

## 碱性盐胁迫对不同种源沙枣幼苗的生理影响

郭林繁<sup>1</sup>, 毕春竹<sup>1,2</sup>, 宋振琪<sup>1</sup>, 王秀军<sup>1</sup>, 耿红凯<sup>1</sup>, 李子航<sup>1</sup>, 罗春燕<sup>1</sup>, 李庆卫<sup>1\*</sup>

(1. 北京林业大学 园林学院, 北京 100083; 2. 广东工业大学 华立学院, 广东 广州 511325)

**摘要:**我国土壤盐碱化区域分布广泛且类型复杂, 种植耐盐碱及观赏性状好的园林植物是盐碱地区改良盐碱化土壤、提升园林景观及促进景观可持续发展的有效途径之一。以宁夏、甘肃 2 种源的沙枣 2 年生苗为试材, 研究不同浓度下  $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (体积比 1:1) 的碱性盐对沙枣幼苗生长和生理生化的影响。结果表明, 碱性盐胁迫下, 随盐含量增加和胁迫时间的延长, 2 种源沙枣叶长、叶宽、新梢和地径生长量呈下降趋势, 且宁夏种源沙枣苗各生长量受胁迫影响较大; 沙枣叶片膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量总体呈上升趋势, 可溶性蛋白含量随胁迫时间延长呈先升后降再上升的趋势。SOD 活性、POD 活性总体呈先升后降的趋势。低浓度碱性盐胁迫初期叶绿素含量增加, 后期叶绿素含量下降, 宁夏种源降幅总体大于甘肃种源; 净光合速率、气孔导度、蒸腾速率随碱性盐浓度增加呈下降趋势, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈上升趋势。宁夏、甘肃种源沙枣的耐碱性盐阈值分别为 0.917‰、0.966‰, 研究认为碱性盐胁迫条件下甘肃种源沙枣耐碱性盐能力大于宁夏种源沙枣, 为丰富和提升盐碱地区植物景观提供依据。

**关键词:**沙枣; 种源; 碱性盐胁迫; 生理响应; 耐盐性评价

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)04-0051-10

## Physiological Response of Alkaline Salt Stress on *Elaeagnus angustifolia* Seedlings from Different Provenances

GUO Lin-fan<sup>1</sup>, BI Chun-zhu<sup>1,2</sup>, SONG Zhen-qi<sup>1</sup>, WANG Xiu-jun<sup>1</sup>, GENG Hong-kai<sup>1</sup>, LI Zi-hang<sup>1</sup>,  
LUO Chun-yan<sup>1</sup>, LI Qing-wei<sup>1\*</sup>

(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, Guangdong, China)

**Abstract:** Saline soils are widely distributed in China and have complex types. To improve saline soils, enhance the landscape and promote sustainable development of the landscape, planting saline-tolerant and ornamental garden plants in saline areas is one of the effective ways. This study examined the effects of alkaline salts at different concentrations of  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in a 1:1 volume ratio on the growth and physiology and biochemistry of *Elaeagnus angustifolia* seedlings. Two-year-old *E. angustifolia* seedlings from Ningxia and Gansu, were used as test materials. The results showed that under alkaline salt stress, the growth of leaf length, leaf width, new growth and ground diameter of the seedlings from both sources decreased with the increase of salt concentration and stress time, and the growth of the seedlings from Ningxia was more sensitive to the stress. The MP, MDA content, Pro content and SS content of the seedling leaves showed an overall increasing trend, while the SP content showed an increasing, then decreasing and finally increasing trend with stress time. The activity of SOD and POD showed an increasing trend followed by

收稿日期: 2022-06-02 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项资金(2019XKJS0324); 北京园林绿化增彩延绿科技创新工程(2019-KJC-02-10)。

第一作者: 郭林繁, 硕士在读。研究方向: 园林植物应用。E-mail: glf568@qq.com

\* 通信作者: 李庆卫, 博士, 教授。研究方向: 园林植物应用、园林植物栽培与养护。E-mail: lqw6809@bjfu.edu.cn

a decreasing trend. The Chl content increased at the beginning with low alkaline salt stress and decreased at the later stage. The rate of decrease of seedlings from Ningxia was generally smaller than those from Gansu. The  $P_n$  rate,  $G_s$  and  $T_r$  showed a decreasing trend with salt concentration, while  $C_i$  showed an increasing trend. The salt tolerance thresholds of the seedlings of Ningxia and Gansu were 0.917% and 0.966%, respectively. It is concluded that the alkaline salt tolerance of *E. angustifolia* seedlings from Gansu is stronger than that from Ningxia, which provide a basis for enriching and enhancing the plant landscape in saline areas.

