

NaCl 胁迫对 5 种绿化植物幼苗生长和生理指标的影响及耐盐性综合评价

魏秀君, 殷云龙^①, 芦治国, 莫海波, 华建峰, 徐建华

[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]

摘要: 采用分次浇灌的方法, 对 2、4、6、8 和 10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下光叶决明 (*Cassia floribunda* Cav.)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.)、海滨木槿 (*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)、决明 [*Senna tora* (L.) Roxb.] 和田菁 [*Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.] 幼苗的 3 个生长指标和 6 个生理指标的变化进行了测定和分析, 采用相关性分析、主成分分析 (PCA) 与隶属函数法相结合的方法对 5 种植物对 NaCl 的耐性进行了鉴定和综合评价, 并利用回归分析确定了 5 种植物的生长临界 NaCl 浓度 (C_{50})。结果表明: 在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下, 5 种植物幼苗的株高生长量和全株干质量总体上小于对照, 且总体上随着 NaCl 质量浓度的提高而降低。随 NaCl 质量浓度的提高, 5 种植物幼苗的相对电导率、叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量和 SOD 活性均受到不同程度的影响, 说明 5 种植物对 NaCl 胁迫的响应不同。除 MDA 含量外, 5 种植物的生长和生理指标间大多存在显著或极显著的相关性。通过主成分分析和隶属函数法获得的 5 种植物的综合评价值 D 及 C_{50} 均表明田菁和海滨木槿对 NaCl 的耐性较强, 其次为紫穗槐和决明, 光叶决明对 NaCl 的耐性最差。

关键词: 绿化植物; NaCl 胁迫; 耐盐性; 隶属函数法; 综合评价

中图分类号: Q945.78; S728.6.03 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2011)02-0035-08

Effects of NaCl stress on growth and physiological indexes of five greening plant seedlings and comprehensive evaluation of their salt tolerance WEI Xiu-jun, YIN Yun-long^①, LU Zhi-guo, MO Hai-bo, HUA Jian-feng, XU Jian-hua (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2011, 20(2): 35-42

Abstract: The changes of three growth indexes and six physiological indexes of seedlings of *Cassia floribunda* Cav., *Amorpha fruticosa* L., *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc., *Senna tora* (L.) Roxb. and *Sesbania cannabina* (Retz.) Poir. were determined and analyzed under NaCl stress conditions with 2, 4, 6, 8 and 10 mg · g⁻¹ by fractional irrigation method. And the tolerance of five plants to NaCl was identified and comprehensively evaluated by correlation analysis method and principal component analysis method (PCA) combined with subordination function method, and the growth critical NaCl concentration (C_{50}) of five plants was calculated by regression analysis. The results show that under 2-10 mg · g⁻¹ NaCl stress conditions, height increment and dry weight of whole plant of seedlings of five plants are generally lower than those of the control, and generally decrease with enhancing of NaCl concentration. With rising of NaCl concentration, relative conductivity, contents of chlorophyll, MDA, proline and soluble sugar, SOD activity of seedlings of five plants are affected with different degrees, indicating that the response of five plants to NaCl stress is different. And growth and physiological indexes of five plants mostly appear significant or obviously significant correlation except MDA content. The comprehensive evaluation value D obtained by PCA-subordination function method and C_{50} all indicate that the tolerance of *S. cannabina* and *H. hamabo* to NaCl is stronger, that of *A. fruticosa* and *S. tora* is weaker, that of *C. floribunda* is the weakest.

收稿日期: 2011-02-24

基金项目: 江苏省交通厅项目(08Y28); 江苏洋口港开发有限公司联合资助项目

作者简介: 魏秀君(1975—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事植物资源与生态环境方面的研究。

^①通信作者 E-mail: yiny1066@sina.com

Key words: greening plant; NaCl stress; salt tolerance; subordination function method; comprehensive evaluation

近年来随着沿海开发成为经济发展的热点,盐碱地区的绿化成为沿海滩涂开发的重要内容之一^[1]。中国华东沿海地区海涂土壤0~100 cm剖面的平均含盐量高于 $7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,超过了常规绿化树种的生长极限(低于 $3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),不利于快速绿化^[2]。因此,绿化植物的选择是沿海滩涂绿化成败的关键。耐盐绿化适生植物的筛选能够帮助人们科学选择绿化植物,发挥其最大的生态和经济效益,可为滨海地区绿化及林业建设中盐碱环境下植物的选择和应用提供科学依据^[3]。

