

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230319

3 种我国造林树种幼苗耐盐性评价及指标筛选

甘红豪¹, 公 帅¹, 刘 浩¹, 褚建民^{1,2*}

(1. 国家林业和草原局滨海林业研究中心, 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的] 研究苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性差异并筛选耐盐性评价指标。[方法] 以 1 年生苦楝、白榆和刺槐幼苗为研究对象, 设置 0、100、200 和 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 对各 NaCl 处理下 3 种幼苗的生物量、生理和生化指标进行分析。[结果] (1) NaCl 胁迫抑制了苦楝、白榆和刺槐幼苗的生物量, 使其叶片相对含水量下降、电解质渗透率升高; (2) 刺槐幼苗叶绿素含量随 NaCl 浓度升高而显著下降, 但苦楝和白榆幼苗叶绿素 a 和叶绿素 b 含量仅在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下显著降低; NaCl 胁迫导致 3 种幼苗的光合作用参数 P_n 、 G_s 、 C_i 和 E 下降, 而气孔限制值、水分利用效率、根和叶中游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量、根和叶中 CAT 和 APX 活性升高; (3) NaCl 胁迫改变了苦楝、白榆和刺槐幼苗体内的离子平衡状态, 使 3 种幼苗根和叶中的 Na⁺ 含量显著升高、叶中 K⁺ 含量升高; 而根和叶中 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 以及根中 K⁺ 含量的变化规律不完全一致。[结论] 苦楝、白榆和刺槐幼苗耐盐能力强弱为白榆 > 苦楝 > 刺槐; 根中游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量、根和叶中 CAT 和 APX 活性、根中 Ca²⁺ 和叶中 Na⁺ 含量与苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性关联度较高, 可作为耐盐性评价指标。

关键词: 盐渍化; 耐盐性; 适应性评价; 耐盐性指标

中图分类号: S727

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)03-0156-13

我国盐碱地面积约为 9 900 万公顷, 广泛分布在东北、西北、华北及滨海地区^[1]。土壤中过量的盐分破坏了植物的生理代谢过程, 影响植物正常生长, 造成林分衰退甚至大面积森林死亡^[2-7]。因此, 选育耐盐碱林木种质资源、并鉴别植物耐盐性指标, 对改善盐碱地生态环境、减少盐渍化危害具有重要意义^[8]。

植物生理形态指标是反映其对盐胁迫适应性的主要参数, 是评价其耐盐性的重要依据。然而, 植物的耐盐性非常复杂, 不同的评价指标会导致不同的结果, 因此, 需要筛选并寻找相关性较大的指标进行后续耐盐性评价^[8]。近年来, 对植物耐盐筛选

评价的方法主要以相关性分析、主成分分析法和隶属函数法为主^[8-9]。如余如刚等^[9]以 13 种小白菜 (*Brassica rapa* L. ssp. *chinensis*) 幼苗的单项指标的耐盐系数为依据, 运用多种方法综合评价了其耐盐性, 并筛选出株高和根干质量 2 个鉴定指标; Yu 等^[10]采用多个指标对 20 个不同紫苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种幼苗的 14 个性状的耐盐系数进行了分析, 发现地上部分鲜质量、地上部分 K⁺/Na⁺、地上部分干质量、地上部分与地下部分鲜质量比值、根系比表面积和比根体积可作为苜蓿幼苗耐盐性评价指标。Afsar 等^[11]基于形态生理性状对 25 份芸芥 (*Eruca sativa* T.) 的耐盐性进

收稿日期: 2023-08-16 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资助 (CAFYBB2020SZ001-3); 国家自然科学基金青年项目 (31800514)

作者简介: 甘红豪, 助理研究员, 主要研究方向为植物逆境生理生态。E-mail: ganhonghao@163.com

* 通讯作者: 褚建民, 主要研究方向为林业生态工程。E-mail: cjmcaf@163.com

行了评价并筛选出高耐盐性种质,发现株高、根长、植株高度、叶片数量、叶面积、鲜质量、干质量和光合作用速率是研究种质间变异的最显著性状。Li等^[12]对萌发期向日葵(*Helianthus annuus* L.)种子的耐盐性进行评价,筛选高耐盐性种质30份,并确定发芽指数和发芽活力指数为最可靠的2个性状指标。

本研究以苦楝(*Melia azedarach* L.)、白榆(*Ulmus pumila* L.)和刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)这3个我国常用造林树种幼苗为材料,基于它们对盐胁迫的生理生态响应,采用相关性分析、主成分分析、隶属函数法及灰色关联分析等方法综合评价其耐盐性差异并筛选耐盐性鉴定指标,从而为建立耐盐碱林木种质苗期耐盐性筛选评价体系和耐盐碱林木种质资源选育提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理方法

参照甘红豪等^[13]的方法在中国林业科学研究院科研温室中培养一年生苦楝、白榆和刺槐扦插苗,选取生长健康且株高基本一致(约30 cm)的幼苗进行后续试验。试验共设置0、100、200和300 mmol·L⁻¹ NaCl处理浓度,每个树种每个NaCl浓度10株幼苗。参照甘红豪等^[14]的方法进行NaCl处理。

1.2 测定方法

1.2.1 光合参数测定及材料收获 NaCl处理30 d后,使用Li6400光合仪(LI-Cor, Lincoln, Nebraska, USA)测定苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(E)^[13-14]。同时,计算苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片 $WUE=P_n/E$,式中 WUE 为水分瞬时利用效率;并计算 $L_s=1-C_i/C_a$,式中 L_s 为气孔限制值, C_a 为空气中CO₂浓度,本试验中该值为400 μmol·mol⁻¹^[15]。

然后,分别收获不同NaCl处理下苦楝、白榆和刺槐幼苗的根、茎、叶样品并记录鲜质量。所有材料在液氮中研成粉末,并保存在-80℃冰箱中备用。称取各NaCl处理组刺槐、苦楝和白榆的根、茎、叶鲜样50 mg左右,在80℃下烘干后,称其质量、计算干湿比,并以此计算样品干质量。

1.2.2 叶片相对含水量、电解质渗透率和叶绿素含量测定 各NaCl处理苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片的相对含水量(RWC)采用烘干称重法测定^[13]。幼苗叶片电解质渗透率(REL)采用电导率仪(DDSJ-308F,雷磁)进行测定^[16]。使用80%丙酮浸提幼苗叶片叶绿素,并利用分光光度计测定其含量^[17]。

1.2.3 游离脯氨酸、可溶性蛋白质含量测定 分别使用Tamás等^[18]和Luo等^[19]提出的方法测定各NaCl处理下苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中游离脯氨酸以及可溶性蛋白含量。

1.2.4 酶活性测定 各NaCl处理下苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性参照Polle等^[20]所建立的方法测定。

1.2.5 离子含量分析 依据甘红豪等^[14]的方法测定各NaCl处理下苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶片中的Na⁺、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺含量,计算Na⁺/K⁺、Na⁺/Ca²⁺、Na⁺/Mg²⁺的比值。利用公式 $S_{x,Na}=(\text{叶片 } X/\text{Na}^+)/(\text{根 } X/\text{Na}^+)$ (X 代表K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺中的一种)计算离子选择运输系数 $S_{K,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 和 $S_{Ca,Na}$,用以评价NaCl处理下从幼苗根向叶片运输离子的选择性,其值越大,代表离子向叶片运输的选择性吸收积累就越高^[14]。