**Key words:** *Elaeagnus angustifolia*; seedling source; alkaline salt stress; physiological response; salt tolerance evaluation

我国的土壤盐碱化面积约有 9 913 万  $\text{hm}^2$ , 其分布广泛且类型复杂<sup>[1]</sup>。筛选和培育耐盐碱、观赏性好且附加值高的园林植物, 既可改善生态环境、丰富盐碱地景观<sup>[2]</sup>, 又可开展附属产业的开发, 提高经济效益。

沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*) 是胡颓子科胡颓子属的落叶小乔木或乔木, 在我国主要分布于西北各省区。沙枣具有较高的观赏、经济和药用价值, 同时抗性强、易管理, 开发利用前景广阔。国外对于沙枣的研究主要以组织培养、生态管理与应用为主<sup>[3-5]</sup>, 我国研究人员对于沙枣的耐盐性生理研究主要集中在单盐、中性盐混合胁迫方面<sup>[6-8]</sup>。

本研究以宁夏银川、甘肃张掖 2 种源的 2 年生沙枣苗为研究对象, 根据我国北方盐碱地主要盐碱成分, 测定不同种源沙枣幼苗在碱性盐胁迫下的生长和生理生化指标, 旨在筛选优质沙枣种质资源, 为沙枣在盐碱地的引种栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试验设计

2 年生沙枣苗采购于宁夏银川(NX)、甘肃张掖(GS)两地, 为本土植株。试验在北京林业大学梅菊圃的半坡温室内进行。选取生长健壮、长势一致的沙枣苗为试材, 单株栽植于上口径 30 cm、下口径 20 cm、高度 30 cm 的塑料盆中, 塑料盆完全随机排列, 盆底放置托盘。培养基质统一为 V(草炭土): V(珍珠岩): V(沙子)=2:1:1 的 5 kg 混合基质。

将  $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (体积比 1:1) 的混合碱性盐溶液, 分别设置 0.0%(CK)、0.3%( $T_1$ )、0.6%( $T_2$ )、0.9%( $T_3$ )、1.2%( $T_4$ ) 浓度梯度, 每个处理设置 3 个重复。2019 年 3 月, 试验前先将盆土控水 7 d, 并取样 1 次测定各生长指标作为对照。盆土干燥后, 将定量碱性盐溶液浇入所对应的处理中, 每天一次(0.5 L), 4 d 完成溶液的添加。溶液添加完毕后, 每 10 d 取样 1 次, 取样后立即用液氮速冻, 后存放于  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中, 叶片膜透性在取样后立即测

定。在 40 d 时完成最后一次采样, 并测定各项生长指标结束试验, 试验期间苗木管理条件相同。

### 1.2 指标测定

1.2.1 生长指标的测定 分别在碱性盐胁迫前后进行生长指标的测定。选择植株中上部 10 枚成熟叶片, 使用游标卡尺测量沙枣的叶长、叶宽、地径(精度为 0.01 cm); 用卷尺测量被标记的 5 枝新梢(精度为 0.1 cm), 差值即为沙枣生长量。

1.2.2 生理生化指标的测定 采用相对电导率法测定叶片膜透性, 采用巴比妥酸法测定叶片丙二醛含量, 采用酸性茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量, 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量, 采用氮蓝四唑光化还原法测定 SOD 活性<sup>[9]</sup>。采用愈创木酚法测定 POD 活性, 采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量, 采用丙酮乙醇法测定叶绿素含量<sup>[10]</sup>。每个指标重复 3 次。

1.2.3 光合参数的测定 分别在 0、10、20、30、40 d, 选取沙枣生长良好的上部成熟功能叶, 使用 LI-6400 便携式光合仪(Lo-Cor Inc, USA)测定沙枣叶片的光合参数, 每个处理设置 9 个重复。

### 1.3 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据处理, SPSS 23.0 软件进行统计处理, 采用单因素方差分析检验不同处理间的差异, 采用双因素方差分析检验种源、碱性盐浓度以及两者交互作用对沙枣幼苗各指标的影响, 使用 Origin 2018 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗生长特性的影响

