强来抵抗混合盐胁迫造成的氧化性损伤,从而使细胞膜结构能维持稳定性和功能性。 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 混合盐胁迫下,女贞植株死亡,台湾含笑叶片中 SOD 和 CAT 活性钝化,‘中山杉 406’叶片中 SOD 和 CAT 活性显著升高。供试 3 个乔木树种还通过将过量的 Na^+ 滞留在根部以提高或保持地上部分的 K^+/Na^+ 比,以维持正常的离子代谢,保护细胞不受盐离子的直接伤害。综合上述研究结果,‘中山杉 406’的耐盐性高于台湾含笑和女贞,是沿海地区盐碱地改良和造林绿化的优势树种。

参考文献:

- [1] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- [2] TIAN B, WU W, YANG Z, et al. Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010 [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 170: 83-90.
- [3] WANG W, LIU H, LI Y, et al. Development and management of land reclamation in China [J]. Ocean and Coastal Management, 2014, 102: 415-425.
- [4] 单奇华,张建锋,沈立铭,等. 林业生态工程措施对滨海盐碱地草本植物的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1411-1418.
- [5] 李彬,王志春,梁正伟,等. 苏打碱化土壤盐分离子与相关性分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 653-656.
- [6] 王慧英,孙建设,张建光. NaCl 胁迫对苹果砧木 K^+ 和 Na^+ 吸收的影响及其与耐盐性的关系[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(增刊): 104-107.
- [7] 郁万文,曹福亮,汪贵斌. 低温胁迫下银杏活性氧代谢与膜伤害的关系[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 46-48.
- [8] 王劲,杜世章,刘君蓉. 植物耐盐机制中的渗透调节[J]. 绵阳师范学院学报, 2006, 25(5): 56-61.
- [9] SHABALA S, POTTOSIN I I. Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implications for abiotic and biotic stress tolerance[J]. Physiologia Plantarum, 2014, 151: 257-279.
- [10] 魏永胜,梁宗锁,张福锁. 干旱胁迫及不同钾水平下烟草叶肉细胞中钾的再分布[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 447-451.

- [11] 王树凤,胡韵雪,李志兰,等.盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿物质离子吸收、运输和分配的影响[J].生态学报,2010,30(17):4609-4616.
- [12] 苏国兴.盐胁迫下桑树器官和组织K⁺、Na⁺分布特点研究[J].蚕业科学,2002,28(3):256-260.
- [13] SUI N, YANG Z, LIU M, et al. Identification and transcriptomic profiling of genes involved in increasing sugar content during salt stress in sweet sorghum leaves [J]. BMC Genomics, 2015, 16: 534.
- [14] ZENG D E, HOU P, XIAO F, et al. Overexpression of *Arabidopsis XERICO* gene confers enhanced drought and salt stress tolerance in rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2015, 24: 56-64.
- [15] 赵东升.亚麻耐盐碱品种筛选的研究[J].黑龙江农业科学,2011(7):12-13.
- [16] 马金彪,张大勇,张梅茹,等.盐角草高亲和钾离子转运蛋白*SeHKT1*基因的克隆及表达分析[J].生物技术通报,2015,31(11):159-165.
- [17] 王太亮,韩兆胜,庞妙甜,等.NaCl胁迫对狗牙根生理生化特性的影响[J].草原与草坪,2015,35(1):63-67.
- [18] 江远芳,王竞红,薛菲.3种碱性盐胁迫对紫穗槐形态和生理的影响[J].东北林业大学学报,2014,42(8):30-33,64.
- [19] 邹丽梅.中国森林生态系统植物多样性的空间变化格局[J].广西林业科学,2015,44(1):36-43.
- [20] 任丽响,袁志友,王洪义,等.中国北部半干旱区乔木、灌木和草本3种不同生活型植物的氮素回收特征[J].西北植物学报,2005,25(3):497-502.
- [21] 盛云飞.崇明农业园区滨海盐渍土上园林树木的生长适应性研究[D].南京:南京农业大学园艺学院,2004:22-25.
- [22] 王伟,高捍东,陆小青.盐胁迫对4个中山杉无性系幼苗生长和光合作用的影响[J].安徽农业科学,2010,38(14):7454-7457.
- [23] 杜丽娟,华建峰,周冬琴,等.混合盐胁迫对几种绿化常用灌木生长及相关生理指标的影响[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):197-202.
- [24] 谢小丁,邵秋玲,李扬.九种耐盐植物在滨海盐碱地的耐盐能力试验[J].湖北农业科学,2007,46(4):559-561.
- [25] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [26] 孟凡娟,王建中,黄凤兰,等.NaCl盐胁迫对两种刺槐叶肉细胞超微结构的影响[J].北京林业大学学报,2010,32(4):97-102.
- [27] 胡晓立,李彦慧,陈东亮,等.3种李属彩叶植物对NaCl胁迫的生理响应[J].西北植物学报,2010,30(2):370-376.
- [28] 郭艳茹,詹亚光.植物耐盐性生理生化指标的综合评价[J].黑龙江农业科学,2006(1):66-70.
- [29] 王会方,何梅,於朝广,等.优良速生树种中山杉的国内外研究现状[J].南方林业科学,2015,43(3):17-21.
- [30] 杨华,杜国坚,汪奎宏.胁迫环境下海滨木槿生理特性的研究[J].浙江林业科技,2008,28(3):43-47.
- [31] 孙方行,李国雷,夏阳,等.刺槐对盐分胁迫的生理生化反应[J].山东林业科技,2004(1):5-7.
- [32] 刘翠兰,吴德军,王开芳,等.NaCl胁迫下白蜡杂交苗的生长与生理响应[J].中国农学通报,2016,32(28):16-21.
- [33] 闫永庆,刘兴亮,王崑,等.白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响应[J].植物生态学报,2010,34(10):1213-1219.
- [34] GAO X, REN Z, ZHAO Y, et al. Overexpression of *SOD2* increases salt tolerance of *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2003, 133: 1873-1881.
- [35] 尹永强,胡建斌,邓明军.植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J].中国农学通报,2007,23(1):105-110.
- [36] 汪良驹,刘友良,马凯,等.无花果细胞系耐盐性与抗氧化酶活性的变化[J].园艺学报,1999,26(6):351-355.
- [37] 李国旗,安树青,张纪林,等.盐胁迫对杨树形成层过氧化物酶活性及其效应的影响[J].应用生态学报,2003,14(6):871-874.
- [38] 杨少辉,季静,王罡.盐胁迫对植物的影响及植物的抗盐机理[J].世界科技研究与发展,2006,28(4):70-76.
- [39] 汪月霞,索标,赵会杰,等.Na₂CO₃胁迫对芦荟幼苗叶片叶绿体保护酶和渗透调节物质的影响[J].西北植物学报,2010,30(11):2184-2190.
- [40] BLUMWALD E. Sodium transport and salt tolerance in plants[J]. Current Opinion in Cell Biology, 2000, 12: 431-434.
- [41] COLLA G, ROUPHAEL Y, MASSA D, et al. Yield, fruit quality and mineral composition of grafted melon plants grown under saline conditions[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2006, 81: 146-152.
- [42] 莫海波,殷云龙,芦治国,等.NaCl胁迫对4种豆科树种幼苗生长和K⁺、Na⁺含量的影响[J].应用生态学报,2011,22(5):1155-1161.

(责任编辑:张明霞)