1.3 数据统计分析

使用Statgraphics Centurion XVI.I(STN, St, Louis, MO, USA)软件对正态分布检验后的数据进行分析。采用双因素方差分析研究树种(S)和盐分(T)对各变量的影响。当 F 检验的 P -Value < 0.05时,认为数据间具有统计学差异。使用OriginPro 2021(OriginLab Inc., Massachusetts, USA)进行相关性分析、主成分分析和图表绘制,并利用隶属函数法和主成分权重赋值法分析评价不同幼苗的耐盐能力差异,同时使用灰色关联分析筛选在苦楝、白榆和刺槐幼苗适应盐胁迫过程中起主要作用的变量指标。

2 结果与分析

2.1 NaCl胁迫对各树种生长及光合作用能力的影响

白榆和刺槐幼苗根、茎、叶片生物量随着NaCl浓度的增加呈下降趋势;苦楝幼苗叶生物量在NaCl处理下没有发生显著变化,但根和茎生物

量在 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下达到最大值（表 1）。与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使苦楝、白榆、刺槐幼苗根、茎和叶生物量出现不同程度降低，其中刺槐根和叶生物量降低幅度最大，为 45.1% 和 52.2%；而白榆茎生物

量下降最多，为 24.8%。三者幼苗叶 RWC 在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下显著下降、REL 显著升高，其中苦楝幼苗叶片 RWC 显著降低了 28.0%，而刺槐幼苗叶片 REL 显著升高了 125.3%，改变幅度最大。

表 1 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗生物量干质量、叶片相对含水量和电解质渗透率的影响

Table 1 The Effects of NaCl on dry biomass, leaf relative water content and relative electrolytic leakage of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*.

树种 Species	NaCl浓度/ (mmol·L ⁻¹)	干质量 Dry biomass/g			叶片相对含水量 RWC/%	电解质渗透率 REL/%
		根 Root	茎 Shoot	叶 Leaf		
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	2.51 ± 0.15 bc	3.31 ± 0.08 b	2.43 ± 0.08 c	87.25 ± 1.29 f	37.5 ± 2.5 c
	100	2.22 ± 0.25 b	3.59 ± 0.40 bc	2.08 ± 0.22 abc	73.69 ± 0.71 d	49.4 ± 1.7 f
	200	2.86 ± 0.03 c	4.29 ± 0.07 c	2.37 ± 0.05 bc	63.33 ± 1.90 b	55.5 ± 1.5 g
	300	2.40 ± 0.17 bc	3.21 ± 0.25 b	1.75 ± 0.10 a	57.29 ± 0.59 a	59.5 ± 1.4 h
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	8.72 ± 0.38 f	10.13 ± 0.47 i	10.26 ± 0.42 g	88.68 ± 0.61 f	26.3 ± 1.3 a
	100	6.12 ± 0.10 de	8.82 ± 0.23 e	7.04 ± 0.27 ef	81.63 ± 1.82 e	35.6 ± 1.6 c
	200	6.59 ± 0.28 e	8.46 ± 0.59 e	7.73 ± 0.17 f	77.12 ± 1.23 d	42.6 ± 1.7 d
	300	5.75 ± 0.06 d	7.61 ± 0.23 d	6.47 ± 0.48 e	64.79 ± 1.21 b	45.4 ± 1.4 e
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	1.02 ± 0.02 a	2.10 ± 0.09 a	3.64 ± 0.17 d	90.66 ± 0.54 f	28.5 ± 1.6 b
	100	0.59 ± 0.03 a	1.63 ± 0.07 a	1.87 ± 0.18 a	74.23 ± 1.39 d	49.8 ± 1.9 f
	200	0.57 ± 0.05 a	1.80 ± 0.17 a	1.95 ± 0.10 ab	69.20 ± 1.12 c	60.1 ± 1.8 h
	300	0.56 ± 0.04 a	1.65 ± 0.07 a	1.74 ± 0.11 a	65.24 ± 0.83 b	64.2 ± 1.5 i
P-Value	S	****	****	****	****	****
	T	****	**	****	****	****
	S × T	****	**	****	****	****

注：数据为平均值 ± 标准误 (n=6)，同列不同字母代表差异显著 (P ≤ 0.05)；*：P ≤ 0.05；**：P ≤ 0.01；***：P ≤ 0.001；****：P ≤ 0.000 1。下同
Notes: The data is the average ± SE (n=6), different letters in the same column mean significant different in P ≤ 0.05 level; *: P ≤ 0.01; **: P ≤ 0.01; ***: P ≤ 0.001; ****: P ≤ 0.000 1. The same below

与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，苦楝和白榆幼苗叶片的叶绿素（叶绿素 a 和叶绿素 b）和类胡萝卜素含量在 100 和 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下差异不显著，但刺槐幼苗叶片色素含量显著降低（表 2）。在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，3 种幼苗叶片的色素含量均显著降低，其中白榆幼苗叶片叶绿素 b 显著下降了 59.4%，降幅最大；而刺槐幼苗叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素含量减少了 48.0% 和 51.0%，下降最多。

与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使苦楝幼苗叶片的 P_n、G_s、C_i 和 E 分别降低了 52.7%、80.1%、38.9% 和 81.3%，使白榆幼苗叶片上述指标分别下降了 71.1%、83.7%、33.8% 和 79.1%，使刺槐幼苗叶片上述指标分别

下降了 68.8%、76.9%、21.8% 和 80.0%；而 3 种幼苗叶片的 WUE 分别升高了 165.0%、37.8% 和 56.1%，Ls 分别高 107.4%、70.6% 和 28.6%（表 3）。

2.2 NaCl 胁迫对各树种游离脯氨酸和可溶性蛋白质的影响

苦楝、白榆和刺槐根和叶中游离脯氨酸含量出现不同程度的增加（图 1）。在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，苦楝、白榆和刺槐根中游离脯氨酸含量分别比 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理提高了 2.4、11.0 和 4.3 倍，叶中游离脯氨酸分别升高了 65、10 和 16 倍。三者幼苗根中可溶性蛋白质在 NaCl 胁迫下显著增加，与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使它们根中可溶性

表 2 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗光合作用色素含量的影响

Table 2 The effects of NaCl on photosynthetic pigment content of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*.

树种 Species	NaCl浓度/ (mmol·L ⁻¹)	叶绿素a Chl a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素b Chl b/(mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 Car/(mg·g ⁻¹)
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	9.47 ± 0.34 fg	2.64 ± 0.12 de	2.17 ± 0.06 fg
	100	9.84 ± 1.04 g	3.09 ± 0.28 e	2.02 ± 0.26 efg
	200	8.66 ± 0.96 efg	3.06 ± 0.36 e	2.34 ± 0.05 gh
	300	6.07 ± 0.25 abc	1.71 ± 0.08 bc	1.83 ± 0.07 de
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	8.03 ± 0.38 def	2.71 ± 0.08 de	1.69 ± 0.13 cd
	100	7.66 ± 0.56 de	2.14 ± 0.38 cd	1.77 ± 0.06 de
	200	7.20 ± 0.11 cde	2.19 ± 0.26 cd	1.57 ± 0.04 bcd
	300	4.96 ± 0.26 a	1.10 ± 0.06 a	1.37 ± 0.07 bc
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	9.56 ± 0.80 fg	2.69 ± 0.21 de	2.02 ± 0.18 ef
	100	6.69 ± 0.19 bcd	1.93 ± 0.07 bc	1.28 ± 0.05 ab
	200	5.15 ± 0.16 ab	1.47 ± 0.03 ab	1.03 ± 0.02 a
	300	4.97 ± 0.33 a	1.40 ± 0.12 ab	0.99 ± 0.04 a
<i>P</i> -Value	S	****	****	****
	T	****	****	****
	S × T	*	**	***

表 3 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗光合作用参数、水分利用效率及气孔限制的影响

Table 3 The effects of NaCl on photosynthetic parameters, *WUE* and *Ls* of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*.