整体来看, 不同浓度碱性盐胁迫对 NX、GS 沙枣幼苗生长有抑制作用(表 1), 随着碱性盐含量的增加, 2 种源沙枣各生长量均呈下降趋势, 在  $T_4$  处理下, 生长量最小, 与 CK 差异显著。NX 沙枣叶长、叶宽、新梢、地径生长量与 CK 达到显著性差异的最低浓度分别为  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_1$  和  $T_1$ , GS 沙枣分别为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_1$  和  $T_1$ 。

2.2 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗生理特性的影响

2.2.1 碱性盐胁迫对沙枣叶片膜透性(MP)及丙二醛(MDA)含量的影响 随胁迫时间的延长,2 种源沙枣叶片的 MP、MDA 含量整体呈上升趋势(图

1)。NX 沙枣在胁迫 10 d 时,不同浓度处理下与 CK 相比均达到显著性差异,GS 沙枣在 20 d 时各浓度处理下与 CK 相比均达到显著性差异。40 d 时,除 T<sub>1</sub> 外,其他处理下 NX 沙枣 MDA 含量增幅均大于 GS 沙枣。

表 1 碱性盐胁迫 40 d 对沙枣生长量的影响

Table 1 Effect of alkaline salt stress for 40 days on the growth characteristics of *E. angustifolia*

浓度	叶长生长量/cm		叶宽生长量/cm		新梢生长量/cm		地径生长量/cm	
	NX	GS	NX	GS	NX	GS	NX	GS
CK	1.07±0.04a	1.12±0.05a	0.58±0.04a	0.68±0.05a	21.50±0.50a	20.67±0.94a	1.04±0.05a	1.08±0.06a
T <sub>1</sub>	1.10±0.02a	0.96±0.04b	0.57±0.05a	0.63±0.05a	16.37±0.43b	16.05±0.64ab	0.84±0.09b	0.86±0.10ab
T <sub>2</sub>	0.86±0.03b	0.72±0.01c	0.49±0.03a	0.52±0.04ab	15.03±0.28b	13.25±0.75b	0.71±0.09b	0.81±0.13b
T <sub>3</sub>	0.52±0.03c	0.62±0.08cd	0.32±0.04b	0.46±0.09b	10.10±0.62c	11.05±0.74c	0.75±0.04bc	0.55±0.04c
T <sub>4</sub>	0.44±0.03c	0.56±0.03d	0.31±0.05b	0.39±0.01b	8.17±0.25d	8.58±0.80d	0.55±0.05c	0.43±0.08c

