

梓树 6 个种源耐盐性差异的生物测定

李媛^{1,2}, 李志辉², 苗晓娟¹, 王智¹, 王军辉¹, 麻文俊^{1*}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 楸树国家创新联盟, 北京 100091; 2. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004)

摘要: [目的] 为选择出抗盐性强的梓树种源作为楸树的嫁接砧木, 拓展楸树的适生范围, 旨在为选择耐盐梓树种源提供理论依据。 [方法] 以 6 个梓树种源的种子为材料, 设置 4 个 NaCl 浓度梯度 (0.0%、0.3%、0.6%、1.0%) 开展种子萌发试验, 观察其种子萌发状况, 测定各胁迫处理 20 d 后芽苗生长表现、酶活性以及脯氨酸、MDA 等可溶性物质的变化规律, 计算各指标的相关指数选择评价指标, 利用模糊数学中的隶属函数法结合权重综合评价各梓树种源的耐 NaCl 能力。 [结果] 6 个梓树种源种子的长度、宽度、长宽比、种翅长、千粒质量以及在盐胁迫下的芽苗中的 MDA、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量和 SOD、POD、CAT 活性均差异极显著, 胚根、胚轴、幼苗的长度差异显著; 各种源种子发芽的盐胁迫临界浓度 (NaCl 浓度) 为 0.6%; 运用临界 NaCl 浓度下的指标数据进行综合评价得出梓树抗盐性排名, 其耐 NaCl 性由大到小为辽宁桓仁、甘肃正宁、湖北襄阳、湖南吉首、贵州兴仁和河南洛阳。 [结论] 在盐渍土进行楸树嫁接苗繁育时, 适宜选择辽宁桓仁种源梓树苗木作为其嫁接砧木。

关键词: 耐盐性; 嫁接; 种源; 梓树

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)06-0106-09

楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Mey) 为紫葳科 (Bignoniaceae) 梓树属 (*Catalpa* Scop.) 高大落叶乔木, 是传统栽培的著名观赏和珍贵用材树种, 其木材具有纹理美观、耐腐蚀和潮湿等优良特性^[1-2]。近年来, 我国对珍贵材的需求逐渐增大, 其价格也不断上涨, 但是由于国内珍贵木材供给量骤降, 导致供需缺口不断扩大。因此, 在保证楸树优良性状的前提下, 发展楸树人工林培育, 成为缓解国内高档木材供需矛盾的关键^[3]。截至目前, 已有大量关于楸树无性繁殖技术方面的研究报道, 且显著提升了繁殖效率^[4-6], 其中, 扦插技术环节繁琐, 萌芽率与扦插成活率相对较低; 组织培养和胚体繁殖要求专业性较高、技术性强; 而嫁接技术相对要求较低、成活率高, 易于快速应用推广。随着我国北方和中部地区乡土珍贵树种产业的快速发展, 楸树优良新品种栽培面积迅速扩大。在楸树优良新品种推广应用过程中, 由于与楸树同属的梓树 (*Catalpa ovata* G. Don) 具有结实量大、根系发达、生长迅速且抗逆性强与实生苗繁育

简便等特点, 成为楸树嫁接繁殖的理想砧木^[7-8]。目前, 以梓树为砧木繁殖嫁接的灰楸苗不仅繁殖快、成活率高, 且具有较高的遗传品质和较强的抗逆性, 因此, 楸树砧木嫁接得以快速应用^[7]。

国内外的研究中, 针对木本植物的抗盐性研究主要集中在沿海防护林、经济林等树种^[9]。王新建等^[10]指出, 抗旱性较强的砧木能有效减少豫楸嫁接苗的膜质过氧化影响, 从而使其抗性增加, 提高栽培效率。孙宁等^[11]提出, 嫁接木的耐盐性取决于砧木的抗性, 且苹果的耐盐力主要是通过使用较高抗盐性的砧木实现。此外, 具有优良性状的砧木提高嫁接苗的抗性在“红富士苹果”^[12]、葡萄 (*Vitis vinifera* L. Fl. Sp.)^[13]、细齿樱桃 (*Prunus serrulata* Franch. Pl. Delav.)^[14]、梅花 (*Armeniaca mume* Sieb. in Verh. Batav. Genoot. Kunst. Wetensch.)^[15] 的研究中均有体现。目前, 楸树无性繁殖的发展面临瓶颈, 体现在良种采穗圃的营建技术以及嫁接砧木的选择上。梓树在我国广泛分布, 由于不同地区土壤的盐碱度有

收稿日期: 2017-07-12 修回日期: 2019-08-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“楸树优质高抗良种选育研究”(CAFYBB2017ZA001-8)

* 通讯作者: 麻文俊, 助理研究员, Email: mwjlx@msn.com

所不同,不同种源的耐盐性也可能存在着较大差异;而不同砧木嫁接后,嫁接苗的耐盐性具有差异,且砧木与嫁接苗的耐盐性的强弱成正比^[16-21],因此,解决楸树嫁接繁育中的砧木选择问题变得尤为重要。本文对采自于6个种源的梓树种子进行NaCl模拟盐胁迫处理,分析不同种源种子萌发和芽苗生长的抗盐性,旨在为楸树优良新品种嫁接苗繁育选择适

