

NaCl胁迫对大黄龙船花生长及生理生化的影响

陆銮眉¹, 吴福妹¹, 张琼¹, 林金水², 卞阿娜¹

(1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建 漳州 363000; 2. 福建省热带作物科学研究所, 福建 漳州 363001)

摘要: 为探讨大黄龙船花(*Ixora collinea* ‘Gillettese How’)的耐盐特性,对 NaCl 胁迫下大黄龙船花扦插幼苗的生长和生理生化指标进行了研究。结果表明, NaCl 胁迫处理后大黄龙船花叶片中的丙二醛含量、相对电导率和脯氨酸含量升高,膜伤害程度加大。叶片相对电导率、丙二醛含量和脯氨酸含量与 NaCl 浓度间存在显著正相关关系。随着盐胁迫浓度的增加,叶片总叶绿素、可溶性蛋白质含量呈下降趋势,两者与 NaCl 浓度间呈显著负相关关系。可溶性糖含量、SOD 活性与 NaCl 浓度间的相关性不显著。较低浓度的盐胁迫(0.2%~0.6%)对大黄龙船花的生长有轻微的抑制作用,而 0.8%~1.5% 的高浓度盐胁迫显著影响生理生化指标。

关键词: 大黄龙船花; NaCl; 生长; 生理指标

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.03.005

Growth and Physiological Indexes of *Ixora collinea* ‘Gillettese How’ under NaCl Stress

LU Luan-mei¹, WU Fu-mei¹, ZHANG Qiong¹, LIN Jin-shui², BIAN A-na¹

(1. School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China; 2. Fujian Institute of Tropical Crops, Zhangzhou 363001, China)

Abstract: The aim was to analyze the salt resistance of *Ixora collinea* ‘Gillettese How’. The growth and physiology indexes in ‘Gillettese How’ seedlings were studied under NaCl stress. The results showed that the seedling growth was inhibited significantly under salt stress. The MDA and proline contents, relative electric conductivity and membrane damage increased, and they had significant positive correlations with NaCl concentration. The contents of chlorophyll and soluble protein in leaf decreased and negative correlation with NaCl concentration. However, there were no significant correlation between soluble sugar content, superoxide dismutase (SOD) activity and NaCl concentration. The growth of ‘Gillettese How’ was inhibited weakly under low NaCl stress (0.2%–0.6%), but it was affected greatly under high NaCl (0.8%–1.5%) stress.

Key words: *Ixora collinea* ‘Gillettese How’; NaCl; Growth; Physiological indicator

我国滨海地带和岛屿沿岸约有 18000 km, 该区域分布的盐渍土主要是因海水造成, 土壤盐渍化是造成资源破坏、农业生产巨大损失、对生物圈和生态环境构成威胁的全球性问题^[1]。福建省沿海面积广阔, 风暴潮、海浪以及养殖等造成海水入侵严重, 是盐渍化影响严重的地区之一。在盐渍地区,

园林植物生长缓慢, 种类较少, 资源贫乏, 严重影响生态环境以及可持续发展。

大黄龙船花(*Ixora collinea* ‘Gillettese How’)为茜草科(Rubiaceae)龙船花属植物, 其株形美观, 开花密集, 高低错落, 花期长, 景观效果极佳, 适合做盆栽和切花, 也适宜在园林中应用, 随着市场的开

收稿日期: 2014-07-01 接受日期: 2014-10-14

基金项目: 福建省科技重点项目(2012N0032); 闽南师范大学园林植物生长发育与生态配置创新团队项目(2013)资助

作者简介: 陆銮眉(1968~), 女, 教授, 研究方向为园林植物与观赏园艺、植物生理生态学。E-mail: luanmeilu@163.com

发,大黄龙船花优良的观赏特性和切花品质逐渐被人们认识,市场需求空间逐步加大^[2]。大黄龙船花是福建园林和风景区造景绿化的重要材料,但是沿海的盐渍化土壤对其生长发育及观赏价值有影响,是推广应用的限制因子。因此,研究大黄龙船花的耐盐生理特性和耐盐能力,筛选培育适宜在盐碱地区生长的品种,对增加滨海树种多样性、改善盐碱地生态系统、加快园林植物开发与利用具有现实而深远的意义。