注:表中数据为平均值±标准差(n=3);不同小写字母表示不同处理之间存在显著性差异(P<0.05),CK 为对照组。

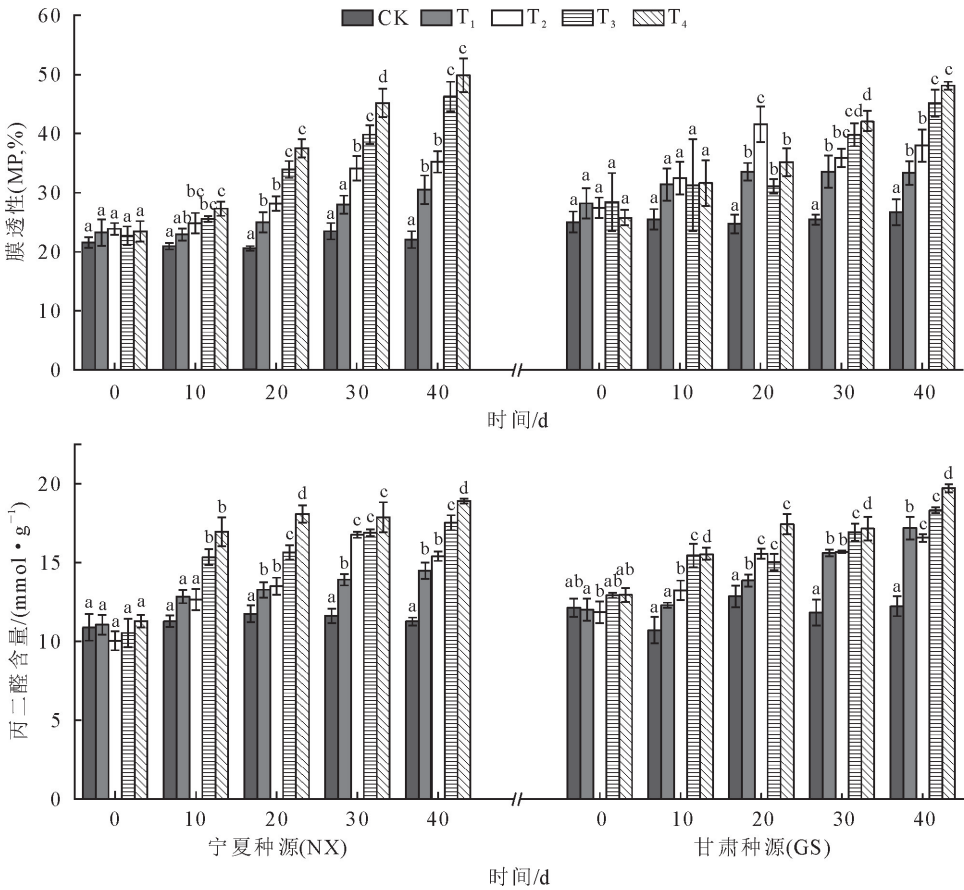


图 1 碱性盐胁迫对沙枣膜透性及丙二醛含量的影响

Fig. 1 The effect of alkaline salt stress on the membrane permeability and MDA

2.2.2 碱性盐胁迫对沙枣叶片渗透调节物质(Pro、SS、SP)含量的影响 NX、GS 沙枣叶片游离脯氨酸(Pro)含量、可溶性糖(SS)含量均随浓度升高和胁迫时间的延长整体呈上升趋势;可溶性蛋白(SP)含量整体上呈先升后降再升的趋势(图 2)。10 d 时,NX、GS 沙枣 SP 含量均在 T<sub>3</sub> 处理下出现最高值。20 d 时,NX、GS 沙枣 SP 含量整体上呈下降趋势。30 d 时,NX 沙枣 SP 含量整体上继续下降,而 GS

沙枣 SP 含量增加。40 d 时,不同浓度处理下,NX 沙枣 Pro 含量增幅大于 GS 沙枣。

2.2.3 碱性盐胁迫对沙枣叶片抗氧化酶(SOD、POD)活性的影响 随着胁迫时间的延长,2 种源沙枣叶片 SOD、POD 活性呈先升后降的趋势(图 3)。10 d 时,各浓度处理下,2 种源沙枣 SOD、POD 活性均与对照差异显著。NX、GS 沙枣 POD 活性分别在 10 d 时的 T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub> 下达到最大值。NX、GS 沙

枣 SOD 活性分别在 20 d 时的  $T_3$ 、 $T_1$  下达到最大值。40 d 时,2 种源沙枣 SOD、POD 活性均下降至最低。

2.2.4 碱性盐胁迫对沙枣叶片叶绿素(Chl)含量的影响 随浓度的增加和胁迫时间的延长,2 种源沙

枣 Chl 含量整体呈下降趋势(图 4)。10 d 时,在  $T_1$ 、 $T_2$  处理下,NX 沙枣 Chl 含量与 0 d 相比略有上升,各浓度处理下与 CK 相比差异显著。40 d 时,NX、GS 沙枣叶绿素含量均下降至最低,整体来看,NX 沙枣叶绿素含量降幅大于 GS 沙枣。