宜的梓树种源提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为梓树6个种源种子,详细信息见表1。

表1 参试种子来源

Table 1 The seed sources involved in the present study

种源编号 Provenances number	种源 Provenances	家系数量 Number of family	海拔 Altitude /m	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	年均降水量 Annual rainfall /mm	年均气温 Annual temperature /℃	无霜期 Frost-free day / d	pH 值 pH value	盐化程度 Electropositive degree
HN	湖南吉首 Jishou of Hunan	10	281	109°69'	28°23'	1 446.8	17.3	326	6	轻度
HB	湖北襄阳 Xiangyang of Hubei	10	175	112°01'	32°00'	878.3	16.5	241	6	轻度
GS	甘肃正宁 Zhengning of Gansu	6	1 081	108°47'	35°39'	694.8	9.0	173	8	重度
HEN	河南洛阳 Luoyang of Henan	10	354	111°54'	34°35'	578.2	14.9	218	8	中度
GZ	贵州兴仁 Xingren of Guizhou	10	1 531	105°04'	25°32'	1 314.8	15.2	280	6	轻度
LN	辽宁桓仁 Huanren of Liaoning	10	297	124°12'	41°27'	661.4	7.4	153	8	重度

1.2 试验设计与方法

1.2.1 种子性状测定 每个种源测定10株(GS种源测定6株),每株随机选择90粒种子测定种子长度(SL)、种子宽度(SW)和种翅长度(SWL),精确到0.01 mm,测定后计算单株平均值。每个种源随机抽取混合种子4份,每份200粒,用电子天平称质量(精度为0.001 g),换算为千粒质量(TKW)。

1.2.2 种子NaCl胁迫处理 试验设置4种NaCl浓度:0.0%、0.3%、0.6%和1.0%,以6个种源的种子为材料,进行模拟盐胁迫处理,0.0%的NaCl浓度为对照。分别将每个种源内各单株的种子进行等量混合,以混合种子为材料铺设萌发试验,进行NaCl胁迫处理。每种处理设置4次重复,每重复100粒。

1.2.2.1 种子预处理 播种前一天,每个种源种子用浓度为4‰的高锰酸钾溶液消毒1 h,用清水将高锰酸钾冲洗干净,40℃温水浸泡(让其自然冷却)23 h。

1.2.2.2 播种和盐胁迫处理 依据试验设计,用不同浓度的NaCl溶液浸泡定性滤纸;然后分别将不同处理的滤纸铺在培养皿底部,每个培养皿中铺入2张,并将种子整齐摆放在滤纸上面,使种子和滤纸充分接触;最后向每个培养皿中加入10 mL NaCl溶

液,并用电子天平称质量(精度为0.01 g),编号。

1.2.2.3 培养条件 将不同处理下的种子放入光照培养箱(HPG-280BX)中培养。光照:光强12 000 Lx,28℃,8:00—18:00;黑暗:23℃,18:00—8:00。

1.2.2.4 补水 由于培养过程中会造成失水,所以每天8:00—9:00每个培养皿分别称质量(精度为0.01 g),补充去离子水,保持NaCl溶液的浓度基本稳定。

1.2.3 种子发芽率调查和芽苗测定

1.2.3.1 种子发芽调查 培养3 d后,每天调查各培养皿中种子发芽数量。发芽的标准为胚根长度达到种子长度的1/2^[22]。

1.2.3.2 芽苗测定 培养17 d后测定芽苗的胚根长度和胚轴长度,测定精度为0.1 cm。每个处理下每次重复选择长势均一的5株芽苗进行测定。

1.3 数据处理

用Excel 2007和SPSS 16.0进行数据处理、统计分析和图表制作。采用单因素方差分析检验不同种源梓树种子形态、萌发和幼苗生长性状是否存在显著差异,多重比较采用Duncan法。

发芽率 = 种子发芽数 / 供试种子数 × 100%

相对发芽率 = 种子发芽率 / 对照发芽率 × 100%

发芽势 = 发芽达到高峰期的种子发芽数/供试种子数 × 100%

发芽指数 $GI = \sum (Gt/Dt)$

式中: Gt 为第 t 天发芽数, Dt 为发芽的天数。

活力指数 $VI = GI \times L$

式中: L 为幼苗长度 (cm)。

运用 SPSS 16.0 对测定性状进行聚类分析和 Person 相关分析, 各性状聚类分析前统一进行 Z 得分标准化处理, 聚类方法采用 Ward 法。通过公式 (1) 计算相关指数大小来确定评价指标^[23], 相关指数越大, 其指标的代表性越强。

$$R_i^2 = \sum r^2 / (n - 1) \quad (1)$$

式中: R_i 为各类每个指标的相关指数; n 为各类指标的性状个数; r 为同类中某项与其它指标间的相关系数。

采用隶属函数法结合各指标的权重评价不同种源梓树的抗盐能力差异^[24-25]。同时, 为了合理评价各种源对 NaCl 胁迫的敏感性, 采用梓树种子发芽临界浓度的处理数值作为评价指标值。通过隶属函数公式, 计算各指标的隶属函数值。当指标与抗盐性呈正相关, 则用公式 (2); 当指标与抗盐性呈负相关, 则用公式 (3)。

$$\mu(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (2)$$

$$\mu(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (3)$$

式中: $\mu(X_{ij})$ 为 i 种源 j 指标的隶属函数值, X_{ij} 为 i 种源 j 指标的值, X_{jmax} 为各种源 j 指标值中的最大值; X_{jmin} 为该指标中的最小值。

采用标准系数法确定不同指标的权重, 依次计算标准差系数 V_j 与各指标的权重 W_j 。

$$V_j = \sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2) / \bar{X}_j} \quad (4)$$

$$W_j = V_j / \sum_{i=1}^m V_j \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为 i 种源 j 指标的值, \bar{X}_j 为 j 指标的平均值。