近年来对园林植物耐盐胁迫生理的研究报道较多。李景等^[3]研究了盐胁迫和洗盐处理对贴梗海棠(*Chaenomeles speciosa*)生理特性的影响;窦全琴等^[4]研究了土壤 NaCl 含量对榉树(*Zelkova schneideriana*)幼苗生理特性的影响;张华新等^[5]进行了盐胁迫下树种幼苗生长及其耐盐性的研究。目前对大黄龙船花仅在品种介绍、分类、分子育种、遗传多样性、光合特性、花的发育、肥料管理、栽培和保鲜技术等方面有研究报道^[6-18],但有关大黄龙船花抗盐特性方面的研究尚未见报道。本文以大黄龙船花作为试材,研究其在 NaCl 胁迫下生长及生理生化变化,探讨大黄龙船花在盐渍土地及海边推广的可行性,并为耐盐机制的研究及耐盐龙船花的育种工作提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于 2013 年 8 月 10 日在闽南师范大学生物系植物园塑料大棚中进行,选取长势一致、生长良好的一年生大黄龙船花(*Ixora collinea* 'Gillette How')扦插苗为材料。营养钵的规格为 18 cm × 15 cm),每盆 3 株,盆内平均装 1.47 kg 基质(干重,体积分数为园土:泥炭=1:1),盆栽苗常规管理至 8 月 30 日。

1.2 方法

大黄龙船花盆苗分别用 0 (对照)、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.5% 的 NaCl 溶液处理。实验开始前 2 d 进行控水使各盆的土壤含水量相近,然后用 500 mL 的不同浓度 NaCl 溶液浇入营养钵,对照只浇等体积水,盆下设有托盘,及时将托盘中渗漏的水返回到盆中以防止盆中盐分的流失。以后每 6 d 处理 1 次,每处理 6 次重复。

在处理的前 1 d 和处理 30 d 分别测量株高,并统计死亡株数。苗高增量=处理结束的苗高-处理前的苗高。死亡率(%)=死亡株数/总株数 × 100%。

处理 30 d 时从植株上采集成熟功能叶,立即带回实验室进行生理指标的测定^[19]。叶绿素含量采用分光光度法;超氧化物歧化酶(SOD)活性按照氮蓝四唑法测定;蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法;可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法;脯氨酸含量采用茚三酮法测定;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法;叶片膜透性的测定用相对电导法。

1.3 数据分析

用 SPSS 13.0 统计软件包(美国)对实验数据进行单因素方差分析,采用最小显著差法(LSD)进行多重比较。用 Sigma Plot 10.0 科学绘图软件包(美国)制图。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对生理指标的影响

生长的影响 植物生长情况是对胁迫反应的最直观表现。高浓度的 NaCl 处理对大黄龙船花的生长起到了明显的抑制作用(表 1),平均苗高增量随着 NaCl 浓度的增高呈逐渐下降的趋势,0.6%~1.5% NaCl 处理的苗高增量与对照的差异极显著。随着 NaCl 浓度的升高,大黄龙船花的死亡率大致呈上升趋势,1.0%~1.5% NaCl 处理的大黄龙船花死亡率、脱叶、黄叶情况最为严重(表 1)。

叶绿素含量 随着 NaCl 浓度的增加,大黄龙船花的叶绿素含量呈下降趋势(表 1),0.2%~0.8% NaCl 处理的叶绿素含量与对照差异不显著,但 1.0% 和 1.5% NaCl 处理的叶绿素含量与对照差异显著。

细胞膜相对透性 由图 1 可知,随着 NaCl 处理浓度的增加,大黄龙船花叶片的相对电导率呈上升的趋势,0.4%~1.5% NaCl 处理的相对电导率与对照差异显著。

丙二醛含量 随着 NaCl 处理浓度的增加,大黄龙船花叶片的 MDA 含量呈递增趋势,0.4%~1.5% NaCl 处理的 MDA 含量与对照的差异显著,而 0.2%~0.6% NaCl 处理与对照差异不显著(图 2)。

可溶性糖、脯氨酸含量 随着 NaCl 处理浓

表 1 NaCl 胁迫对大黄龙船花生长的影响

Table 1 Influence of NaCl stress on *Ixora collinea* 'Gillette How' growth

NaCl (%)	苗高增量 Height increment (cm)	死亡率 Morality (%)	叶绿素含量 Chlorophyll content (mg g ⁻¹)
对照 Control	2.33±0.16a	0	1.74±0.082a
0.2	1.66±0.44b	0	1.67±0.010ab
0.4	1.33±0.16bc	1.76	1.65±0.187abc
0.6	0.83±0.16cd	7.78	1.40±0.016abc
0.8	0.93±0.06cd	23.67	1.38±0.137abc
1.0	0.83±0.16cd	38.33	1.36±0.124bc
1.5	0.33±0.88d	47.14	1.28±0.111c

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。以下图表同。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Tables and Figures.