树种 Species	NaCl浓度/ (mmol·L ⁻¹)	净光合速率 <i>P_n</i> /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 <i>G_s</i> /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度 <i>C_i</i> /(μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率 <i>E</i> /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	水分利用效率 <i>WUE</i> /(μmol·mmol ⁻¹)	气孔限制值 <i>L_s</i>
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	11.2 ± 0.1 i	0.211 ± 0.009 g	270.2 ± 5.2 f	2.89 ± 0.11 i	4.0 ± 0.2 a	0.27 ± 0.01 a
	100	8.5 ± 0.2 g	0.101 ± 0.010 e	228.1 ± 13.1 de	1.30 ± 0.11 fg	7.0 ± 0.6 cd	0.41 ± 0.03 bc
	200	6.9 ± 0.3 f	0.071 ± 0.008 d	209.1 ± 14.3 bcd	0.79 ± 0.08 e	9.0 ± 0.7 ef	0.45 ± 0.04 cde
	300	5.3 ± 0.2 d	0.042 ± 0.001 c	165.0 ± 5.5 a	0.54 ± 0.04 cd	10.6 ± 0.3 g	0.56 ± 0.01 f
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	9.7 ± 0.1 h	0.123 ± 0.004 f	251.2 ± 1.7 ef	2.15 ± 0.10 h	4.5 ± 0.2 a	0.34 ± 0.00 ab
	100	6.0 ± 0.3 e	0.060 ± 0.003 d	205.3 ± 22.1 bcd	1.15 ± 0.06 f	5.4 ± 0.6 ab	0.47 ± 0.05 cde
	200	3.9 ± 0.0 c	0.030 ± 0.001 b	161.3 ± 9.1 a	0.61 ± 0.01 d	6.5 ± 0.2 bc	0.58 ± 0.02 f
	300	2.8 ± 0.1 a	0.020 ± 0.001 a	166.3 ± 12.0 a	0.45 ± 0.02 bc	6.2 ± 0.3 bc	0.58 ± 0.03 f
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	9.3 ± 0.1 h	0.104 ± 0.003 e	227.5 ± 7.3 de	1.45 ± 0.05 g	6.6 ± 0.2 bc	0.42 ± 0.01 bc
	100	4.1 ± 0.1 c	0.042 ± 0.004 c	214.4 ± 9.5 cd	0.55 ± 0.05 cd	8.3 ± 0.5 de	0.44 ± 0.02 cd
	200	3.4 ± 0.2 b	0.029 ± 0.001 b	183.8 ± 10.9 abc	0.38 ± 0.03 b	9.3 ± 0.4 efg	0.51 ± 0.02 def
	300	2.9 ± 0.0 ab	0.024 ± 0.002 ab	177.8 ± 18.3 ab	0.29 ± 0.03 a	10.3 ± 1.0 fg	0.54 ± 0.05 ef
<i>P</i> -Value	S	****	****	*	****	****	**
	T	****	****	****	****	****	****
	S × T	****	*	ns	*	**	ns

注：ns:不显著
Note: ns: not significant

蛋白质含量分别升高了 10.7、3.4 和 2.8 倍；苦楝叶中可溶性蛋白质含量仅在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下显著降低；白榆叶中可溶性蛋白在受到盐胁迫

后显著下降；而刺槐叶中可溶性蛋白在 100 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下却显著增加。

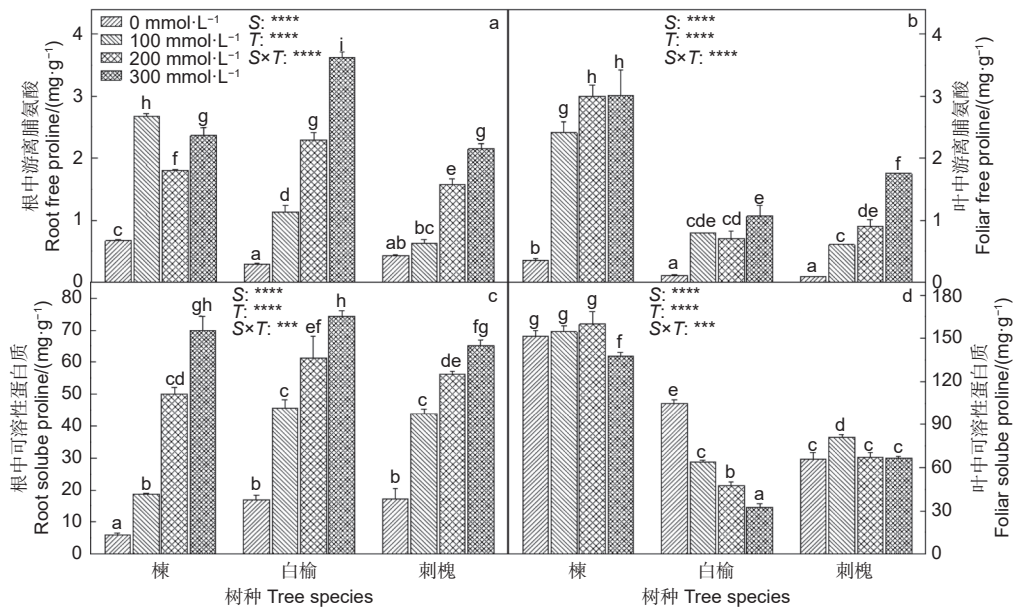


图 1 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中游离脯氨酸 (a, b) 和可溶性蛋白质 (c, d) 含量的影响

Fig. 1 The effects of NaCl on free proline (a, b) and soluble protein (c, d) contents in roots and leaves of of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*

2.3 NaCl 胁迫对各树种过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的影响

随着 NaCl 浓度增加，苦楝和白榆根和叶中 CAT 活性逐渐增强，与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，CAT 活性在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理的苦楝和白榆刺槐根中分别增加了 197.0% 和 408.0%，在叶中分别增加了 411.4% 和 204.3%（图 2）。刺槐根和叶中 CAT 活性在 100 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下分别比 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理升高了 43.2% 和 199.2%。在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，三者根和叶中 APX 活性分别比 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理提高了 1.7、5.6、3.1 倍和 3.3、3.2、1.9 倍。

2.4 NaCl 胁迫对各树种 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量及选择运输系数的影响

NaCl 胁迫使苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中的 Na⁺ 含量升高（表 4）。在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，苦楝、白榆和刺槐幼苗根中 Na⁺ 含量比 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理分别升高了 99.3%、601.2% 和 594.0%，叶中 Na⁺ 含量分别增加了 151.9、128.1 和 7.1 倍。另外，苦楝幼苗根中 Na⁺ 含量在不同浓度 NaCl 处理间无显著差异，白榆幼苗根中

Na⁺ 含量在 100 mmol·L⁻¹ 和 200 mmol·L⁻¹ NaCl 间无显著差异，但刺槐幼苗根中 Na⁺ 含量随 NaCl 浓度增加而显著升高。

与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，100 mmol·L⁻¹ 和 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理对苦楝幼苗根中 K⁺ 含量无显著影响，但使白榆和刺槐幼苗根中 K⁺ 含量显著降低（表 4）。与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使苦楝、白榆和刺槐幼苗根中 K⁺ 含量分别下降了 25.1%、56.5% 和 46.7%，但使三者幼苗叶中 K⁺ 含量分别升高了 12.5%、53.4% 和 39.5%。另外，NaCl 胁迫使苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中的 K⁺/Na⁺ 显著降低，与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，它们根和叶中的 K⁺/Na⁺ 分别降低了 62.5%、94.0%、92.3% 和 99.1%、98.8%、85.3%（表 5）。