由此用公式 (6) 求出不同种源的综合评价价值, 来表示其抗盐性。

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad (6)$$

式中: $\mu(X_j)$ 为种源 j 指标的隶属函数值, W_j 为 j 指标权重, D 为综合评价。

最后根据 D 值对各梓树种源的抗盐性进行评价。

2 结果与分析

2.1 6 个种源种子性状差异

梓树的 6 个种源间种子长度 ($F = 4.482^{**}$, $p = 0.002$)、宽度 ($F = 7.736^{**}$, $p = 0.000$)、长宽比 ($F = 7.186^{**}$, $p = 0.000$) 和种翅长度 ($F = 5.750^{**}$, $p = 0.000$) 差异均达到极显著水平 (表 2)。其平均长度与平均宽度分别为 7.99、2.59 mm, 其中, HEN 的种子长度最大 (8.60 mm), 宽度最小 (2.46 mm), 长宽比最大 (3.51); GS 种子长度最小, 长度和宽度分别为 7.05、2.50 mm。种翅最长的种源是 HB, 达 11.29 mm, 而 LN 则最短, 为 8.98 mm, 二者相差为 2.31 mm。

6 个种源的千粒质量表现出极显著差异 ($F = 73.221^{**}$, $p = 0.000$), 其变幅为 2.774 ~ 4.456 g, 依次为 LN > HN > GZ > HEN > HB > GS。

表 2 6 个梓树种源间种子大小差异

Table 2 Seed size difference in six provenances of *Catalpa ovata*

种源编号 Provenances	种子长度 SL / mm	种子宽度 SW / mm	种子长度/种子宽度 SL / SW	种翅长度 SWL / mm	千粒质量 TKW / g
辽宁桓仁 LN	8.42 ± 0.078C	2.49 ± 0.012A	3.38 ± 0.023BC	8.98 ± 0.088A	4.456 ± 0.070E
甘肃正宁 GS	7.05 ± 0.291A	2.50 ± 0.194A	2.83 ± 0.103A	9.50 ± 0.198A	2.774 ± 0.061A
河南洛阳 HEN	8.60 ± 0.339C	2.46 ± 0.047A	3.51 ± 0.181C	9.97 ± 0.504AB	3.269 ± 0.079B
湖北襄阳 HB	8.33 ± 0.245C	2.69 ± 0.039B	3.11 ± 0.099AB	11.29 ± 0.436B	3.186 ± 0.084B
湖南吉首 HN	7.54 ± 0.111AB	2.62 ± 0.065AB	2.88 ± 0.060A	9.19 ± 0.364A	3.810 ± 0.071D
贵州兴仁 GZ	8.02 ± 0.073BC	2.78 ± 0.025B	2.89 ± 0.024A	9.53 ± 0.185A	3.539 ± 0.027C
均值 Mean	7.99	2.59	3.10	9.74	3.506
F 值 F value	4.482 **	7.736 **	7.186 **	5.750 **	73.221 **
0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

注: ‘***’表示在 $P \leq 0.01$ 水平上差异显著, 大写字母表示种源间差异极显著, 下同。

Notes: ‘***’ mean significant difference at 0.01 level, capital letters indicate significant differences between the two provenances. The same below.

2.2 NaCl胁迫对种子萌发和芽苗生长的影响

2.2.1 种子发芽率 NaCl胁迫下,不同种源种子发芽率见图1。随着NaCl浓度的增大,6个种源的发芽率表现出2种变化趋势,GS和HEN种源均表现出先升高后降低的趋势,其它种源则为持续下降的趋势(图1);当NaCl浓度高于0.6%时,各种源的相对发芽率均快速降低(图1B),其中,GZ和HEN种源下降较快;NaCl浓度低于0.6%时,各种源发芽

率趋势具有一定的波动,趋势不一致(图1A),其中,NaCl浓度为0.3%时,GS和HEN的发芽率和相对发芽率均比对照高。这一结果说明在梓树种子萌发过程中,0.6%为NaCl胁迫的临界点,且一定量NaCl胁迫,有利于GS和HEN的种子发芽。NaCl浓度低于0.6%时,6个种源发芽率大小依次为LN > GS > HN > HB > GZ ≥ HEN。

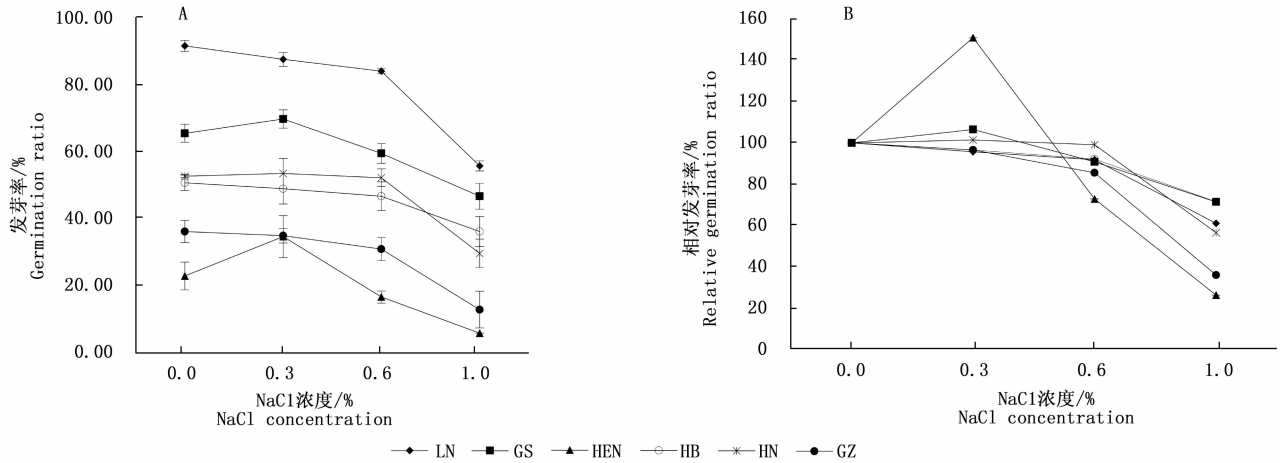


图1 6个梓树种源种子在NaCl胁迫下的发芽率和相对发芽率差异

Fig. 1 Differences in germination rate and relative germination rate of six *Catalpa ovata* provenances under NaCl stress