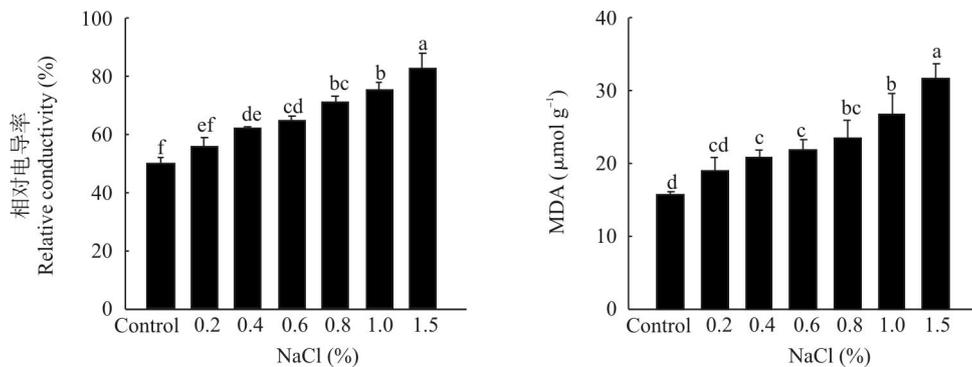


图 1 NaCl 胁迫对大黄龙船花叶片相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig. 1 Relative electric conductivity and MDA content of 'Gillette How' leaves under NaCl stress

表 2 NaCl 胁迫对大黄龙船花可溶性糖、蛋白质、脯氨酸含量及 SOD 活性的影响

Table 2 Soluble sugar, protein, proline contents and SOD activity of 'Gillette How' under NaCl stress

NaCl (%)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (mg g ⁻¹)	脯氨酸含量 Proline content (μg g ⁻¹)	蛋白质含量 Protein content (mg g ⁻¹)	SOD 活性 SOD activity (U g ⁻¹)
对照 Control	8.13±1.05a	0.2±0.02d	11.62±0.67a	251.95±7.29ab
0.2	4.93±0.44bc	0.22±0.04d	8.93±2.41ab	265.98±19.27ab
0.4	4.70±0.53bc	0.24±0.04d	7.63±0.62abc	313.36±29.30a
0.6	4.25±0.44c	0.26±0.04cd	7.26±0.21abc	261.32±34.93ab
0.8	4.39±0.29c	0.33±0.04bc	3.43±0.33bc	223.95±37.69b
1.0	4.87±0.31bc	0.40±0.03ab	3.42±0.67bc	247.09±4.06ab
1.5	5.74±0.49b	0.47±0.03a	2.34±0.60c	304.95±35.58a

度的增加,大黄龙船花叶片可溶性糖和脯氨酸含量均呈上升趋势,NaCl 胁迫处理的脯氨酸含量与对照的差异显著,且 0.2%~0.6% NaCl 处理间的脯氨酸含量差异不显著(表 2)。

蛋白质含量 从表 2 可见,随着 NaCl 浓度的递增,大黄龙船花叶片中蛋白质含量逐渐下降,0.2% NaCl 处理的蛋白质含量与对照的差异不显著,但其它处理的与对照的差异显著。

SOD 活性 随着 NaCl 浓度的增大,大黄龙船花叶片 SOD 活性呈升高-降低-升高的变化趋势,0.2%、0.6%、0.8%、1.0% NaCl 处理的 SOD 活性与对照的差异不显著,但 0.4%、1.5% NaCl 处理的与对照的差异显著(表 2)。