目前,已有许多学者针对重盐碱区植物耐盐性及耐盐植物的筛选和引种做了大量的研究。Maas等^[4]认为:在一定盐浓度范围内,作物的相对产量与饱和土壤浸出液的电导率呈负相关。Godfrey等^[5]研究表明:生长在盐渍土壤中的植物因遭受干旱、离子毒害、矿质元素缺乏等逆境胁迫而出现生长和生殖受限。因此,植物的生长指标能够较为直观和准确地反应植物的耐盐性。张玲菊等^[6]选择了27种常用绿化造林树种进行水培实验,以盐胁迫条件下植物的形态变异作为耐盐树种的形态(指标)变化特征,并对茎生长量和新发根数作了定量研究,筛选出6种耐盐绿化植物。周玉珍等^[7]比较了 $5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl胁迫条件下11个墨西哥落羽杉(*Taxodium mucronatum* Tenore)无性系的生长量、生长势、成活率及电导率,结果显示11个无性系间4个指标的差异均达显著水平,表明开展墨西哥落羽杉耐盐无性系选育是可行的。

以上研究一般均采用隶属函数法对植物的抗逆性进行综合评价^{[8]23-24},但由于植物抗逆性的评价指标较多,且指标间有一定的相关性,故仅用隶属函数法对植物抗逆性进行综合评价存在一定的局限性。主成分分析法可以在不损失或很少损失原有信息的前提下,较科学地对植物的抗逆性进行综合评价^[9]。因此,本研究将隶属函数法与主成分分析法相结合,用隶属函数值加权平均法(D值)对供试植物的耐盐性进行评价,以消除个别指标带来的片面性,使不同植物抗盐性的差异具有可比性^[10]。

实践及研究已证明光叶决明(*Cassia floribunda* Cav.)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)、海滨木槿(*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)、决明〔*Senna tora*

(L.) Roxb.〕和田菁〔*Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.〕5种植物具有一定的耐盐性,且观赏和生态利用价值较高、适应性较强,具有潜在推广应用价值;并且紫穗槐和田菁根部的共生根瘤菌具有固氮作用,有利于土壤改良^[11]。鉴于此,作者以前述5种具有一定耐盐潜力的植物为研究对象,对苗期耐NaCl水平的高低进行综合评价并确定了它们对NaCl胁迫耐性的临界阈值,筛选出适宜于在华东东部沿海地区推广利用的耐盐植物,为推动沿江、滨海地区绿化建设及滩涂地林业可持续发展提供实验与理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料

实验在江苏省·中国科学院植物研究所景观生态中心温室内进行。采用幼苗盆栽法,供试植株均为人工播种培育的当年生幼苗,种子均采自江苏省句容县林场;栽培基质由脱盐土、泥炭土、珍珠岩按质量比5:1:1混合而成,每盆(直径25 cm、高度35 cm)3 kg;脱盐土于实验前准备,自然风干并过筛。

种子采后置于4℃冷藏,播种前先用体积分数95%乙醇消毒10 min,散铺于托盘中,并覆盖2层用无菌水浸湿的纱布;置于培养箱中在温度26℃、光照度3 000 lx、光照时间12 h·d⁻¹条件下培养2~7 d,每日补水1~2次,并浸洗消毒种子。待种子露白后撒播于沙床中育苗,用遮阳网适度遮阳;待幼苗生长至3叶龄时选取长势相对一致的幼苗移栽至栽培盆中,每盆栽植2株;置于通风良好的玻璃棚中,遮阳并进行常规养护管理。待供试植物幼苗苗龄达到4个月时进行NaCl胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 NaCl胁迫处理方法 实验采用完全随机区组设计,土壤中NaCl的最终质量浓度分别设置6个梯度:0(CK)、2、4、6、8和10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,每处理重复5次,每一重复10株幼苗。采用分次浇灌的方法加入NaCl溶液,所有处理首次均施入 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl,以后每隔2 d按 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl递增,直至达到各处理所需的NaCl终浓度。栽培盆下垫塑料托盘,以便将流出的NaCl溶液及时倒回栽培盆内以防止盐分流

失。NaCl 胁迫期间,定期定量浇水、除草以平衡蒸发量,同时防治病虫害。浇水量根据蒸发量而定,以浇透为宜,每次 500~1 000 mL,每周 2~3 次。胁迫 35 d 后,测定各项生长指标;每盆单独取样并采集各植株中部的鲜叶进行生理指标的测定。

1.2.2 生长指标测定 土面到顶端新芽芽尖的距离为株高,在 NaCl 胁迫处理前后分别测量单株幼苗的株高,其差值即为株高生长量;处理组与对照组的平均株高生长量比值即为相对株高生长量。全株收获洗净后将地上部分和地下部分分开,分别装入纸袋内于 110 ℃ 杀青 20 min,于 80 ℃ 烘干至恒质量,分别称取每一单株地上部分和地下部分的干质量;每一单株地上部分和地下部分干质量的总和即为全株干质量。每一单株地下部分干质量(根干质量)与地上部分干质量(茎和叶的干质量)的比值即为根冠比。