2.2.2 芽苗生长 NaCl胁迫对芽苗生长也产生了显著影响。胚根长度、胚轴长度和幼苗长度在种源和处理间均存在显著差异。表3表明:NaCl胁迫对不同种源产生的影响不同,随处理浓度的增大,HEN种源的胚根长度、胚轴长度、苗长均呈现出先升高后降低的趋势,而其它种源则持续降低;当NaCl浓度

为0.6%时,不同种源幼苗的平均胚根长度均值从大到小排列为:HB > GZ > HN > LN > GS > HEN,胚轴长度排序为:HB > HN > GZ > GS > HEN > LN;苗长排序为:HB > GZ > HN > LN > GS > HEN。芽苗的表型间接地反应了种子在盐胁迫下的活力大小,由此结果得出,HB种源的耐盐性较高。

表3 NaCl胁迫对不同种源芽苗生长的影响

Table 3 Effects of NaCl stress on seedling growth of different kinds of provenances

芽苗器官 Bud seedlings organs	NaCl 浓度 NaCl concentration /%	种源编号 Provenances number						F
		LN	GS	HEN	HB	HN	GZ	
胚根长度 Radical length / cm	0.0	4.14 ± 0.209b	5.31 ± 0.473bc	0.81 ± 0.173a	8.97 ± 0.586d	6.31 ± 0.416c	8.34 ± 0.534d	27.682**
	0.3	3.97 ± 0.260b	4.97 ± 0.285c	2.53 ± 0.335a	6.75 ± 0.349e	6.04 ± 0.218de	5.60 ± 0.411cd	25.289**
	0.6	3.75 ± 0.236bc	2.73 ± 0.267b	1.21 ± 0.174a	5.72 ± 0.327d	4.41 ± 0.368c	4.73 ± 0.303cd	16.800**
	1.0	1.17 ± 0.103ab	1.73 ± 0.185bc	0.52 ± 0.118a	2.25 ± 0.225c	1.91 ± 0.159bc	1.11 ± 0.198ab	6.080**
胚轴长度 Hypocotyl length / cm	0.0	1.92 ± 0.078cd	1.71 ± 0.045bc	0.96 ± 0.183a	2.21 ± 0.080d	1.67 ± 0.062bc	1.56 ± 0.062b	17.624**
	0.3	0.92 ± 0.048a	1.20 ± 0.057b	1.18 ± 0.081b	1.65 ± 0.070d	1.37 ± 0.065bc	1.49 ± 0.061cd	12.562**
	0.6	0.48 ± 0.033a	0.89 ± 0.071b	0.86 ± 0.107b	1.52 ± 0.090c	1.17 ± 0.033b	1.05 ± 0.064b	9.250**
	1.0	0.35 ± 0.026ab	0.47 ± 0.040b	0.41 ± 0.043ab	0.71 ± 0.062c	0.40 ± 0.031ab	0.33 ± 0.032a	11.028**
苗长 Seedling length / cm	0.0	6.06 ± 0.240b	7.02 ± 0.486bc	1.77 ± 0.295a	11.18 ± 0.604d	7.98 ± 0.401e	9.90 ± 0.575d	36.007**
	0.3	4.89 ± 0.267b	6.17 ± 0.320c	3.71 ± 0.361a	8.39 ± 0.362e	7.41 ± 0.256de	7.09 ± 0.437cd	23.604**
	0.6	4.23 ± 0.254bc	3.63 ± 0.322b	2.07 ± 0.220a	7.24 ± 0.397e	5.57 ± 0.365cd	5.79 ± 0.350d	15.114**
	1.0	1.53 ± 0.108ab	2.20 ± 0.199bc	0.93 ± 0.150a	2.95 ± 0.272c	2.31 ± 0.179bc	1.44 ± 0.221ab	6.859**

注:不同小写字母表示同一处理下不同种源呈显著性差异($P < 0.05$)。

Notes: Lower case letters indicate significant differences between different provenances under the same treatment at $P < 0.05$ among different NaCl concentrations.

2.2.3 种子的发芽指数 GI 和活力指数 VI 发芽指数是发芽率的深化,活力指数综合了发芽速率和生长量特性,因此,这2项指标能更好的反应种子的活力特征。图2表明:各种源的 GI 、 VI 随 NaCl 浓度变化的总趋势及种源间差异基本一致,除 HEN 外,其它5个种源的 GI 和 VI 均随 NaCl 浓度的升高而降

低,且不同种源间也存在较显著的差异。在整个 NaCl 胁迫处理过程中,HEN 种源的2项指标均最小,其次为 GZ 种源,最大分别为 LN 和 HB 种源。这表明不同种源种子的活力指数对梯度性盐胁迫具有不同敏感性。