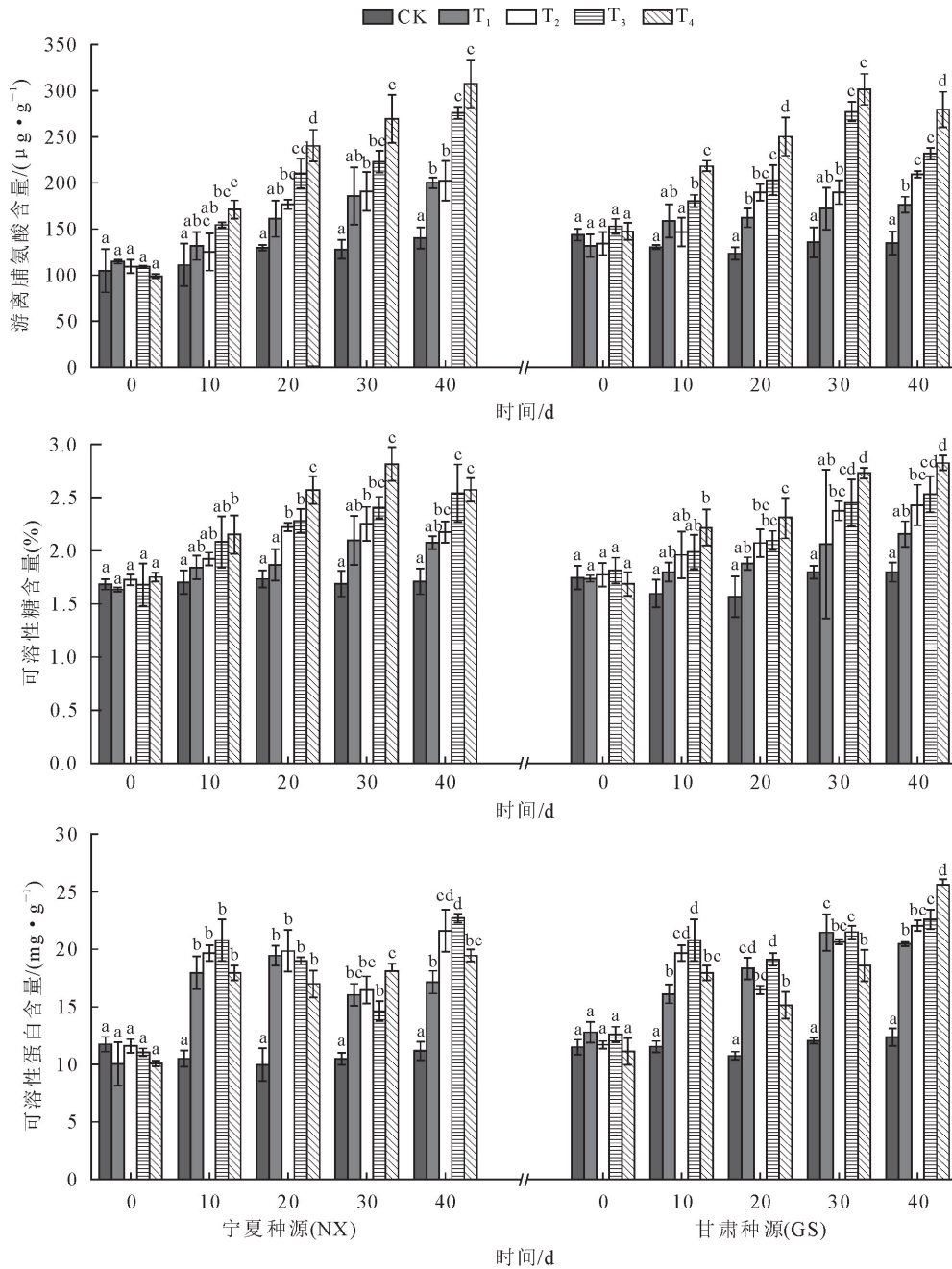


图 2 碱性盐胁迫对沙枣 Pro、SS、SP 含量的影响

Fig. 2 The effect of alkaline salt stress on the content of Pro, SS, SP

2.3 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗光合参数( $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ )的影响

随胁迫时间延长,2 种源沙枣叶片净光合速率( $P_n$ )值整体呈先降后升再下降的趋势;叶片气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )整体呈下降趋势(图 5、图 6);2 种源沙枣叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )整体呈先下降后上升趋势。20 d 时,GS 沙枣  $P_n$  达到胁迫过程中的最

大值;2 种源  $C_i$  呈上升趋势。30 d 后,2 种源沙枣  $T_r$  值持续下降,与对照差异显著( $P < 0.05$ )。胁迫至 40 d,2 种源  $G_s$  值持续下降;NX、GS 沙枣叶片  $C_i$  分别在  $T_3$ 、 $T_4$  下达到最大值。

2.4 不同种源、碱性盐胁迫和两者交互作用对沙枣苗的影响

不同种源、碱性盐浓度以及两者交互作用对沙



枣幼苗有一定影响(表 2),种源因素对沙枣各测量指标影响有所差异,种源因素对沙枣叶长、地径生长量、SS、POD、Chl、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  含量无显著影响;碱性