对全部植株进行观察,根据叶片受害程度划分盐害等级并赋值,计算幼苗在不同 NaCl 胁迫条件下的盐害指数^[12],计算公式为:盐害指数 = $(1 \times n_1 + 2 \times n_2 + 3 \times n_3 + 4 \times n_4) / (4 \times m)$,式中, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为不同盐害级别的受害株数, m 为总株数。盐害指数分为 5 个等级:0 级,全株无盐害症状(0 分);1 级为轻度盐害,少部分(小于 20%)叶片边缘有轻微发黄、枯焦、脱落症状(1 分);2 级为中度盐害,近 50% 叶片发黄、枯焦或脱落(2 分);3 级为重度盐害,50% 以上的叶片发黄、枯焦或脱落(3 分);4 级为极重度盐害,90% 以上叶片枯焦、脱落,或植株死亡(4 分)。

处理组植株的相对株高生长量较对照(CK)降低 50% 时,说明幼苗生长受到明显抑制,对应的 NaCl 质量浓度即为植物的生长临界 NaCl 浓度(C_{50})^[13]。

1.2.3 生理指标测定 采用电导法^{[8]9}测定叶片相对电导率(RC);采用丙酮乙醇混合液提取法^[14]测定叶绿素(Chl)含量;采用茚三酮显色法^{[15]258-259}测定脯氨酸(Pro)含量;采用蒽酮比色法^{[15]127-128}测定可溶性糖(SS)含量;采用硫代巴比妥酸法^{[15]274-276}测定丙二醛(MDA)含量;采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^{[15]268-269}测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。

1.3 数据处理

采用模糊数学中的隶属函数法结合主成分分析法进行抗盐性综合评价。采用隶属函数法对植物各个耐 NaCl 指标的隶属函数值进行累加,求得平均值乘以权重系数所得到的结果,为植物耐 NaCl 综合评价值 D , D 值越大则耐 NaCl 能力越强。如果配合

适当的耐 NaCl 指标,并结合 NaCl 胁迫症状观察结果,就能比较准确地评定树种或品种间耐 NaCl 能力的强弱。其方法如下:

1)首先使用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件处理和分析数据。分别计算 NaCl 处理组和对照组各性状的平均值,同时进行相关性分析;并以株高生长量作为衡量指标,参考周广生等^[9]的方法,计算各指标的抗盐系数(α)。其中,若与株高生长量呈正相关,则该指标的 $\alpha = (\text{处理组测定值的平均值} / \text{对照组测定值的平均值}) \times 100\%$;若与株高生长量呈负相关,则该指标的 $\alpha = (\text{对照组测定值的平均值} / \text{处理组测定值的平均值}) \times 100\%$ 。

2)参照文献^[16]的方法计算每种植物综合指标的隶属函数值;再依据主成分分析法获得的各指标的贡献率确定各综合指标的权重。

3)参照文献^[16]的方法,采用加权单因子法将各指标叠加,获得植物耐 NaCl 的综合评价价值 D 。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对 5 种植物幼苗生长和生理指标的影响

与对照相比,经 NaCl 胁迫处理后,5 种绿化植物幼苗的生长和生理指标均受到不同程度的影响,结果见表 1 和表 2。

2.1.1 对生长指标的影响 由表 1 可看出:在 2~10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,光叶决明、紫穗槐、海滨木槿、决明和田菁幼苗的株高生长量和全株干质量总体上小于对照,且总体上随 NaCl 质量浓度的提高而降低;其中,光叶决明幼苗的株高生长量显著小于对照,海滨木槿幼苗的株高生长量仅在 10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下显著小于对照,而紫穗槐和决明幼苗的株高生长量在 4~10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下显著小于对照。

2~10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫对 5 种植物幼苗全株干质量的影响不同。其中,在 4~10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,光叶决明幼苗的全株干质量显著小于对照;而紫穗槐和田菁幼苗的全株干质量在 6~10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下显著小于对照;在 8 和 10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,田菁幼苗的全株干质量均显著小于对照;而各处理组海滨木槿幼苗的全株干质量与对照均无显著差异。

表1 NaCl胁迫对5种植物幼苗3个生长指标的影响¹⁾
Table 1 Effect of NaCl stress on three growth indexes of five plant seedlings¹⁾