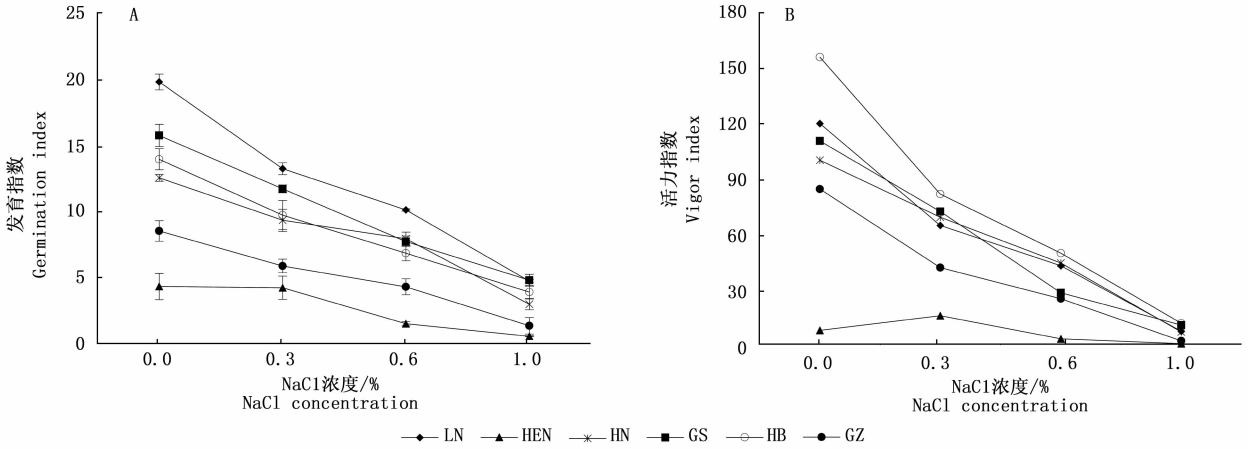


图2 6个梓树种源种子在盐胁迫下的 GI 和 VI 比较

Fig. 2 Comparison of GI and VI of six *Catalpa ovata* provenances under NaCl stress

2.3 NaCl 胁迫对不同种源芽苗生理生化指标的影响

通过多重比较可知:MDA、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白的含量在种源和处理间均存在极显著差异(表4)。处理后 LN、GS、HEN 和 HN 种源的 MDA 含量随 NaCl 浓度的增加而减少,而 HB 和 GZ 种源

则随 NaCl 浓度的升高总体呈不断降低的趋势,在 NaCl 浓度 0.6% 时有小幅度回升,但不存在统计学水平的显著差异。这意味 HB 和 GZ 种源的 MDA 代谢变化体现在盐胁迫的有无及高浓度盐胁迫条件下。当 NaCl 浓度达到 0.3% 时, LN、HB、HN 和 GZ 种源的脯氨酸含量均达最小值,之后随 NaCl 浓度上

表4 NaCl 胁迫对不同种源梓树芽苗 MDA 和可溶性渗透调节物质含量的影响

Table 4 Effect of NaCl stress on MDA and content of soluble osmotic adjustment material of different provenances of *Catalpa ovata* G. Don seedling

指标 index	NaCl 浓度 NaCl concentration /%	种源编号 Provenances number							F
		LN	GS	HEN	HB	HN	GZ		
MDA 含量 MDA content (nmol · g ⁻¹)	0.0	4.382 ± 0.022D	4.184 ± 0.013C	3.558 ± 0.026A	3.724 ± 0.000B	4.296 ± 0.002D	4.354 ± 0.009D	114.997**	
	0.3	3.044 ± 0.009D	3.889 ± 0.006E	3.430 ± 0.007F	2.535 ± 0.034A	2.766 ± 0.026B	2.933 ± 0.008C	285.892**	
	0.6	2.162 ± 0.010B	2.693 ± 0.001D	2.015 ± 0.002A	2.615 ± 0.021C	2.664 ± 0.015CD	3.115 ± 0.002E	637.745**	
	1.0	1.553 ± 0.012A	1.973 ± 0.003D	1.823 ± 0.004B	2.013 ± 0.000D	1.884 ± 0.008C	2.406 ± 0.012E	340.072**	
脯氨酸含量 Proline content (μg · g ⁻¹)	0.0	66.799 ± 0.280	68.112 ± 0.600	—	75.522 ± 0.807	102.867 ± 0.631	91.931 ± 0.128	325.667**	
	0.3	51.685 ± 0.812	87.937 ± 1.121	—	51.938 ± 0.406	88.694 ± 0.077	68.182 ± 0.047	449.380**	
	0.6	146.007 ± 0.627	112.253 ± 0.618	—	100.454 ± 0.666	213.745 ± 0.107	169.790 ± 0.682	2 008.311**	
	1.0	334.510 ± 0.543	276.555 ± 2.127	—	217.832 ± 3.886	399.044 ± 0.096	388.821 ± 0.049	584.251**	
可溶性糖含量 Soluble sugar content (mg · g ⁻¹)	0.0	5.978 ± 0.003	5.952 ± 0.013	—	4.239 ± 0.019	5.362 ± 0.037	5.505 ± 0.006	513.848**	
	0.3	4.667 ± 0.007	6.370 ± 0.032	—	2.642 ± 0.040	4.706 ± 0.005	4.637 ± 0.046	553.692**	
	0.6	6.654 ± 0.029	5.870 ± 0.004	—	3.338 ± 0.025	5.730 ± 0.038	4.444 ± 0.016	985.084**	
	1.0	8.787 ± 0.011	7.821 ± 0.059	—	6.438 ± 0.002	7.631 ± 0.024	7.965 ± 0.033	354.738**	
可溶性蛋白含量 Soluble protein content (mg · g ⁻¹)	0.0	12.294 ± 0.011B	14.320 ± 0.007D	37.121 ± 0.078F	11.324 ± 0.076A	13.500 ± 0.028C	16.456 ± 0.083E	7 321.882**	
	0.3	14.179 ± 0.054C	11.383 ± 0.028B	14.309 ± 0.092C	16.092 ± 0.016D	10.811 ± 0.043A	14.027 ± 0.176C	263.955**	
	0.6	20.904 ± 0.002E	19.515 ± 0.091D	25.597 ± 0.060F	10.509 ± 0.088A	18.709 ± 0.128C	17.595 ± 0.030B	661.967**	
	1.0	38.895 ± 0.067F	29.956 ± 0.031D	32.657 ± 0.002E	19.168 ± 0.037A	24.880 ± 0.097C	21.276 ± 0.185B	1 821.003**	

注:由于 HEN 种源种子耐 NaCl 性较差实验过程中死亡率较高导致部分实验数据缺失。

Notes: some experimental data were missing due to the high mortality of HEN seeds which has poor NaCl tolerance during the experiment.