2.2 相关分析

对大黄龙船花部分生理指标与 NaCl 浓度进

行相关分析,结果表明,大黄龙船花叶片的相对电导率、MDA含量、脯氨酸含量与NaCl浓度间存在显著正相关,相关系数分别为0.991、0.993和0.978,说明随着叶片细胞膜受胁迫伤害程度的加深,大黄龙船花可通过增加渗透势等生理过程来减轻NaCl胁迫对细胞产生的伤害;叶绿素总含量、株高增量、蛋白质含量随着NaCl浓度的增加而下降,与处理的NaCl浓度呈显著负相关,相关系数分别为-0.923、-0.927和-0.940;而可溶性糖含量、SOD活性与NaCl浓度不相关,相关系数分别为-0.375和0.296。

3 结论和讨论

3.1 NaCl胁迫下大黄龙船花的生长

在盐胁迫下,植株的形态表现和生长状况是其耐盐碱能力的最直观表现,高盐度对植物的毒害可以从植物生长量减少和死亡率的升高得到验证^[20]。本研究结果表明,随着NaCl浓度的增加,大黄龙船花生长速度逐渐下降,尤其在高浓度NaCl处理下,植株表现出明显的盐害症状,如叶片失绿黄化,焦枯脱落,甚至出现死亡的情况。1.5% NaCl处理的大黄龙船花死亡率高达67.14%,表明高浓度的NaCl胁迫严重影响了大黄龙船花的正常生长,这与张华新等^[5]的研究结果一致。NaCl处理的植株均出现不同程度的脱叶现象,NaCl的浓度越高越严重,这是大黄龙船花应答盐胁迫的一个早期反应。

叶绿素含量会直接影响植物的光合效率,盐胁迫往往导致叶绿素合成酶破坏,激活叶绿素降解酶活性,最终造成叶绿素含量下降^[21-22]。叶片叶绿素含量对盐胁迫的响应与材料和胁迫条件有关,但许多植物在盐胁迫下表现出叶绿素含量随着盐浓度的增加先升再降。本研究中大黄龙船花叶绿素含量对盐胁迫的响应与此不同,随着NaCl浓度的增加,大黄龙船花的叶绿素含量呈下降趋势,表明大黄龙船花对盐胁迫较为敏感。

3.2 NaCl胁迫下细胞膜稳定性的变化

逆境条件下,植物叶片的细胞膜相对透性通常用叶片的相对电导率表示^[23]。植物细胞膜对维持细胞的微环境和正常的代谢起着重要作用。在正常情况下,细胞膜对物质具有选择透性能力。当植物受到逆境影响时,细胞膜遭到破坏,膜透性增大,

从而使细胞内的电解质外渗,以至于植物细胞浸提液的电导率增大^[19]。本研究中大黄龙船花叶片的细胞膜透性随着NaCl胁迫的增强而增大,且高浓度NaCl处理的膜透性显著高于低浓度的,表明NaCl胁迫导致大黄龙船花电导率相对增大,细胞内的电解质外渗。

盐胁迫引起植物细胞离子失衡和渗透胁迫往往导致氧化伤害,其中膜脂的过氧化作用是最直接的氧化伤害,MDA被认为是膜脂过氧化的产物,其含量与细胞膜系统的伤害程度密切相关^[24]。本研究结果表明,大黄龙船花叶片MDA含量随NaCl浓度的增高呈递增趋势,表明大黄龙船花的细胞膜在NaCl胁迫下受到一定影响。这与Davenport等^[25]的结论相似。

大量研究认为植物能够通过一系列防御机制可降低盐胁迫中活性氧含量,缓解氧化伤害,这些防御机制中就包括抗氧化酶活性的提高^[26]。SOD是植物体内清除活性氧的关键酶,是清除活性氧的第一条防线,能够将O₂⁻歧化为H₂O₂和分子氧,其活性水平的高低往往代表植物抗盐胁迫的能力^[27]。韩立敏等^[28]的研究表明菘蓝(*Isatis indigotica*)铁型超氧化物歧化酶基因受盐胁迫诱导,且随盐胁迫的加强其表达量和SOD活性先迅速升高后下降。本研究中,大黄龙船花叶片的SOD活性也随NaCl浓度增大先升高而后下降,推测也是由于低浓度盐胁迫下SOD活性升高是植株对盐胁迫的一种适应性表现,而高浓度的胁迫则超过植物自身忍耐程度,导致SOD活性下降,不能有效清除氧,但在1.5% NaCl处理下SOD活性反而又升高,这可能是由于植物体内其他缓解机制影响了SOD的合成和活性,亦或由于不同类型SOD对盐胁迫不同的响应造成。大黄龙船花叶片SOD活性随着NaCl浓度的增大呈升高-降低-升高的变化趋势,其生理响应机制还需进行更多研究。