NaCl 质量 浓度/mg · g ⁻¹ Conc. of NaCl	株高生长量/cm Height increment	全株干质量/g Dry weight of whole plant	根冠比 Root-shoot ratio
光叶决明 <i>Cassia floribunda</i>			
0 (CK)	26.14aC	18.77aB	0.53aA
2	22.17aC	16.03aB	0.35bC
4	9.92bC	14.17bB	0.23bC
6	7.25bB	8.82cA	0.35bC
8	7.14bB	9.34cA	0.19cC
10	6.08bB	8.37cA	0.24bC
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>			
0 (CK)	31.92aB	15.38aB	0.51cA
2	23.88bC	17.82aB	0.90aA
4	13.96bC	16.14aB	0.91aA
6	13.55cB	11.97bA	1.01aA
8	8.42cB	12.83bA	0.89aA
10	4.63dB	9.86cA	0.97aA
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>			
0 (CK)	1.88aD	7.28aC	0.60aA
2	3.30aD	7.87aC	0.52aB
4	3.13aD	5.40aC	0.48bB
6	1.38aC	6.59aB	0.64aB
8	1.44aC	5.36aB	0.57aB
10	1.02bB	4.29aB	0.46bB
决明 <i>Senna tora</i>			
0 (CK)	39.08aB	10.03aC	0.27cB
2	32.42aB	9.89aC	0.36bC
4	21.83bB	8.20aC	0.45aB
6	12.33cB	6.69aB	0.51aB
8	10.29cB	4.42bC	0.54aB
10	5.83cB	2.49cC	0.60aB
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>			
0 (CK)	75.44bA	23.18aA	0.18aB
2	88.67aA	24.08aA	0.13aD
4	78.29bA	20.90aA	0.12aC
6	58.75cA	11.67bA	0.12aD
8	61.43cA	11.68bA	0.12aC
10	54.08dA	9.33bB	0.13aC

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一植物不同处理组间差异显著 ($P=0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant differences among different treatment groups of the same plant ($P=0.05$); 同列中不同的大写字母表示同一处理不同植物间差异显著 ($P=0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant differences among different plants at the same treatment group ($P=0.05$).

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明幼苗的根冠比显著小于对照,紫穗槐和决明幼苗的根冠比均显著高于对照,海滨木槿和田菁幼苗的根冠比总体上小于对照。

由表 1 还可见:在同一质量浓度 NaCl 胁迫条件

下,田菁幼苗的株高生长量和全株干质量总体上高于或显著高于其他 4 种植物,而紫穗槐幼苗的根冠比则显著高于其他 4 种植物。

2.1.2 对生理指标的影响 由表 2 可看出:在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,随 NaCl 质量浓度的提高,光叶决明、决明和田菁幼苗的相对电导率逐渐升高,且各处理组均高于或显著高于对照;其中,10 mg · g⁻¹ NaCl 处理组决明幼苗的相对电导率为对照的 20.4 倍,受伤害程度明显;在 2~8 mg · g⁻¹ NaCl 处理组中紫穗槐幼苗的相对电导率低于或显著低于对照,而在 10 mg · g⁻¹ NaCl 处理组中则显著高于对照;在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,海滨木槿幼苗的相对电导率与对照差异均不显著。

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明、紫穗槐、海滨木槿、决明和田菁幼苗的叶绿素含量总体上低于对照,其中,光叶决明、紫穗槐和决明幼苗的叶绿素含量随 NaCl 质量浓度的提高而降低,光叶决明幼苗的叶绿素含量在 10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫处理组下降最为显著,仅为对照的 18.1%。

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明和紫穗槐幼苗的丙二醛含量总体上显著低于对照;海滨木槿、决明和田菁幼苗的丙二醛含量随 NaCl 质量浓度的提高而升高,且均显著高于对照,在 10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下丙二醛含量分别为对照的 1.7、4.3 和 4.1 倍。

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明、紫穗槐和决明幼苗的脯氨酸含量随 NaCl 质量浓度的提高而升高,且 8 和 10 mg · g⁻¹ NaCl 处理组光叶决明、紫穗槐和决明幼苗的脯氨酸含量均显著高于对照;而各处理组海滨木槿和田菁幼苗的脯氨酸含量总体上高于对照,但差异均不显著。

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,随 NaCl 质量浓度的提高,光叶决明幼苗的可溶性糖含量较对照显著降低,海滨木槿、决明和田菁幼苗的可溶性糖含量较对照显著升高,紫穗槐幼苗的可溶性糖含量或高于或略低于对照但差异均不显著。

在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,仅紫穗槐幼苗的 SOD 活性随 NaCl 质量浓度的提高而降低,表明 SOD 活性受到抑制;其他 4 种植物幼苗的 SOD 活性均没有明显的变化。

由表 2 还可见:在 2~10 mg · g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明和决明幼苗的相对电导率较高,海滨木

表2 NaCl胁迫对5种植物幼苗6个生理指标的影响¹⁾Table 2 Effect of NaCl stress on six physiological indexes of five plant seedlings¹⁾