升而增加;GS种源的脯氨酸含量则随NaCl浓度升高而持续增加。除GS种源外,随NaCl浓度不断升高其他种源的可溶性糖含量均呈先减少后增加的趋势;除LN和HB种源外,随NaCl浓度不断升高其他种源的可溶性蛋白含量均呈先降低后升高的趋势。因此,随NaCl浓度变化可溶性糖含量和可溶性蛋白含量具有相似的变化趋势。生理的变化是表型变化的内在原因,以上结果表明了LN的较强耐盐性可能是其具有更高效的渗透调节能力。

抗氧化酶生理变化是反应生物体抗胁迫能力的重要指标,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶

(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性在种源和处理间均存在极显著差异(表5)。随NaCl浓度的升高3种抗氧化酶活性的变化趋势不同。GS、HEN、HN种源的SOD活性呈先升后降的趋势,HB和GZ种源呈先降后升的趋势,LN种源呈不断降低的趋势。6个种源POD活性变化趋势较为一致,随NaCl浓度升高而先升后降。HEN、HB、HN、GS种源的CAT活性随NaCl浓度的升高呈先降低后升高的趋势,而LN和GZ种源的变化趋势则相反。以上结果表明,本研究的抗氧化酶活性变化规律较为复杂,不能单一得由其活性大小来反应种子的耐盐性能力。

表5 NaCl胁迫对不同种源芽苗抗氧化酶活性的影响

Table 5 Effects of NaCl stress on antioxidant enzyme activities in different provenances

指标 index	NaCl 浓度 NaCl concentration /%	种源编号 Provenances number							F
		LN	GS	HEN	HB	HN	GZ		
SOD 活性 SOD activity /(U · mg ⁻¹)	0.0	34.217 ± 0.050D	27.422 ± 0.602B	15.322 ± 0.167A	34.450 ± 0.019D	30.068 ± 0.116C	34.923 ± 0.087D	160.107 **	
	0.3	31.113 ± 0.193B	40.151 ± 0.063D	35.367 ± 0.423C	26.557 ± 0.099A	41.444 ± 0.038D	26.911 ± 0.427A	63.925 **	
	0.6	19.304 ± 0.066C	18.201 ± 0.008C	12.376 ± 0.234A	25.448 ± 0.314D	19.079 ± 0.135C	15.983 ± 0.030B	105.884 **	
	1.0	9.081 ± 0.002A	12.096 ± 0.117B	12.732 ± 0.173B	32.956 ± 0.393E	16.610 ± 0.015C	18.669 ± 0.661D	355.086 **	
POD 活性 POD activity /(U · g ⁻¹)	0.0	0.072 ± 0.000A	0.077 ± 0.001B	0.122 ± 0.000E	0.101 ± 0.001D	0.087 ± 0.000BC	0.076 ± 0.001B	302.354 **	
	0.3	0.142 ± 0.000C	0.148 ± 0.000D	0.148 ± 0.000D	0.153 ± 0.000E	0.099 ± 0.000A	0.122 ± 0.000B	480.020 **	
	0.6	0.101 ± 0.005A	0.137 ± 0.000CI	0.117 ± 0.000B	0.146 ± 0.000D	0.129 ± 0.000BC	0.100 ± 0.000A	14.481 **	
	1.0	0.078 ± 0.000A	0.102 ± 0.000D	0.089 ± 0.000B	0.110 ± 0.000F	0.106 ± 0.000E	0.101 ± 0.000C	655.333 **	
CAT 活性 CAT activity /(U · g ⁻¹)	0.0	24.020 ± 0.055D	31.522 ± 0.478E	19.522 ± 0.148C	14.871 ± 0.124A	15.880 ± 0.249AB	16.361 ± 0.364B	251.690 **	
	0.3	29.341 ± 0.189B	13.416 ± 0.476A	13.776 ± 0.433A	13.836 ± 0.000A	12.242 ± 0.063A	30.108 ± 0.572B	213.960 **	
	0.6	41.749 ± 0.163F	25.867 ± 0.104E	20.415 ± 0.027C	16.175 ± 0.131A	24.380 ± 0.146D	19.121 ± 0.344B	642.730 **	
	1.0	22.579 ± 0.121B	24.605 ± 0.114C	26.583 ± 0.194D	23.890 ± 0.036C	24.196 ± 0.167C	18.857 ± 0.213A	101.770 **	

2.4 6个梓树种源耐NaCl评价

选择0.6%NaCl浓度处理的各指标数据,根据14个指标的相关指数计算结果,并对其排名(表6),选择可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、发芽率、VI、相对发芽率、脯氨酸含量作为评价各种源耐NaCl性指

标。应用隶属函数法对不同梓树种源进行耐盐性评价(表7),6个种源的隶属函数变幅为0.109~0.834,6个种源耐NaCl由强到弱依次为LN>GS>HB>HN>GZ>HEN。

表6 各类中指标相关指数及排序

Table 6 Correlative indexes and order of parameters

分类 Category	指标 Index	相关指数 Correlative inde	类中排序 Order of paramater
1	胚轴长度 Radical length	0.629	2
	POD活性 POD activity	0.358	7
	MDA含量 MDA content	0.472	5
	胚根长度 Hypocotyl length	0.522	4
	苗长 Seedling length	0.599	3
	GI Germination index	0.384	6
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.725	1
2	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.685	1
	SOD活性 SOD activity	0.631	2
	CAT活性 CAT activity	0.269	3
3	发芽率 Germination rate	0.487	1
	VI Vital index	0.487	1
4	相对发芽率 Relative germination rate	0.166	1
	脯氨酸含量 Proline content	0.166	1

表7 0.6%NaCl胁迫下各个种源芽苗指标隶属函数值、权重和综合评价D值

Table 7 Value of subordinative function, index weight, evaluation index D of each provenances under 0.6% NaCl content stress