NaCl 胁迫苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中 Ca²⁺ 含量的影响并不一致（表 4）。NaCl 胁迫对苦楝和刺槐幼苗根中 Ca²⁺ 含量无显著影响，但使白榆幼苗根中 Ca²⁺ 含量显著下降。与 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理相比，100 mmol·L⁻¹ NaCl 处理对苦

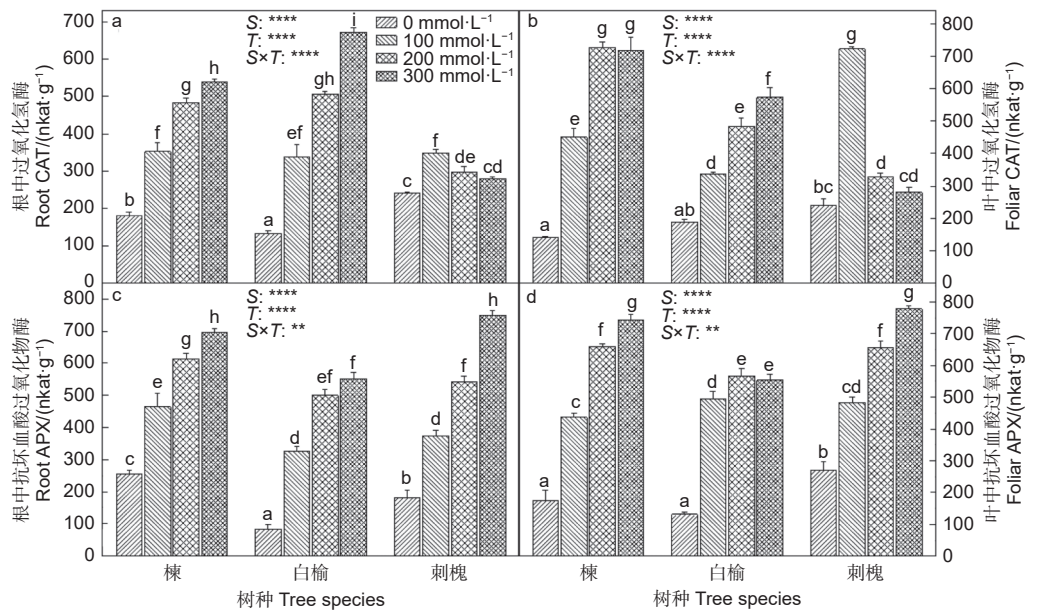


图 2 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中过氧化氢酶（a, b）和抗坏血酸过氧化物酶（c, d）活性的影响

Fig. 2 The effects of NaCl on CAT (a, b) and APX (c, d) activities in roots and leaves of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*.

表 4 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中离子含量的影响

Table 4 The effects of NaCl on the ion contents in roots and leaves of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*.

树种 Species	NaCl 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根 Root				叶 Foliar			
		Na ⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	K ⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	Ca ²⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	Mg ²⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	Na ⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	K ⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	Ca ²⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)	Mg ²⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	1.41 ± 0.21 a	11.88 ± 0.92 c	2.87 ± 0.13 a	1.97 ± 0.39 a	0.08 ± 0.01 a	18.99 ± 1.88 bcd	15.93 ± 0.66 b	4.74 ± 0.19 ef
	100	2.73 ± 0.12 b	12.04 ± 0.44 c	3.06 ± 0.38 a	2.10 ± 0.18 ab	0.57 ± 0.28 c	22.35 ± 0.22 fgh	15.17 ± 0.15 ab	3.67 ± 0.08 abc
	200	2.71 ± 0.36 b	11.49 ± 0.05 c	2.86 ± 0.15 a	1.80 ± 0.11 a	4.57 ± 1.28 e	22.82 ± 0.95 gh	13.09 ± 0.49 ab	3.40 ± 0.18 a
	300	2.81 ± 0.33 b	8.90 ± 0.77 b	2.86 ± 0.30 a	1.76 ± 0.15 a	12.23 ± 1.08 f	21.37 ± 0.84 efg	12.75 ± 0.34 a	3.36 ± 0.10 a
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	1.71 ± 0.15 ab	7.57 ± 0.43 b	10.32 ± 1.19 d	3.36 ± 0.11 de	0.08 ± 0.01 a	13.00 ± 0.19 a	23.23 ± 0.52 bc	5.26 ± 0.04 f
	100	8.50 ± 0.46 c	4.46 ± 0.28 a	8.26 ± 0.17 c	3.16 ± 0.15 de	0.15 ± 0.01 ab	17.28 ± 0.38 bc	23.17 ± 1.17 bc	4.64 ± 0.25 def
	200	9.02 ± 0.35 c	4.46 ± 0.15 a	8.05 ± 0.44 c	2.99 ± 0.07 cd	0.29 ± 0.03 bc	16.72 ± 0.41 b	22.01 ± 0.71 b	4.52 ± 0.23 de
	300	11.99 ± 0.36 d	3.29 ± 0.12 a	7.69 ± 0.72 c	2.99 ± 0.29 cd	10.33 ± 0.45 f	19.94 ± 0.32 def	20.62 ± 0.76 b	4.49 ± 0.16 de
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	1.99 ± 0.16 ab	16.52 ± 0.09 e	4.69 ± 0.12 b	2.59 ± 0.08 bc	0.21 ± 0.03 b	24.44 ± 1.09 hi	21.89 ± 0.25 b	4.05 ± 0.25 bcd
	100	9.11 ± 0.95 c	14.69 ± 0.07 d	4.42 ± 0.11 b	3.36 ± 0.07 de	1.41 ± 0.32 d	26.05 ± 1.30 ij	22.39 ± 0.20 b	3.61 ± 0.38 ab
	200	11.23 ± 0.06 d	12.24 ± 0.22 c	4.28 ± 0.09 b	3.59 ± 0.29 e	0.43 ± 0.05 c	27.89 ± 0.25 j	27.38 ± 1.37 d	4.09 ± 0.20 bcd
	300	13.81 ± 0.76 e	8.80 ± 0.74 b	5.03 ± 0.05 b	3.11 ± 0.09 cde	1.71 ± 0.22 d	34.10 ± 1.50 k	25.82 ± 2.04 cd	4.25 ± 0.28 cde
P-Value	S	****	****	****	****	****	****	****	****
	T	****	****	ns	ns	****	****	ns	**
	S × T	****	***	ns	*	****	**	**	*

表 5 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中离子含量比值的的影响

Table 5 The effects of NaCl on the ion ratios in roots and leaves of *M. azedarach*,
U. pumila and *R. pseudoacacia*