盐浓度对各项指标均有极显著影响( $P<0.001$ ),种源和浓度两者交互作用对叶长、新梢、地径生长量、MP、MDA、SP、SOD、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  有显著影响。

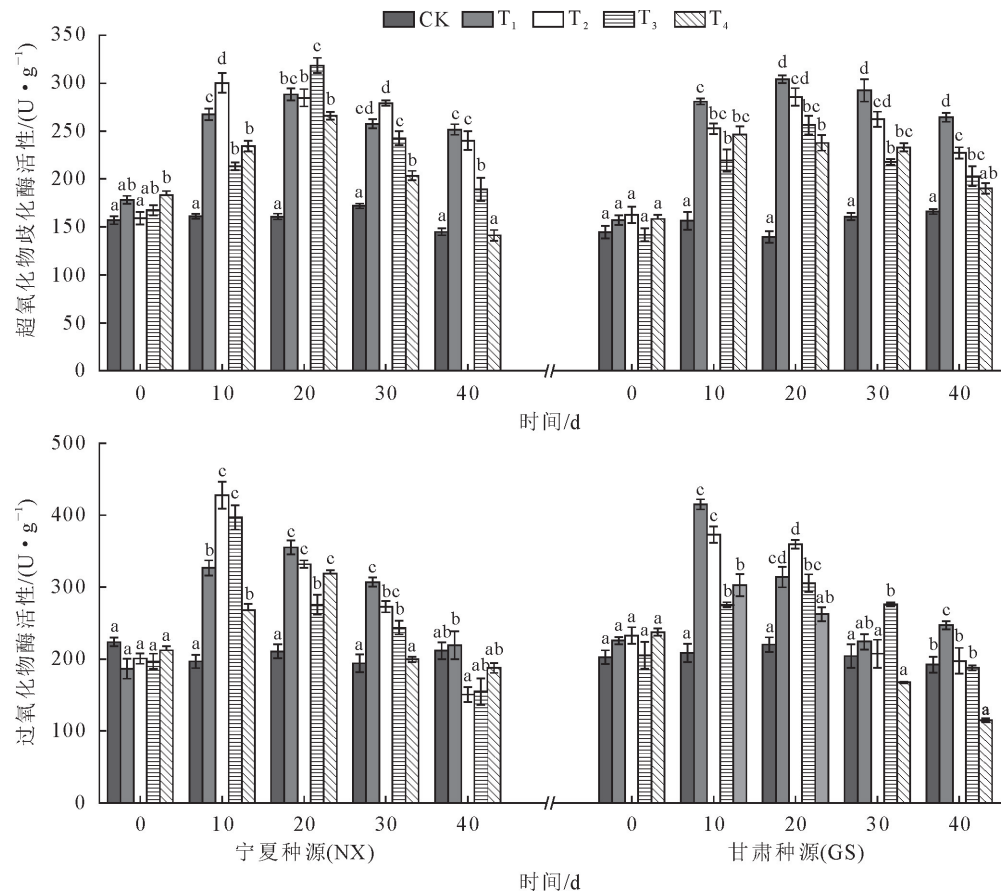


图 3 碱性盐胁迫对沙枣 SOD、POD 活性的影响

Fig. 3 The effect of alkaline salt stress on the activities of SOD and POD

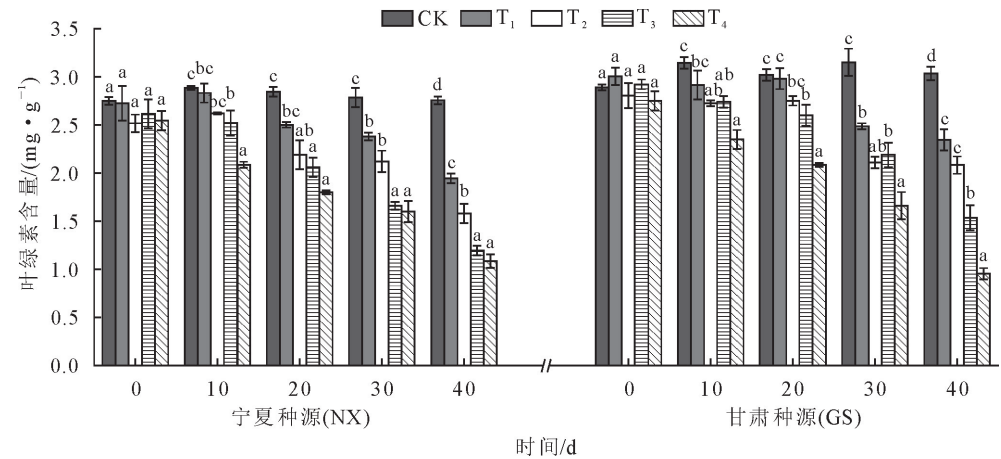


图 4 碱性盐胁迫下沙枣叶绿素含量变化

Fig. 4 The effect on leaf chlorophyll content under alkaline salt stress

2.5 不同种源沙枣耐碱性盐综合分析评价

2.5.1 沙枣耐碱性盐阈值的确定 植物生长量是衡量其耐盐能力的重要指标。常将植物生长量或生物量下降 50% 时的盐含量作为植物的耐盐阈值<sup>[11]</sup>。以胁迫处理的新梢生长量为因变量( $y$ )、以盐含量为自变量( $x$ )建立回归方程,结果如表 3 所示。以新梢生长量下降 50% 时的盐含量为耐碱性盐阈值,得出

在碱性盐处理中,NX、GS 沙枣的耐碱性盐阈值分别为 0.917%、0.966%,由此可见,不同种源沙枣的耐碱性盐程度存在差异,GS 沙枣对碱性盐的耐受能力强于 NX 沙枣。

2.5.2 不同种源沙枣的耐碱性盐评价 NX、GS 沙枣在混合碱性盐胁迫中分别提取 2 个主成分(表 4、表 5)。NX 沙枣 2 主成分的特征值分别为 8.817、