种源编号 Provenances number	隶属函数值 Subordinative function						综合评价 D 值 Evaluation D
	A(1)	A(2)	A(3)	A(4)	A(5)	A(6)	
LN	1.000	0.689	1.000	0.854	0.724	0.598	0.834
GS	0.764	0.597	0.636	0.536	0.687	0.896	0.694
HEN	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.109
HB	0.000	0.000	0.446	1.000	0.736	1.000	0.56
HN	0.721	0.543	0.528	0.885	1.000	0.000	0.553
GZ	0.334	0.470	0.212	0.468	0.484	0.388	0.372
权重 Index weight	0.208	0.109	0.200	0.222	0.042	0.218	

注:A(1):可溶性糖含量;A(2):可溶性蛋白含量;A(3):发芽率;A(4):VI;A(5):相对发芽率;A(6):脯氨酸含量。

Notes:A(1):Soluble sugar content;A(2):Soluble protein content;A(3):Germination rate;A(4):Vital index;A(5):Relative germination rate;A(6):Proline content.

3 讨论

植物对盐胁迫的适应性不仅体现在生长发育上,而且也体现在代谢和生理生态适应等方面。植物耐盐性是由多基因控制的一个数量性状^[26],受多种因素影响,因此,必须采用多指标综合评价^[27]。然而,目前关于植物耐盐性评价,并没有一个较完善统一的评价体系^[28]。本文分析表明,梓树6个种源种子受NaCl胁迫后的胚根长、胚轴长、苗长,MDA、脯氨酸、可溶性糖与可溶性蛋白含量以及SOD、POD、CAT活性均呈极显著的差异。各种源种子的发芽率和相对发芽率均在NaCl浓度为0.6%时快速下降,即可说明在此种子萌发试验中,此浓度为NaCl胁迫的临界点。选取临界浓度的数据,计算各指标的相关系数,选择了发芽率、相对发芽率、VI、脯氨酸含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量6个指标,采用隶属函数法对6个梓树种源的耐盐性进行了综合评价,最终获得了6个种源的耐盐性大小排序,同时也为梓树种源耐NaCl能力评价提供了指标体系。

物种在长期进化过程中,为了适应不同地区复杂的生态环境而产生了相应的遗传变异,并将其性状稳定地反映在种子形态和苗木生长发育中。因此,在遗传型和环境因子共同作用下,同一物种不同种源的种子性状及其生理生化特性存在不同程度的差异^[29-30]。梓树6个种源的各指标差异显著,这与各种源当地的土壤与气候条件有关,也反映了不同种源耐盐性上的明显差异。由耐盐性大小排序可知,LN、GS种源的耐盐性最强,而二者的种源地的年均气温最低、无霜期最短,土壤pH值呈碱性且盐化程度最严重,其年降水量也处于6个种源中较低

水平,因此,这2个种源在对其环境的长期适应过程中产生了一定的抗性;而LN的高耐盐性也可能是与其长期生长于具有风沙地和低洼盐碱地特征的松嫩平原地区有关^[31]。耐盐性最差的是HEN,其种源地年降水量虽处于中等水平,土壤pH值为碱性且出现中度的盐渍化现象,但是年平均气温中等、无霜期较短,这可能导致了HEN与LN、GS种源耐盐性的差异。由此说明,梓树的耐盐性可能受环境和遗传因素的交互作用影响。HB、HN、GZ三个种源地土壤与气候较其它种源均差异不大,且雨量充足,气温较高,因此,耐NaCl能力大小相近。这说明,梓树耐盐性存在显著的种源效应,其抗性明显受遗传控制。综上所述,梓种源间存在着丰富的耐盐性变异,而作为楸树的嫁接砧木,选择出抗盐性较强的种源应用于楸树嫁接苗的繁育,从而为楸树良种壮苗繁育和高效培育奠定基础。

4 结论

经NaCl模拟盐胁迫试验的6个种源,其种子性状和萌发性状差异明显,筛选出种子发芽率、相对发芽率、VI以及幼苗脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量可作为梓树种源耐NaCl能力评价的指标,运用隶属函数法评价6个种源的抗盐能力强弱排序为LN>GS>HB>HN>GZ>HEN。

参考文献:

- [1] 岑显超. 不同品种(类型)楸树苗木对于旱胁迫的生理响应[D]. 南京:南京林业大学,2008.
- [2] 潘庆凯,康平生,郭明. 楸树[M]. 北京:中国林业出版社,1991.
- [3] 麻文俊,张守攻,王军辉,等. 1年生楸树无性系苗期生长特性[J]. 林业科学研究,2012,25(5):657-663.