树种 Species	NaCl浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根 Root			叶 Foliar		
		K ⁺ /Na ⁺	Ca ²⁺ /Na ⁺	Mg ²⁺ /Na ⁺	K ⁺ /Na ⁺	Ca ²⁺ /Na ⁺	Mg ²⁺ /Na ⁺
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	8.59 ± 0.57 g	2.09 ± 0.20 d	1.38 ± 0.06 e	196.83 ± 10.49 h	196.26 ± 3.40 g	58.41 ± 1.77 g
	100	4.44 ± 0.31 f	1.14 ± 0.20 c	0.78 ± 0.10 d	36.88 ± 9.84 c	24.90 ± 6.45 d	6.24 ± 1.66 c
	200	4.37 ± 0.49 f	1.08 ± 0.08 c	0.68 ± 0.06 cd	3.78 ± 0.04 ab	2.17 ± 0.06 b	0.56 ± 0.00 a
	300	3.22 ± 0.33 e	1.04 ± 0.15 c	0.63 ± 0.02 c	1.76 ± 0.10 a	1.07 ± 0.13 a	0.28 ± 0.02 a
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	4.48 ± 0.23 f	6.02 ± 0.18 e	1.99 ± 0.13 f	161.41 ± 10.17 g	288.25 ± 18.53 h	65.35 ± 4.11 h
	100	0.53 ± 0.06 ab	0.98 ± 0.03 c	0.37 ± 0.01 b	113.64 ± 6.55 e	152.58 ± 4.22 f	29.57 ± 1.00 f
	200	0.50 ± 0.04 ab	0.90 ± 0.06 c	0.33 ± 0.02 b	60.72 ± 6.42 d	80.11 ± 7.02 e	16.41 ± 1.00 e
	300	0.27 ± 0.00 a	0.64 ± 0.05 b	0.25 ± 0.02 a	1.97 ± 0.19 a	2.02 ± 0.16 ab	0.44 ± 0.04 a
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	8.47 ± 0.75 g	2.39 ± 0.14 d	1.34 ± 0.02 e	139.15 ± 1.45 f	138.00 ± 1.25 f	27.11 ± 0.76 f
	100	1.67 ± 0.18 d	0.51 ± 0.07 ab	0.38 ± 0.03 b	21.18 ± 3.89 bc	16.74 ± 2.98 cd	2.87 ± 0.38 b
	200	1.09 ± 0.03 c	0.38 ± 0.01 a	0.32 ± 0.02 b	65.97 ± 6.84 d	65.03 ± 8.62 e	9.59 ± 0.69 d
	300	0.65 ± 0.09 b	0.38 ± 0.07 a	0.23 ± 0.01 a	20.47 ± 3.17 bc	14.67 ± 1.07 c	2.54 ± 0.17 b
P-Value	S	****	****	****	****	****	****
	T	****	****	****	****	****	****
	S × T	****	****	****	****	****	****

楝、白榆和刺槐幼苗叶中 Ca²⁺ 含量无显著影响；200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理对苦楝和白榆幼苗叶中 Ca²⁺ 含量无显著影响，但使刺槐幼苗叶中 Ca²⁺ 含量显著升高；300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使苦楝幼苗叶中 Ca²⁺ 含量显著降低，使刺槐幼苗叶中 Ca²⁺ 含量显著升高，但对白榆幼苗叶中 Ca²⁺ 含量无显著影响。苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中 Ca²⁺/Na⁺ 均在受到 NaCl 胁迫后显著降低，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使它们根中 Ca²⁺/Na⁺ 比 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理分别减少了 50.2%、89.4% 和 84.1%，使叶中 Ca²⁺/Na⁺ 分别减少了 99.5%、99.3% 和 89.4%。

NaCl 胁迫对苦楝和白榆幼苗根中 Mg²⁺ 含量没有显著影响，但使刺槐幼苗根中 Mg²⁺ 含量升高（表 4）。在叶中，NaCl 胁迫使苦楝和白榆幼苗的 Mg²⁺ 含量显著降低，但对刺槐幼苗没有显著影响。然而，NaCl 胁迫使苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中的 Mg²⁺/Na⁺ 显著降低，在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下，它们根和叶中的 Mg²⁺/Na⁺ 分别下降了 54.3%、87.4%、82.8% 和 99.5%、99.3%、90.6%。

苦楝幼苗的离子转运系数 S_{K,Na}、S_{Ca,Na} 和 S_{Mg,Na} 随着 NaCl 浓度增加而显著增大，在 300

mmol·L⁻¹ NaCl 处理下达到最大值，分别为 0 mmol·L⁻¹ NaCl 处理组的 39.3、85.1 和 96.3 倍（表 6）。100 mmol·L⁻¹ 和 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使白榆幼苗的离子转运系数显著降低，但 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理使其显著升高。刺槐幼苗的离子转运系数在 100 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下升高，但在 200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下下降，而 300 mmol·L⁻¹ NaCl 仅使 S_{Ca,Na} 和 S_{Mg,Na} 显著升高。

2.5 苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性综合评价

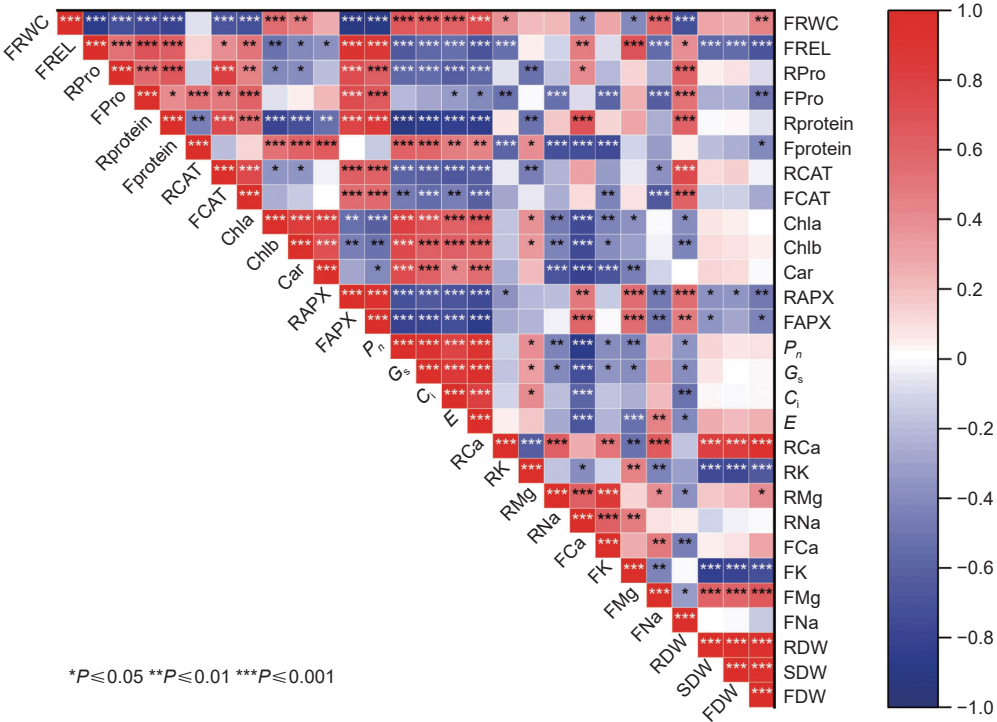
2.5.1 苦楝、白榆和刺槐幼苗耐盐性指标间的相关性分析 由相关系数矩阵可知（图 3），除个别指标间相关性较小外，其余指标之间存在显著相关关系，这使得它们提供的评价信息发生重叠。由于这些指标在植物适应盐胁迫中所发挥的作用不同，导致直接利用上述指标对苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性进行评价会产生较大的偏差，因此，需要进一步鉴定才能够筛选出适宜的耐盐指标。

2.5.2 苦楝、白榆和刺槐幼苗耐盐性指标间的主成分分析 对不同 NaCl 浓度下苦楝、白榆和刺槐幼苗的这些指标进行主成分分析，结果如表 7。前 4 个综合评价指标（CI）的贡献率分别为 42.8%、25.6%、15.6% 和 3.9%，累计贡献率为 87.9%，

表 6 NaCl 对苦楝、白榆和刺槐幼苗 $S_{K, Na}$ 、 $S_{Ca, Na}$ 和 $S_{Mg, Na}$ 的影响

Table 6 The effect of NaCl on $S_{K, Na}$, $S_{Ca, Na}$ and $S_{Mg, Na}$ of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*