NaCl 质量浓度/mg · g ⁻¹ Conc. of NaCl	相对电导率/% Relative conductivity	叶绿素 含量/mg · g ⁻¹ Chlorophyll content	丙二醛 含量/nmol · g ⁻¹ MDA content	脯氨酸 含量/μg · g ⁻¹ Proline content	可溶性糖 含量/μg · g ⁻¹ Soluble sugar content	SOD 活 性/U · g ⁻¹ SOD activity
光叶决明 <i>Cassia floribunda</i>						
0(CK)	10.12dB	4.03aB	22.10aA	0.17cA	71.15aA	520.64bB
2	11.69dB	2.96bB	11.61bB	0.24cA	55.42bB	476.68cB
4	30.01cA	3.00bB	9.75bB	0.21cB	25.94cB	426.14dC
6	31.02cB	2.66bB	11.01bC	0.33cC	30.12cC	545.27bB
8	57.79bA	1.08cD	10.81bC	0.83bB	25.42cD	460.71dB
10	76.97aA	0.73cC	15.00bB	1.93aA	16.91cC	610.72aA
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>						
0(CK)	20.56bA	5.46aA	26.91aA	0.29cA	80.90aA	657.01aA
2	15.70bA	6.12aA	16.83bB	0.26cA	84.68aA	683.00aA
4	13.05cC	5.40aA	32.13aA	0.31cB	94.05aA	664.71aA
6	14.29cC	5.35aA	19.72bB	0.50bB	90.75aB	610.04bA
8	13.69cD	4.74bA	12.15bB	0.49bC	80.06aB	564.42cA
10	27.28aB	3.29cA	14.08bB	1.79aA	88.65aA	592.14cB
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>						
0(CK)	8.65aB	2.65aC	26.85dA	0.19aA	38.69aB	396.10cD
2	7.30aC	2.75aB	29.13cA	0.18aB	24.39cC	342.03dC
4	9.49aC	2.86aB	34.99bA	0.34aB	25.38bB	417.97bC
6	6.86aD	2.35aB	31.77cA	0.26aC	29.92bC	506.06aB
8	8.48aE	1.84bC	40.08aA	0.22aD	43.86aC	456.24bB
10	8.53aC	2.08aB	46.36aA	0.26aC	50.56aB	405.21bD
决明 <i>Senna tora</i>						
0(CK)	3.64dC	2.53aC	3.58bB	0.32dA	29.51bC	464.92aC
2	5.21dC	1.84aC	8.52aB	0.40cA	32.78aC	488.18aB
4	18.98cB	1.51bC	9.76aB	0.55cA	34.02aB	489.78aB
6	53.22bA	1.26bC	11.03aC	0.71bA	39.37aC	484.36aC
8	50.14bB	0.98cD	10.12aC	1.01aA	37.39aC	465.56aB
10	74.35aA	0.69cC	15.32aB	1.12aB	45.74aB	472.25aC
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>						
0(CK)	4.58eC	2.51aC	5.29cB	0.10aB	52.85cB	645.06aA
2	8.40dB	2.44aB	13.13bB	0.13aB	83.96bA	633.00aA
4	13.52cC	2.48aB	16.22aB	0.11aC	105.21aA	634.67aA
6	13.02cC	2.18aB	17.25aB	0.09aD	117.42aA	438.31cD
8	20.18bC	2.79aB	19.27aB	0.16aD	106.03aA	576.37bA
10	25.40aB	1.78bB	21.64aB	0.19aC	76.99bA	654.11aA

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一植物不同处理组间差异显著 ($P=0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant differences among different treatment groups of the same plant ($P=0.05$); 同列中不同的大写字母表示同一处理不同植物间差异显著 ($P=0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant differences among different plants at the same treatment group ($P=0.05$).

槿幼苗的相对电导率较低;各处理组紫穗槐幼苗的叶绿素含量均显著高于其他4种植物,决明幼苗的叶绿素含量均低于或者显著低于其他4种植物;各处理组海滨木槿幼苗的丙二醛含量均高于或者显著高于其他4种植物;2~8 mg · g⁻¹ NaCl胁迫处理组决明幼苗的脯氨酸含量均高于或者显著高于其他4种植物;各

处理组紫穗槐和田菁幼苗的可溶性糖含量显著高于其他3种植物;除紫穗槐外,各处理组中其他4种植物幼苗的SOD活性总体上无明显变化趋势。

2.2 相关性及抗盐系数分析

在2~10 mg · g⁻¹ NaCl胁迫条件下,供试5种植物幼苗生长和生理指标的相关分析结果见表3。由表

3 可见:株高生长量与全株干质量之间呈极显著正相关;可溶性糖含量和 SOD 活性与株高生长量、全株干质量和叶绿素含量之间呈极显著正相关;根冠比、脯氨酸含量、盐害指数、相对电导率和丙二醛含量与株高生长量、全株干质量之间呈不同程度的负相关。

在 2~10 mg·g⁻¹ NaCl 胁迫条件下,光叶决明、紫穗槐、海滨木槿、决明和田菁幼苗各生长和生理指标

的抗盐系数见表 4。不同的生长和生理指标在 5 种植物幼苗的抗盐性评价中所起的作用不同。若以株高生长量作为耐盐性强弱的衡量指标,海滨木槿幼苗对 NaCl 胁迫的耐性最强,光叶决明最弱;而若以全株干质量作为衡量指标,则紫穗槐幼苗对 NaCl 胁迫的耐性最强,光叶决明最弱,海滨木槿居中。因而,直接利用单个指标进行耐盐性评价具有片面性。