3.3 NaCl胁迫下有机渗透调节物质含量变化

逆境下植物积累脯氨酸和可溶性糖具有普遍性,脯氨酸可以提高植物的抗逆性,作为渗透调节剂降低细胞的水势,维持细胞质的水分状况^[29]。大量研究表明,逆境条件下植物可通过体内的渗透调节作用来减轻伤害,脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质等均是植物体内重要的有机渗透调节物质^[30-31]。本研究中,大黄龙船花的脯氨酸含量在盐胁迫下呈

上升趋势,与 NaCl 浓度呈正相关,且低浓度盐胁迫下大黄龙船花叶片的脯氨酸上升趋势不明显,高浓度盐胁迫下上升趋势更显著,推测大黄龙船花在高盐胁迫下通过产生大量脯氨酸来提高其耐盐性,这与许多研究结果相似^[32-33]。逆境胁迫下植物体内脯氨酸的累积经常被作为植物提高耐逆性的基础对策,脯氨酸不但可作为渗透调节物质,蛋白组学、基因组学和代谢组学研究还揭示脯氨酸能够作为自由基清除剂、金属螯合物、活性氧活化的解毒途径、细胞氧化还原的平衡者、能量源、氮源、碳源、亚细胞结构和膜结构的平衡者,而且还能够作为信号分子影响植物生化过程,能够诱导胁迫反应基因的表达,包括编码清除活性氧的酶^[34-35]。本研究结果表明,脯氨酸的累积是大黄龙船花提高耐盐的重要途径,高浓度盐胁迫下大黄龙船花叶片 SOD 活性上升或许与脯氨酸的大量产生有关,这还需要进一步研究。有研究表明外源脯氨酸能够通过降低植物细胞内 ROS 的累积和膜脂过氧化,维持膜的完整性来保护盐胁迫诱导的细胞死亡^[36-37],外源脯氨酸是否也能够通过提高大黄龙船花抗氧化能力从而提高其抗盐性,亦需进一步研究。

通过对大黄龙船花的生长指标、细胞膜稳定性和有机渗透调节物质进行分析,表明在 0.2%~0.6% 的较低 NaCl 浓度下大黄龙船花的各生理指标受到的影响相对不大,但 NaCl 浓度为 0.8%~1.5% 时,大黄龙船花的生长及生理生化受到显著影响。这说明大黄龙船花在低浓度的 NaCl 胁迫下能继续生长但生长受到一定抑制。