树种Species	NaCl浓度/ (mmol·L ⁻¹)	$S_{K, Na}$	$S_{Ca, Na}$	$S_{Mg, Na}$
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0	0.047 ± 0.003 ef	0.012 ± 0.000 b	0.024 ± 0.001 b
	100	0.180 ± 0.027 h	0.068 ± 0.004 f	0.178 ± 0.012 g
	200	1.156 ± 0.133 i	0.497 ± 0.046 h	1.219 ± 0.112 i
	300	1.849 ± 0.262 j	1.021 ± 0.211 i	2.311 ± 0.234 j
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0	0.028 ± 0.001 d	0.021 ± 0.002 cd	0.030 ± 0.000 c
	100	0.005 ± 0.000 a	0.007 ± 0.000 a	0.013 ± 0.001 a
	200	0.009 ± 0.000 b	0.011 ± 0.000 b	0.021 ± 0.000 b
	300	0.143 ± 0.016 h	0.318 ± 0.021 g	0.568 ± 0.042 h
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0	0.060 ± 0.006 fg	0.017 ± 0.001 c	0.046 ± 0.008 d
	100	0.077 ± 0.010 g	0.029 ± 0.003 de	0.127 ± 0.011 f
	200	0.017 ± 0.002 c	0.006 ± 0.001 a	0.033 ± 0.000 c
	300	0.040 ± 0.008 de	0.030 ± 0.004 e	0.093 ± 0.007 e
P -Value	S	****	****	****
	T	****	****	****
	S × T	****	****	****



注/Notes: FRWC: 叶片相对含水量, Foliar relative water content; FREL: 叶片电解质渗透率, Foliar relative electrolytic leakage; RPro: 根游离脯氨酸, Root free proline; FPro: 叶游离脯氨酸, Foliar free proline; Rprotein: 根可溶性蛋白质, Root soluble protein; Fprotein: 叶可溶性蛋白质, Foliar soluble protein; RCAT: 根 CAT 活性, Root CAT activity; FCAT: 叶 CAT 活性, Foliar CAT activity; Chla: 叶绿素 a, Chlorophyll a; Chlb: 叶绿素 b, Chlorophyll b; Car: 类胡萝卜素, carotenoid; RAPX: 根 APX 活性, Root APX activity; FAPX: 叶 APX 活性, Foliar APX activity; P_n : 净光合速率, Net photosynthetic rate; G_s : 气孔导度, Stomatal Conductance; C_i : 胞间 CO_2 浓度, Intercellular CO_2 concentration; E : 蒸腾速率, Evaporation rate; RCa: 根中 Ca^{2+} , Ca^{2+} in roots; RK: 根中 K^+ , K^+ in roots; RMg: 根中 Mg^{2+} , Mg^{2+} in roots; RNA: 根中 Na^+ , Na^+ in roots; FCa: 叶中 Ca^{2+} , Ca^{2+} in leaves; FK: 叶中 K^+ , K^+ in leaves; FMg: 叶中 Mg^{2+} , Mg^{2+} in leaves; FNa: 叶中 Na^+ , Na^+ in leaves; RDW: 根干质量, Dry weight of roots; SDW: 茎干质量, Dry weight of stems; FDW: 叶干质量, Dry weight of leaves; 下同, The same below

图 3 苦楝、白榆和刺槐幼苗的 28 个指标间相关系数矩阵

Fig. 3 Correlation coefficient matrix and significance of variation of 28 indexes of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*

表 7 苦楝、白榆和刺槐幼苗中各综合指标系数及贡献率

Table 7 The coefficients and contribution ratio of comprehensive indicators of principal component of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia* seedlings

主成分	CI1	CI2	CI3	CI4
特征值	11.983	7.177	4.360	1.096
贡献率/%	42.800	25.632	15.572	3.913
累计贡献率/%	42.800	68.427	83.999	87.912
特征向量				
FRWC	0.256	0.112	-0.108	-0.109
FREL	-0.241	-0.144	-0.083	0.206
RPro	-0.205	-0.006	0.212	0.219
FPro	-0.154	-0.232	0.182	0.099
Rprotein	-0.267	0.086	0.089	0.003
Fprotein	0.094	-0.300	0.116	0.198
RCAT	-0.202	-0.010	0.282	-0.181
FCAT	-0.179	-0.122	0.187	-0.440
Chla	0.217	-0.156	0.082	-0.191
Chlb	0.198	-0.156	0.088	-0.207
Car	0.159	-0.199	0.232	-0.120
RAPX	-0.258	-0.101	0.045	0.216
FAPX	-0.270	-0.051	0.010	0.050
P_n	0.264	-0.128	0.048	0.088
G_s	0.254	-0.118	0.004	0.286
C_i	0.236	-0.088	-0.075	0.097
E	0.268	-0.039	0.038	0.279
RCa	0.052	0.338	0.114	-0.090
RK	0.076	-0.236	-0.292	-0.292
RMg	-0.033	0.290	-0.219	-0.170
RNa	-0.202	0.199	-0.158	0.091
FCa	-0.024	0.274	-0.288	-0.016
FK	-0.157	-0.113	-0.338	0.070
FMg	0.131	0.259	0.011	0.392
FNa	-0.167	-0.071	0.256	0.080
RDW	0.090	0.238	0.325	0.027
SDW	0.077	0.249	0.317	-0.005
FDW	0.103	0.296	0.215	-0.079

已经对苦楝、白榆和刺槐幼苗的大多数指标信息给出了充分的概括，因此，可将 28 个初始测定指标转换为 4 个相互独立的综合指标，分别为 CI1、CI2、CI3 和 CI4。数据显示，对 CI1 贡献较大的指标有叶片相对含水量、根中可溶性蛋白质、根和叶中 APX 活性、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率；CI2 主要和叶中可溶性蛋白质、根和叶中 Mg^{2+} 、叶中 Ca^{2+} 和叶片干质量相关；在 CI3 中贡献较大的指标有根中 CAT、根和叶中 K^{+} 、叶中 Ca^{2+} 和 Na^{+} 、根和茎干质量；对 CI4 贡献较大的指标为气孔导读、蒸腾速率、根中 K^{+} 、叶中 Mg^{2+} 。同时根据 28 个直接测定指标在盐胁迫下的标准化值及各综合指标的特征向量系数，计算出苦楝、白榆和刺槐幼苗的 4 个综合指标值。

2.5.3 隶属函数分析及权重的确定 苦楝、白榆和刺槐幼苗各综合指标的隶属函数值使用以下公式计算： $\mu_i = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$ 。其中， X_i 为苦楝、白榆和刺槐幼苗的第 i 个综合指标值， X_{imin} 和 X_{imax} 分别为该综合指标值中的最小值和最大值。根据公式求出苦楝、白榆和刺槐幼苗所有综合指标的隶属函数值（表 8）。

利用公式 $Wi = Pi / \sum_{i=1}^n Pi$ ，根据各综合指标贡献率的大小计算各综合指标在主成分贡献率中的权重。其中， Wi 表示第 i 个综合指标的权重； Pi 表示苦楝、白榆和刺槐幼苗的第 i 个综合指标的贡献率。经计算，求得 4 个综合指标的权重分别为 0.487、0.292、0.177 和 0.045。利用公式 $D = \sum_{i=1}^n [\mu_i \times Wi]$ 计算苦楝、白榆和刺槐幼苗的综合耐盐性评价价值 (D)。结果发现， D 值最高的为白榆 (0.970)、最低的为刺槐 (0.148)，表明白榆幼苗的耐盐性在三者中最强，刺槐幼苗的耐盐性最弱（表 8）。

表 8 苦楝、白榆和刺槐幼苗的综合指标值、权重、隶属函数值和综合评价价值

Table 8 The value of comprehensive index, index weight, subordinative function and comprehensive evaluation of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia* seedlings

树种Species	综合指标值				隶属函数值				综合评价价值 D
	CI1	CI2	CI3	CI4	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	
苦楝 <i>Melia azedarach</i> L.	0.553	-3.159	1.142	0.388	0.999	0.000	0.910	1.000	0.693
白榆 <i>Ulmus pumila</i> L.	0.555	3.114	1.515	-0.067	1.000	1.000	1.000	0.359	0.970
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	-1.108	0.045	-2.657	-0.321	0.000	0.511	0.000	0.000	0.148
权重					0.487	0.292	0.177	0.045	