表3 NaCl 胁迫条件下 5 种植物幼苗生长和生理指标的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of growth and physiological indexes of five plant seedlings under NaCl stress condition¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient									
	HI	DW	RS	SI	RC	Chl	Pro	SS	MDA	SOD
HI	1.000									
DW	0.707 **	1.000								
RS	-0.597 **	-0.181	1.000							
SI	-0.332	-0.388 *	-0.031	1.000						
RC	-0.313	-0.391 *	-0.062	0.823 **	1.000					
Chl	0.007	0.495 **	0.574 **	-0.406 *	-0.502 **	1.000				
Pro	-0.425 *	-0.391 *	0.244	0.749 **	0.770 **	-0.346	1.000			
SS	0.577 **	0.565 **	0.116	-0.250	-0.311	0.525 **	-0.249	1.000		
MDA	-0.358	-0.323	0.284	-0.143	-0.297	0.205	-0.251	-0.045	1.000	
SOD	0.485 **	0.618 **	0.110	0.115	0.013	0.446 **	0.062	0.561 **	-0.225	1.000

¹⁾ HI: 株高生长量 Height increment; DW: 全株干质量 Dry weight of whole plant; RS: 根冠比 Root-shoot ratio; SI: 盐害指数 Salt injury index; RC: 相对电导率 Relative conductivity; Chl: 叶绿素含量 Chlorophyll content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; MDA: 丙二醛含量 MDA content; SOD: SOD 活性 SOD activity. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表4 NaCl 胁迫条件下 5 种植物幼苗生长和生理指标的抗盐系数(α 值)¹⁾

Table 4 Salt resistance coefficient (α value) of growth and physiological indexes of five plant seedlings under NaCl stress condition¹⁾

种类 Species	抗盐系数 Salt resistance coefficient									
	HI	DW	RS	SI	RC	Chl	Pro	SS	MDA	SOD
光叶决明 <i>Cassia floribunda</i>	0.402	0.604	0.244	0.675	0.244	0.517	0.239	0.478	1.737	0.968
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	0.404	0.893	0.713	0.842	1.225	0.884	0.368	1.108	1.316	0.948
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>	1.060	0.811	1.064	0.931	1.064	0.880	0.764	0.895	0.931	1.074
决明 <i>Senna tora</i>	0.423	0.632	0.088	0.825	0.088	0.519	0.397	1.005	0.294	1.032
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	0.905	0.670	0.288	0.900	0.288	0.930	0.731	1.616	0.294	0.910

¹⁾ HI: 株高生长量 Height increment; DW: 全株干质量 Dry weight of whole plant; RS: 根冠比 Root-shoot ratio; SI: 盐害指数 Salt injury index; RC: 相对电导率 Relative conductivity; Chl: 叶绿素含量 Chlorophyll content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; MDA: 丙二醛含量 MDA content; SOD: SOD 活性 SOD activity.

2.3 主成分分析

NaCl 胁迫下 5 种植物幼苗生长和生理指标抗盐系数的主成分分析结果见表 5。由表 5 可见:前 3 个主成分的贡献率分别为 30.727%、29.826% 和 21.227%,累计贡献率达 81.780%。第 1 主成分主要包括脯氨酸含量、相对电导率和盐害指数;第 2 主成分主要包括 SOD 活性、全株干质量和可溶性糖含量;第 3 主成分主要包括根冠比、株高生长量、叶绿素含量和丙二醛含量。

2.4 5 种植物幼苗对 NaCl 耐性的综合评价

NaCl 胁迫下 5 种植物的公因子得分值 $C(x)$ 、隶属函数值 $U(x)$ 和综合评价值 D 见表 6。由表 6 可见:光叶决明、紫穗槐、海滨木槿、决明和田菁的 D 值分别为 0.260、0.477、0.726、0.287 和 0.758。 D 值反映了植物综合耐盐性能力的大小, D 值越大则耐盐性越强,因此,根据 D 值大小判定 5 种植物对 NaCl 胁迫的耐性由强到弱依次为:田菁、海滨木槿、紫穗槐、决明、光叶决明。

2.5 5种植物幼苗的生长临界 NaCl 浓度

Balba 等^[17]认为:在盐渍条件下,植物生长量是土壤盐度或土壤溶液盐度的函数。因此,本研究分别以5种植物幼苗在2~10 mg·g⁻¹ NaCl胁迫条件下处理35 d时的相对株高生长量为因变量(Y)、以NaCl质量浓度为自变量(X)建立回归方程,结果见表7。相对株高生长量下降50%时所对应的NaCl质量浓度