参考文献

- [1] Xu H G. Halophyte and Ecological Management of Salinization in China [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2004: 11-12.
徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 11-12.
- [2] Tang Y G. The new varieties and cultivation techniques of *Ixora* [J]. Guangxi For Sci, 2002, 31(2): 100-101.
唐玉贵. 龙船花新品种及其栽培技术 [J]. 广西林业科学, 2002, 31(2): 100-101.
- [3] Li J, Liu Q L, Tang D Q, et al. Effects of salt stress and salt leaching on the physiological characteristics of *Chaenomeles speciosa* [J]. J Beijing For Univ, 2011, 33(6): 40-46.
李景, 刘群录, 唐东芹, 等. 盐胁迫和洗盐处理对贴梗海棠生理特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 40-46.
- [4] Dou Q Q, Jiao X J, Zhang M, et al. Physiological response of *Zelkova schneideriana* seedlings in the soil under NaCl stress [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2009, 29(10): 2063-2069.
窦全琴, 焦秀洁, 张敏, 等. 土壤 NaCl 含量对榉树幼苗生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(10): 2063-2069.
- [5] Zhang H X, Liu Z X, Liu Q F. Seedling growth and salt tolerance of tree species under NaCl stress [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(5): 2263-2271.
张华新, 刘正祥, 刘秋芳. 盐胁迫下树种幼苗生长及其耐盐性 [J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2263-2271.
- [6] Lin J S. Effects of plant regulator on rooting of cutting *Ixora chinensis* [J]. Chin Agri Sci Bull, 2009, 25(5): 132-137.
林金水. 植物生长调节剂对中国龙船花扦插生根的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(5): 132-137.
- [7] Mouly A, Razafimandimbison S G, Khodabandeh A, et al. Phylogeny and classification of the species-rich pantropical showy genus *Ixora* (Rubiaceae-Ixoreae) with indications of geographical monophyletic units and hybrids [J]. Amer J Bot, 2009, 96(3): 686-706.
- [8] Broschat T K. Effectiveness of various iron sources for correcting iron chlorosis in dwarf *Ixora* [J]. HortTechnology, 2003, 13(4): 625-627.
- [9] Broschat T K. Potassium and phosphorus deficiency symptoms of *Ixora* [J]. HortTechnology, 2000, 10(2): 314-317.
- [10] Broschat T K, Klock-Moore K A. Root and shoot growth responses to phosphate fertilization in container-grown plants [J]. HortTechnology, 2000, 10(4): 765-767.
- [11] Rajaseger G, Tan H T W, Turner I M, et al. Analysis of genetic diversity among *Ixora* cultivars (Rubiaceae) using random amplified polymorphic DNA [J]. Ann Bot, 1997, 80(3): 355-361.
- [12] Chen L Y, Chu C Y, Huang M C. Inflorescence and flower development in Chinese *Ixora* [J]. J Amer Soc Hort Sci, 2003, 128(1): 23-28.
- [13] Rajaseger G, Tan H T W, Turner I M, et al. Random amplified polymorphic DNA variation among and within selected *Ixora* (Rubiaceae) populations and mutants [J]. Ann Bot, 1999, 84(2): 253-257.
- [14] Zhang X B, Xia C H, Huang B L, et al. Effects of salicylic acid on the cold resistance of *Ixora chinensis* [J]. Chin J Trop Crops, 2004, 25(3): 85-88.
张玄兵, 夏春华, 黄碧兰, 等. 水杨酸对龙船花抗低温胁迫的影响 [J]. 热带作物学报, 2004, 25(3): 85-88.
- [15] Lu L M, Lin J S, Xie Z M. Effects of different preservative solution on cut flowers of *Ixora chinensis* [J]. Acta Hort Sin, 2010, 37(8): 1351-1356.
陆鑫眉, 林金水, 谢志明. 不同保鲜液对龙船花切花的保鲜效果 [J]. 园艺学报, 2010, 37(8): 1351-1356.
- [16] Lin J S, Lu L M, Zhang Y L. Study on florescence control of *Ixora chinensis* [J]. Chin Agri Sci Bull, 2010, 26(18): 245-249.
林金水, 陆鑫眉, 张亚兰. 龙船花花期调控技术研究 [J]. 中国