- [4] 赵坤,吴际友,程勇,等. 楸树无性系嫩枝扦插繁殖的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(7):66-69.
- [5] Lin J, Wu L H, Liang J, et al. Effect of different plant growth regulators on callus induction in *Catalpa bungei* [J]. African Journal of Agricultural Research, 2010,5(19):2699-2704.
- [6] 江荣翠,彭方仁,谭鹏鹏,等. 楸树体细胞胚胎发生的研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(2):15-18.
- [7] 丁米田,赵鲲. 利用梓苗嫁接技术快速繁殖楸树良种[J]. 河南林业科技,2002,22(2):15-17.
- [8] 傅家瑞. 种子生理[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [9] 方连玉. 盐胁迫对欧洲赤松光合作用的影响及耐盐性评价[D]. 北京:中国农业大学,2011.
- [10] 王新建,谢碧霞,何威,等. 干旱胁迫对4种豫楸1号嫁接苗膜脂过氧化作用的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2008,28(6):30-34.
- [11] 孙宁,孙建设,李增裕. 苹果砧木耐盐突变体的筛选鉴定及RAPD分析[J]. 河北农业大学学报,2004,27(5):37-40.
- [12] 郭兴科,史娟,李方方,等. 不同苹果砧木杂交后代对轮纹病的抗性及对“红富士”苹果抗病性的影响[J]. 北方园艺,2014,38(4):22-25.
- [13] 孙茜,任磊,马文婷,等. 四种葡萄砧木抗旱性的鉴定[J]. 湖北农业科学,2015,54(3):623-626.
- [14] 李勃,刘成连,杨瑞红,等. 樱桃砧木抗寒性鉴定[J]. 果树学报,2006,23(2):196-199.
- [15] 杨佳鑫,童羽静,罗杰燕,等. 嫁接对梅花耐盐性的影响[J]. 西北植物学报,2018,3(4):723-732.
- [16] Atkinson C J, Else M A, Taylor L et al. Root and stem hydraulic conductivity as determinants of growth potential in grafted trees of apple (*Malus pumila* Mill.) [J]. Exp Bot, 2003, 54(385):1221-1229.
- [17] Garcia-Sanchez F, Carvajal M, Cerda A et al. Response of ‘Star Ruby’ grapefruit on two rootstocks to NaCl salinity [J]. Hort Sci Biotech, 2003, 78(6):859-865.
- [18] Massai R, Remorini D, Tattini M. Gas exchange, water relations and osmotic adjustment in two scion/rootstock combination of *Prunus* under various salinity concentrations [J]. Plant Soil, 2004, 259(1-2):153-162.
- [19] Moya J L, Tadeo F R, Gomez-Cadenas A et al. Transmissible salt tolerance traits identified through reciprocal grafts between sensitive Carrizo and tolerance Cleopatra citrus genotypes [J]. Plant Physiol, 2002, 159(9):991-998.
- [20] Ruiz J M, Rios J J, Rosales M A et al. Grafting between tobacco plants to enhance salinity tolerance [J]. Plant Physiol, 2006, 163(12):1229-1237.
- [21] Wahome P K, Jesch H H, Grittner I. Mechanisms of salt stress tolerance in two rose rootstocks: *Rosa chinensis* ‘Major’ and *R. Rubiginosa* [J]. Sci Hort, 2001, 87(3):207-216.
- [22] 李晓洁,徐化成. 白皮松种子发芽习性及其种源变异的研究[J]. 林业科学,1989,25(2):97-105.
- [23] 刘彬,麻文俊,王军辉,等. 基于叶片解剖结构的砂生槐群体抗旱性评价[J]. 植物研究,2017,37(3):325-333.
- [24] 李源,刘贵波,高洪文,等. 紫花苜蓿种质耐盐性综合评价及盐胁迫下的生理反应[J]. 草业学报,2010,19(4):79-86.
- [25] 任文俊,李清河,王赛宵,等. 盐胁迫下不同种源籽蒿的生理生化特性与耐盐性评价[J]. 东北林业大学学报,2013,41(2):10-13,28.
- [26] Foolad M R, Jones R A. Mapping salt-tolerance genes in tomato (*Lycopersicon esculentum*) using trait-based marker analysis [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1993,87(1):184-192.
- [27] Munns R, Teematt A. Whole plant responses to salinity [J]. Australian Journal of Plant Physiology. 1986, 13(1):143-160.
- [28] 张华新,宋丹,刘正祥. 盐胁迫下11个树种生理特性及其耐盐性研究[J]. 林业科学研究,2008,21(2):168-175.
- [29] Harper J L, Lovell P H, More K G. The shapes and size of seeds [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1970,1(1):327-356.
- [30] Roach D A, Wulff R D. Maternal effects in plants [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1987, 18:209-235.
- [31] 陶晶,秦彩云,姚露贤,等. 杨树耐盐性突变体育种的研究进展[J]. 吉林林业科技,2000,29(2):5-8.

Bioassay for Salt Tolerance of Six *Catalpa ovata* Provenances

LI Yuan^{1,2}, LI Zhi-hui², MIAO Xiao-juan¹, WANG Zhi¹, WANG Jun-hui¹, MA Wen-jun¹

1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, National Innovation Alliance of *Catalpa bungei*, Beijing 100091, China;
2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: [**Objective**] The purpose of this study is to select salt-tolerance *Catalpa ovata* provenances as the rootstock for *C. bungei* grafting, so as to expand the range suitable of *C. bungei* growth and alleviate the tight domestic demand for high-quality *C. ovata* seedlings. [**Method**] The seeds of 6 *C. ovata* provenances were collected. NaCl treatments were performed on these seeds to simulate salt stress. The salt tolerance were analyzed by test seed germination and seedling growth. The provenances showed strong salt tolerance were selected as provenances suitable to be used as rootstock to graft seedlings of *C. bungei*. The variation of germination, enzyme activity and soluble substances such as proline and MDA in the seedlings after 20 days' NaCl treatments (4 concentrations: 0% , 0.3% , 0.6% , 1%) was measured. The correlation indexes of the data was calculated to select the proper evaluation indexes. Membership function method in fuzzy mathematics together with proportion was used to evaluate the NaCl tolerance of *C. bungei* from different provenances comprehensively. [**Result**] Under salt stress, the length, width, fin length and 1 000 grain weight of the seeds, and the content of MDA, proline, soluble sugar and soluble protein and SOD, POD, CAT activity among these seedlings from the 6 provenances showed significant differences. The length of radicle, hypocotyl and seedlings was also significantly changed under salt stress. The threshold NaCl concentration for the germination of these seeds was 0.6% . The salt resistance of *C. bungei* was comprehensively evaluated using indexes under threshold NaCl concentration. [**Conclusion**] For breeding *C. bungei* grafted seedlings in saline soil, the provenance from Hengren of Liaoning Province is the most suitable for the rootstock seedlings of *C. ovata* , while the provenance from Luoyang of Henan Province is the least suitable provenance.

Keywords: salt tolerance; grafting; provenance; *Catalpa ovata*

(责任编辑:张 研)