即为衡量各植物幼苗的生长临界NaCl浓度(C_{50}),5种植物幼苗的 C_{50} 由高至低依次为田菁、海滨木槿、决明、紫穗槐、光叶决明,与通过综合隶属函数结合主成分分析评价法得到的结果基本一致,仅在决明和紫穗槐的顺序上略有不同。决明和紫穗槐的 C_{50} 仅相差0.28 mg·g⁻¹,说明二者的耐盐性较为接近。

表5 NaCl胁迫条件下5种植物幼苗生长和生理指标的主成分分析¹⁾

Table 5 Principal component analysis of growth and physiological indexes of five plant seedlings under NaCl stress condition¹⁾

主成分 Principal component	不同指标的因子负荷 Factor load of different indexes										贡献率/% Contribution rate
	HI	DW	RS	SI	RC	Chl	Pro	SS	MDA	SOD	
1	-0.062	-0.035	0.071	0.307	0.306	-0.057	0.321	0.009	-0.158	0.165	30.727
2	0.165	0.256	0.089	0.055	0.032	0.203	0.072	0.273	-0.147	0.351	29.826
3	-0.301	-0.089	0.452	0.004	-0.050	0.318	0.084	0.065	0.234	0.061	21.227

¹⁾ HI: 株高生长量 Height increment; DW: 全株干质量 Dry weight of whole plant; RS: 根冠比 Root-shoot ratio; SI: 盐害指数 Salt injury index; RC: 相对电导率 Relative conductivity; Chl: 叶绿素含量 Chlorophyll content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; MDA: 丙二醛含量 MDA content; SOD: SOD 活性 SOD activity.

表6 NaCl胁迫条件下5种植物幼苗的公因子得分值 $C(x)$ 、隶属函数值 $U(x)$ 和综合评价值 D

Table 6 Common factor score value $C(x)$, subordination function value $U(x)$ and comprehensive evaluation value D of five plant seedlings under NaCl stress condition

种类 Species	$C(1)$	$C(2)$	$C(3)$	$U(1)$	$U(2)$	$U(3)$	D	排序 Order
光叶决明 <i>Cassia floribunda</i>	0.311	0.777	1.380	0.000	0.000	1.000	0.260	5
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	0.642	1.077	0.739	0.638	0.436	0.300	0.477	3
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>	0.830	1.285	0.751	1.000	0.738	0.313	0.726	2
决明 <i>Senna tora</i>	0.502	1.057	0.464	0.368	0.406	0.000	0.287	4
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	0.687	1.466	0.892	0.724	1.000	0.468	0.758	1
贡献率 Contribution rate	0.307	0.298	0.212					
权重 Weight				0.376	0.365	0.260		

表7 NaCl胁迫条件下5种植物幼苗的回归方程和生长临界NaCl浓度(C_{50})

Table 7 Regression equation and growth critical NaCl concentration (C_{50}) of five plant seedlings under NaCl stress condition

种类 Species	回归方程 Regression equation	R^2	$C_{50}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
光叶决明 <i>Cassia floribunda</i>	$Y=1.078X^2-18.874X+105.009$	0.945	3.69
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	$Y=0.565X^2-13.855X+98.851$	0.974	4.27
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>	$Y=-1.920X^2+10.958X+120.595$	0.614	9.56
决明 <i>Senna tora</i>	$Y=0.516X^2-14.014X+103.072$	0.985	4.55
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	$Y=-0.300X^2-0.943X+107.754$	0.722	12.39

3 讨论和结论

经2~10 mg·g⁻¹ NaCl胁迫后,光叶决明、紫穗槐、海滨木槿、决明和田菁幼苗植株的生长及生理代谢过程均受到不同程度的影响。NaCl胁迫抑制5种植物的生长,使株高生长量和全株干质量明显减小。

然而,在质量浓度较低的条件(2 mg·g⁻¹),NaCl胁迫不仅不会抑制海滨木槿和田菁的生长,反而对其生长有一定的促进作用。海滨木槿和田菁的原产地均为中国东部及南部的沿海冲积地带,已有研究结果表明海滨木槿具有较强的耐NaCl胁迫能力^[18],因而,对盐渍环境具有比一般耐盐植物更强的适应性。

供试5种植物的不同生理和生长指标在各自耐

NaCl 能力的评价中所起的作用不尽相同,株高生长量、全株干质量、叶绿素含量、可溶性糖含量和 SOD 活性在耐盐性评价中具有较强的指示或调节作用。同时,5 种植物的多个生长指标间也存在显著或者极显著的相关性,因此,5 种植物对 NaCl 的耐性不仅有单因子的作用,更是多因子之间的相互作用,只有对这些因子进行综合分析,才能提高植物耐盐性鉴定的准确性,提高引种、筛选抗盐品种的可靠性。