注：CI为综合指标值
Notes: CI represents comprehensive index

2.6 关键耐盐指标筛选

使用灰色关联分析法筛选苦楝、白榆和刺槐幼苗的关键性耐盐指标。将 3 个树种的耐盐综合评价值 (D , 表 8) 及测定得到的 28 个指标作为一个整体。其中, 耐盐综合评价值为因变量, 其余生理生化指标为自变量。将自变量进行标准化处理后, 计算因变量和各自变量之间的关联系数及关联度^[8]。结果发现, 根中游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量, 根和叶中 CAT 和 APX 活性, 根中 Ca^{2+} 和叶中 Na^{+} 含量与苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性关联度较高 (表 9)。

表 9 28 项耐盐指标的关联度
Table 9 The degree of association of 28 salt indexes

指标 Index	关联度 Correlation degree	排序 Sequence
FRWC	0.549	24
FREL	0.685	9
RPro	0.859	2
FPro	0.626	15
Rprotein	0.761	6
Fprotein	0.564	22
RCAT	0.869	1
FCAT	0.784	3
Chla	0.612	18
Chlb	0.650	12
Car	0.613	17
RAPX	0.768	4
FAPX	0.738	7
P_n	0.558	23
G_s	0.545	25
C_i	0.575	20
E	0.529	27
RCa	0.704	8
RK	0.612	19
RMg	0.567	21
RNa	0.617	16
FCa	0.537	26
FK	0.521	28
FMg	0.631	14
FNa	0.762	5
RDW	0.665	10
SDW	0.639	13
FDW	0.661	11

3 讨论

土壤中过量的盐分会影响植物正常的生理发育过程, 导致植物生长减缓、光合作用减弱、渗透调节物质和抗氧化酶活性改变等, 最终阻碍了植物生物量的累积^[5, 13-14, 21-22]。生物量作为植物耐盐性评价的最可靠指标, 是植物响应盐胁迫的综合表现特征^[23]。本研究中, NaCl 抑制了苦楝、白榆和刺槐幼苗的生物量, 并且对刺槐幼苗生物量的抑制最强。叶片相对含水量是衡量植物水分状况的重要指标之一, 盐胁迫会降低植物根系向地上部分的水分运输^[13]。本研究发现 NaCl 胁迫导致苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片的相对含水量显著降低, 且在 $300\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 处理下降低幅度大小为苦楝 > 刺槐 > 白榆。电解质渗透率是衡量植物细胞膜完整性的重要指标之一^[24]。盐胁迫会导致植物叶片膜系统受损、电解质外渗, 使电解质渗透率升高, 在相同 NaCl 浓度下, 三种幼苗叶片电解质渗透率升高幅度大小为刺槐 > 白榆 > 苦楝。叶片相对含水量下降及膜系统受损引起叶绿体结构破坏、叶绿素酶活性升高, 导致叶绿体色素合成受阻或者分解加快^[13, 25]。本研究发现, 苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片的色素含量在 NaCl 处理下出现不同程度下降^[2], 使植物光合作用受阻、光合参数降低。在相同 NaCl 浓度下 P_n 降低幅度大小为刺槐 $\geq$ 白榆 > 苦楝。 WUE 反映了植物对外界环境的适应能力^[13], L_s 反映了 NaCl 胁迫对叶片气孔通过气体能力的影响。NaCl 处理使苦楝、白榆和刺槐幼苗叶片的 WUE 和 L_s 升高, 说明 NaCl 提高了 3 种幼苗叶片的 WUE 但限制了气孔功能。

盐胁迫破坏植物的渗透势, 导致细胞内渗透失衡^[26-27]。脯氨酸和可溶性蛋白质是调节植物细胞渗透势的重要有机物质, 能够增强植物对盐胁迫的适应能力^[28-31]。本研究中, 苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中游离脯氨酸含量, 以及根中可溶性蛋白质含量在受到 NaCl 胁迫后增加, 其中苦楝根中积累量高于白榆和刺槐, 表明苦楝根的渗透调节能力强于白榆和刺槐。盐胁迫还对植物造成氧化胁迫, 使植物体内抗氧化酶活性增强^[13, 26, 32-33], 从而加快对细胞内过量活性氧的清除, 抑制细胞膜的过氧化, 尽可能保证植物正常的生理代谢过程^[34]。本研究发现, 苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中 CAT 和 APX 的活性在受到 NaCl 胁迫后均显著升高, 并且

在同一 NaCl 浓度下, 白榆幼苗根中 CAT 活性最强, 苦楝幼苗叶中 CAT 活性强于白榆和刺槐; 根中 APX 活性大小排序为白榆 > 刺槐 > 苦楝, 叶中 APX 活性强弱排序为白榆 > 苦楝 > 刺槐, 表明白榆清除活性氧、维持细胞膜稳定的能力强于苦楝和刺槐。

矿物质离子在植物适应盐胁迫过程中起着重要作用^[5, 28]。本研究中, NaCl 胁迫导致苦楝、白榆和刺槐幼苗根和叶中 Na⁺ 含量显著升高, 并且苦楝幼苗根中 Na⁺ 升高程度小于白榆和刺槐, 但叶中 Na⁺ 却相反; 表明在较高浓度的 NaCl 胁迫下, 白榆和刺槐倾向于把 Na⁺ 留存在根中, 而苦楝则倾向于把 Na⁺ 转移到叶中。同时, 苦楝幼苗叶片的离子选择运输系数 $S_{K, Na}$ 、 $S_{Ca, Na}$ 和 $S_{Mg, Na}$ 在受到 NaCl 胁迫后显著增加, 表明 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 向叶片的选择性运输增强; 而白榆和刺槐幼苗的离子选择系数变化趋势与苦楝幼苗并不一致。这表明, 3 种幼苗可能采取了不同措施应对 NaCl 胁迫。

植物的耐盐性是受众多指标控制的综合性状, 而各指标间也存在着相互关系^[35]。因此, 通过单一指标存在局限性, 不能有效的评价不同植物的耐盐性, 而采用生长、生理、生化等多种指标可以准确的筛选耐盐性植物^[9-10, 35]。本研究通过相关性分析、主成分分析、隶属函数法及灰色关联分析等方法对苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性进行综合评价, 并筛选关键的耐盐性鉴定指标, 发现白榆幼苗的耐盐性最强, 刺槐幼苗的耐盐性最差。然而, 植物在不同的土壤中以及不同的生长发育阶段, 其耐盐性是不同的。而本文仅探讨了苦楝、白榆和刺槐幼苗适应 NaCl 胁迫的生长、生理、生化指标变化, 故此仍需深入研究它们在土壤盐分环境中的响应差异。

4 结 论

本研究采用生长、生理、生化指标来评价苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐能力, 分析比较了三者在不同 NaCl 浓度下的生长、生理和生化响应差异, 并通过综合评价, 初步确定了苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐能力强弱为白榆 > 苦楝 > 刺槐。同时, 发现根中游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量、根和叶中 CAT 和 APX 活性、根中 Ca²⁺ 和叶中 Na⁺ 含量与苦楝、白榆和刺槐幼苗的耐盐性关联度较

高, 这些指标反映了苦楝、白榆和刺槐幼苗响应 NaCl 胁迫下的渗透调节能力、抗氧化能力和对离子的选择吸收转运能力, 可以用来评价苦楝、白榆和刺槐幼苗对盐胁迫的适应能力。

参考文献:

- [1] RAO Y, PENG T, XUE S W. Mechanisms of plant saline-alkaline tolerance[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 281: 153916.
- [2] HARFOUCHE A, MEILAN R, ALTMAN A. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement[J]. Tree Physiology, 2014, 34(11): 1181-1198.
- [3] LIU C H, LU R J, GUO G M, et al. Transcriptome analysis reveals translational regulation in barley microspore-derived embryogenic callus under salt stress[J]. Plant Cell Reports, 2016, 35(8): 1719-1728.
- [4] MENG F J, LUO Q X, WANG Q Y, et al. Physiological and proteomic responses to salt stress in chloroplasts of diploid and tetraploid black locust (*Robinia pseudoacacia* L.)[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23098.
- [5] ZELM E V, ZHANG Y, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2020, 71(1): 403-433.
- [6] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [7] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- [8] 杨 升, 刘正祥, 张华新, 等. 3 个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学, 2013, 49(1): 91-98.
- [9] 余如刚, 张 迪, 余心悦, 等. 13 种小白菜苗期耐盐比较分析及耐性指标筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 24-31.
- [10] YU R G, WANG G L, YU X Y, et al. Assessing alfalfa (*Medicago sativa* L.) tolerance to salinity at seedling stage and screening of the salinity tolerance traits[J]. Plant Biology, 2021, 23(4): 664-674.
- [11] AFSAR S, BIBI G, AHMAD R, et al. Evaluation of salt tolerance in *Eruca sativa* accessions based on morpho-physiological traits[J]. Peer J, 2020, 8(1): e9749.
- [12] LI W H, ZHANG H Z, ZENG Y L, et al. A salt tolerance evaluation method for sunflower (*Helianthus annuus* L.) at the seed germination stage[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 10626.
- [13] 甘红豪, 赵 帅, 杨泽坤, 等. 刺槐幼苗对 NaCl 胁迫的生理生化响应[J]. 林业科学研究, 2020, 33(4): 75-82.
- [14] 甘红豪, 赵 帅, 高明远, 等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下白榆幼苗光合作用及离子分配的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 478-489.

- [15] 何维明, 马风云. 水分梯度对沙地柏幼苗荧光特征和气体交换的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24 (5): 630-634.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] WELLBURN A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 144(3): 307-313.
- [18] TAMÁS L, DUDÍKOVÁ J, ĐURČEKOVÁ K, *et al.* Alterations of the gene expression, lipid peroxidation, proline and thiol content along the barley root exposed to cadmium[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(11): 1193-1203.
- [19] LUO Z B, CALFAPIETRA C, SCARASCIA-MUGNOZZA G, *et al.* Carbon-based secondary metabolites and internal nitrogen pools in *Populus nigra* under free air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen fertilisation[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1): 45-57.
- [20] POLLE A, CHAKRABARTI K, SCHURMANN W, *et al.* Composition and properties of hydrogen peroxide decomposing systems in extracellular and total extracts from needles of Norway Spruce (*Picea abies* L., Karst.)[J]. Plant Physiology, 1990, 94(1): 312-319.
- [21] WANG W C, PANG J Y, ZHANG F H, *et al.* Integrated transcriptomics and metabolomics analysis to characterize alkali stress responses in canola (*Brassica napus* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 166: 605-620.
- [22] ZHOU Y, TANG N Y, HUANG L J, *et al.* Effects of salt stress on plant growth, antioxidant capacity, glandular trichome density, and volatile exudates of *Schizonepeta tenuifolia* Briq[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(1): 252.
- [23] 燕丽萍, 吴德军, 王因花, 等. 4种白蜡的耐盐性响应特征与综合评价[J]. 西北植物学报, 2019, 39 (7): 1270-1278.
- [24] MANSOUR M M F, SALAMA K H A. Cellular basis of salinity tolerance in plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52(2): 113-122.
- [25] 高明远, 甘红豪, 李清河, 等. 外源水杨酸对盐胁迫下白榆生理特性的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31 (6): 138-143.
- [26] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. Cell, 2016, 167(2): 313-324.
- [27] ZHU J F, YANG X Y, LIU Z X, *et al.* Identification and target prediction of microRNAs in *Ulmus pumila* L. seedling roots under salt stress by high-throughput sequencing[J]. Forests, 2016, 7(12): 318.
- [28] IQBAL N, UMAR S, KHAN N A, *et al.* A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: regulation of proline metabolism[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 100: 34-42.
- [29] LI H Y, TANG X Q, YANG X Y, *et al.* Comprehensive transcriptome and metabolome profiling reveal metabolic mechanisms of *Nitraria sibirica* Pall. to salt stress[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 12878.
- [30] TALBI ZRIBI O, BARHOUMI Z, KOUAS S, *et al.* Insights into the physiological responses of the facultative halophyte *Aeluropus litoralis* to the combined effects of salinity and phosphorus availability[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 189: 1-10.
- [31] TANG H L, NIU L, WEI J, *et al.* Phosphorus limitation improved salt tolerance in maize through tissue mass density increase, osmolytes accumulation, and Na⁺ uptake inhibition[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 856.
- [32] 苏丹, 李红丽, 董智, 等. 盐胁迫对白榆无性系抗氧化酶活性及丙二醛的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14 (2): 9-16.
- [33] 朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 等. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35 (15): 5140-5146.
- [34] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses[J]. New Phytologist, 2018, 217(2): 523-539.
- [35] 罗达, 史彦江, 宋锋惠. 平欧杂种榛幼苗对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 生态学杂志, 2023, 42 (1): 1-8.

Comprehensive Evaluation and Index Screening of Salt Tolerance for Three Afforestation Specie Seedlings in China

GAN Hong-hao¹, GONG Shuai¹, LIU Hao¹, CHU Jian-min^{1,2}

(1. Coastal Forestry Research Center, National Forestry and Grassland Administration; Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To study the differences in salt tolerance among the *Melia azedarach*, *Ulmus pumila* and *Robinia pseudoacacia* seedlings and to select the evaluation indexes of salt tolerance. [Method] Based on the one-year-old seedlings of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia*, the effects of different NaCl concentrations (0, 100, 200 and 300 mmol·L⁻¹) on the seedling biomass, physiological and biochemical indexes were analyzed. [Result] (1) NaCl stress inhibited the biomass of *M. azedarach*, *U. pumila* and *R. pseudoacacia* seedlings, decreased the relative water content of leaves and increased the electrolyte permeability. (2) The contents of chlorophyll a and b in *R. pseudoacacia* decreased significantly with the increase in NaCl concentration. But the chlorophyll content in *M. azedarach* and *U. pumila* seedlings only decreased significantly under 300 mmol·L⁻¹ NaCl treatment. The photosynthetic parameters *Pn*, *Gs*, *Ci* and *E* decreased under NaCl stress in the 3 tree seedlings, but the stomatal limitation and water use efficiency increased. Meanwhile, the concentrations of free proline and soluble protein, as well as the activities of CAT and APX in roots and leaves also increased. (3) NaCl stress changed the ion balance in the roots and leaves of the 3 tree seedlings. The Na⁺ concentration in roots and leaves and K⁺ concentration in leaves of the 3 tree seedlings significantly increased under NaCl stress, but the concentration of K⁺ in roots, as well as the concentrations of Mg²⁺ and Ca²⁺ in roots and leaves had differential changes. [Conclusion] The seedlings of *U. pumila* have the strongest salt tolerance, followed by *M. azedarach*, *R. pseudoacacia*. The concentrations of free proline and soluble protein in roots, CAT and APX activities in roots and leaves, Ca²⁺ in roots and Na⁺ in leaves are highly correlated with salt tolerance of the 3 tree seedlings, which can be used as the evaluation indexes of salt tolerance.

Keywords: salinization; salt tolerance; adaptability evaluation; salt tolerance index

(责任编辑：张 研)