- 农学通报, 2010, 26(18): 245–249.
- [17] Lu L M, Lin J S, Zhang Y L, et al. Photosynthetic characteristics 6 varieties of *Ixora* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2010, 30(10): 1736–1741.
陆鑫眉, 林金水, 张亚兰, 等. 6种龙船花的光合特性研究 [J]. *热带作物学报*, 2010, 30(10): 1736–1741.
- [18] Lu L M, Lin J S, Lai Z X. Preservatives for prolonging the vase life of *Ixora chinensis* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2010, 30(12): 2198–2202.
陆鑫眉, 林金水, 赖钟雄. 龙船花切花瓶插保鲜液配方研究 [J]. *热带作物学报*, 2010, 30(12): 2198–2202.
- [19] Wang X K. *Plant Physiological and Biochemical Experiment Principle and Technology* [M]. Second ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 134–282.
王学奎. *植物生理生化实验原理和技术* [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 134–282.
- [20] Liao Y, Peng Y G, Chen G Z. Research advance in plant salt-tolerance mechanism [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(5): 2077–2089.
- [21] Mihailović N, Lazarević C 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 Sci*, 1997, 129(2): 141–146.
- [22] Rouhi V, Samson R, Lemeur R, et al. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery [J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 59(2): 117–129.
- [23] Guo Y C, Sun C Y, Wan W C, et al. Effects of NaCl stress on seed germination and plants growth of *Hibiscus moscheutos* [J]. *Acta Agri Boreali-Occid Sin*, 2012, 21(3): 158–163.
郭艳超, 孙昌禹, 王文成, 等. NaCl胁迫对芙蓉葵种子萌发和种苗生长的影响 [J]. *西北农业学报*, 2012, 21(3): 158–163.
- [24] Jianaer • Ahan, Yang C W, Shi D C, et al. Physiological response of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversianato* salt and alkali stresses [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2007, 27(1): 79–84.
贾娜尔•阿汗, 杨春武, 石德成, 等. 盐生植物碱地肤对盐碱胁迫的生理响应特点 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(1): 79–84.
- [25] Davenport S B, Gallego S 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 Regul*, 2003, 40(1): 81–88.
- [26] Patade V Y, Lokhande V H, Suprasanna P. Exogenous application of proline alleviates salt induced oxidative stress more efficiently than glycine betaine in sugarcane cultured cells [J]. *Sugar Techn*, 2014, 16(1): 22–29.
- [27] Du C, Liao M S, Zhang X, et al. Regulation of copper-zinc superoxide dismutase gene expression by miR398 in *Karelinia caspica* under salt stress [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(4): 682–688.
杜驰, 廖茂森, 张霞, 等. 盐胁迫下花花柴miR398对Cu/Zn超氧化物歧化酶基因的调控研究 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(4): 682–688.
- [28] Han L M, Hua W P, Wang Z Z. Clone and stress expression analysis of iron superoxide dismutase from *Isatis indigotica* [J]. *Guihaia*, 2013, 33(5): 663–668.
韩立敏, 化文平, 王喆之. 菘蓝铁型超氧化物歧化酶基因*ItFeSOD*的克隆与胁迫表达分析 [J]. *广西植物*, 2013, 33(5): 663–668.
- [29] Xiao W, Jia H X, Pu L M. Studies on physiological index of some halophytes [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2000, 20(5): 818–825.
肖雯, 贾恢先, 蒲陆梅. 几种盐生植物抗盐生理指标的研究 [J]. *西北植物学报*, 2000, 20(5): 818–825.
- [30] Liu Y L, Wan F X, Lou X R. Effects of salt stress on physiological and biochemical index of ten provenances of *Cupressus lusitanica* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2013, 37(4): 29–33.
刘奕琳, 万福绪, 娄晓瑞. 盐胁迫对10个墨西哥柏种源幼苗生理生化的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(4): 29–33.
- [31] Zhang S N, Ma X J, Li K W, et al. Osmotic regulation in two *Limonium* Mill. callus under NaCl stress [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2008, 28(7): 1343–1348.
张赛娜, 马旭君, 李科文, 等. 补血草愈伤组织中渗透调节物对NaCl胁迫的响应 [J]. *西北植物学报*, 2008, 28(7): 1343–1348.
- [32] Zhang B, Li P F, Bai H F, et al. Osmotic adjustment of *I. lactea* var. *chinensis* leaves under interactions of soil moisture and salinity [J]. *Sci Agri Sin*, 2011, 44(12): 2616–2624.
张彪, 李品芳, 白海峰, 等. 不同水盐条件下马蔺叶片的渗透调节效应 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2616–2624.
- [33] Yang Z Y, Zhao L Y, Xu Z D. Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Rosa rugosa* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(8): 1993–1998.
杨志莹, 赵兰勇, 徐宗大. 盐胁迫对玫瑰生长和生理特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 1993–1998.
- [34] Ahmad P. *Oxidative Damage to Plants* [M]. New York: Academic Press, 2014: 477–522.
- [35] Tabot P T, Adams J B. Salt secretion, proline accumulation and increased branching confer tolerance to drought and salinity in the endemic halophyte *Limonium linifolium* [J]. *S Afr J Bot*, 2014, 94(5): 64–73.
- [36] Banu N A, Hoque A, Watanabe-Sugimoto M, et al. Proline and glycinebetaine induce antioxidant defense gene expression and suppress cell death in cultured tobacco cells under salt stress [J]. *J Plant Physic*, 2009, 166(2): 146–156
- [37] Patade V Y, Lokhande V H, Suprasanna P. Exogenous application of proline alleviates salt induced oxidative stress more efficiently than glycine betaine in sugarcane cultured cells [J]. *Sugar Techn*, 2014, 16(1): 22–29.