植物的耐盐性涉及生理生化多方面因素,是一个多基因控制的极为复杂的反应过程,也是综合性状的表现^[19]。由于不同植物耐盐方式和耐盐机制不同,其组织或细胞的生理代谢和生化变化也不同,所以对植物抗盐性指标的研究应是多个指标的综合^[20]。主成分分析法(因子分析法)和隶属函数法的结合,提供了在多指标测定的基础上进行综合评价的方法,将其应用于耐盐种质的筛选更具科学性和可靠性。利用隶属函数值加权平均法得到抗盐性度量值——*D* 值,*D* 值越大、耐盐性越强,因而根据 *D* 值的大小 5 种供试植物对 NaCl 的耐性由强至弱依次为:田菁、海滨木槿、紫穗槐、决明、光叶决明。

此外,根据 5 种植物幼苗的相对株高生长量与 NaCl 质量浓度的回归方程,分析得出各植物的生长临界 NaCl 浓度(C_{50}),其大小顺序与通过 *D* 值评定的耐盐性强弱顺序基本一致。5 种植物中田菁和海滨木槿的耐盐能力较强,极适合作为先锋植物在重度盐碱地区大量推广利用;其次为紫穗槐和决明,其中紫穗槐在盐碱地绿化中已广泛应用^[21-22],而决明作为 1 年生植物,其生物量较大,可在中度盐碱地区配合紫穗槐作为土壤改良和绿肥植物加以推广利用;光叶决明的耐盐能力最弱,仅适宜在轻度盐碱地区推广利用。

由于本实验仅探讨了 NaCl 对不同植物幼苗的影响,但实际上盐土常含多种盐分,不同无机离子之间存在着相互作用,因此,关于植物在实际盐碱土壤条件下的耐盐性状况尚需进一步实验研究。

参考文献:

[1] 黄生林. 慈溪开发区(杭州湾新区)盐碱地绿化技术综述[J]. 广东农业科学, 2010, 37(5): 71-72.
 [2] 方明,陈邦本,胡容卿,等. 江苏省海涂土壤的盐渍生态特征[J]. 土壤学报, 1990, 27(3): 335-342.
 [3] 卞阿娜. 闽南滨海区耐盐园林绿化植物的筛选[J]. 漳州师范学院学报:自然科学版, 2008, 23(2): 119-122.

[4] Maas E V, Hoffman G J. Crop salt tolerance: current assessment [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1977, 103(2): 115-134.
 [5] Godfrey W N, John C O, Erwin B. Sorghum and salinity: I. response of growth, water relations and ion accumulation to NaCl salinity[J]. Crop Science, 2004, 44(3): 797-805.
 [6] 张玲菊,黄胜利,周纪明,等. 常见绿化造林树种盐胁迫下形态变化及耐盐树种筛选[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(5): 833-838.
 [7] 周玉珍,李火根,史骥清,等. 墨西哥落羽杉耐盐能力及其无性系之间的差异[J]. 林业科技, 2008, 33(6): 7-10.
 [8] 宋丹. 几个引进树种幼苗耐盐特性及耐盐性评价研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学林学院, 2006.
 [9] 周广生,梅方竹,周竹青,等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1378-1382.
 [10] 钮福祥,华希新,郭小丁,等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探[J]. 作物学报, 1996, 22(4): 392-398.
 [11] 陈文新. 豆科植物根瘤菌-固氮体系在西部大开发中的作用[J]. 草地学报, 2004, 12(1): 1-2.
 [12] 卢树昌,苏卫国. 重盐碱区耐盐植物筛选试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(增刊): 19-24.
 [13] 刘一明,程凤枝,王齐,等. 四种暖季型草坪植物的盐胁迫反应及其耐盐阈值[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 192-199.
 [14] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26-28.
 [15] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2003.
 [16] 许桂芳,张朝阳,向佐湘. 利用隶属函数法对 4 种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 24-26.
 [17] Balba A M, El-Etriby F F. The quantitative expression of water salinity on plant growth and nutrient absorption [C] // Subcommittee on Salt Affected Soils ISSS. International Symposium on Principles and Practices for Reclamation and Management of Salt Affected Soils. Karnal: Central Soil Salinity Research Institute, 1980: 451-456.
 [18] 李会欣,吴明,方炎明,等. NaCl 胁迫对海滨木槿叶片生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 55-61.
 [19] 张兆英,于秀俊. 植物抗盐性评价生理指标的分析[J]. 沧州师范专科学校学报, 2006, 22(4): 51-53.
 [20] 肖雯,贾恢先,蒲陆梅,等. 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.
 [21] 张军,李金龙. 紫穗槐在公路绿化中的应用与栽培技术[J]. 防护林科技, 2010(1): 120, 122.
 [22] 古丽尼沙·卡斯木,刘永萍,王秀英. 紫穗槐在新疆园林绿化造林中的应用前景[J]. 新疆林业, 2010(3): 28.