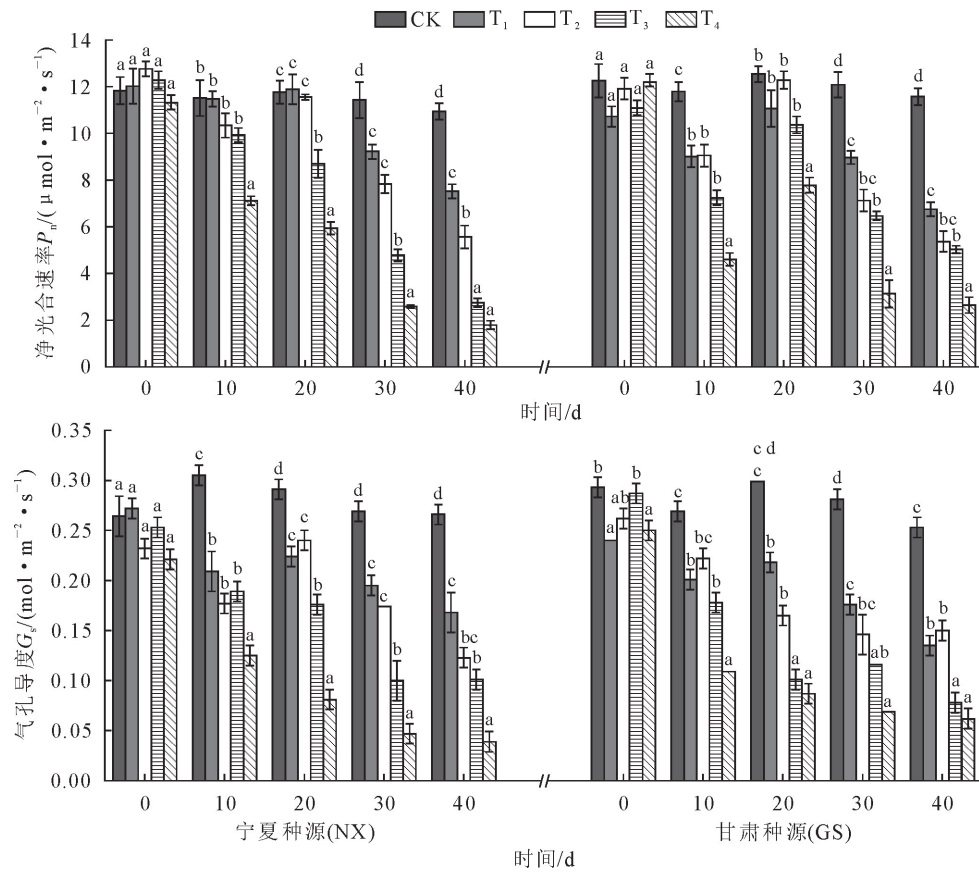


图5 碱性盐胁迫对沙枣叶片  $P_n$ 、 $G_s$  的影响

Fig. 5 The effect of alkaline salt stress on photosynthetic parameters

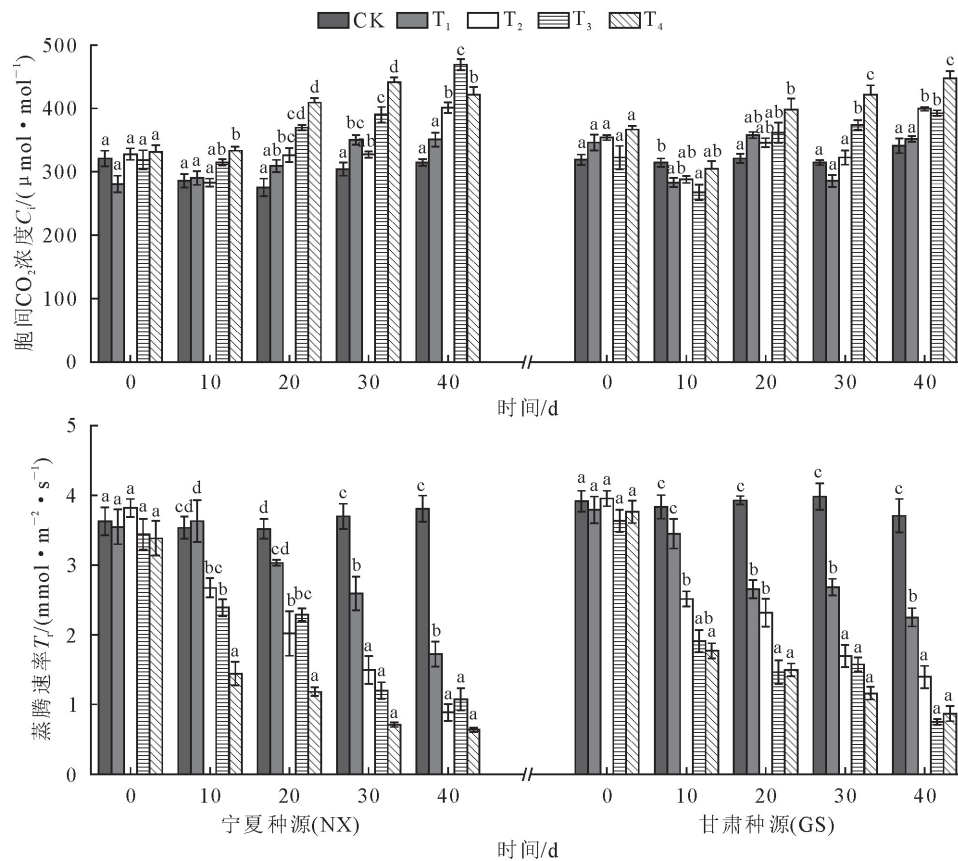


图6 碱性盐胁迫对沙枣叶片  $C_i$ 、 $T_r$  的影响

Fig. 6 The effect of alkaline salt stress on photosynthetic parameters

表 2 不同浓度处理对不同种源沙枣幼苗各指标影响的双因素方差分析

Table 2 Two-factor ANOVA on the effects of different concentration treatments on *E. angustifolia* seedlings from two provenances

因素	生长特性				生理特性												
	叶长 生长量	叶宽 生长量	新梢 生长量	地径 生长量	MP	MDA	Pro	SS	SP	SOD	POD	Chl	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$T_r$	
种源	NS	** ** *	** ** *	NS	** ** *	** ** *	** ** *	NS	** ** *	*	NS	** ** *	NS	NS	NS	** *	
浓度	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	** ** *	
种源×浓度	** ** *	NS	** *	*	** ** *	** *	NS	NS	*	** ** *	NS	NS	** *	*	** ** *	** ** *	

注:“\*”表示影响达到 0.05 的显著水平,“\*\*”表示影响达到 0.01 的显著水平,“\*\*\*”表示影响达到 0.001 的显著水平,NS 表示无显著影响。

表 3 碱性盐胁迫下沙枣苗的回归方程及其耐碱性盐阈值

Table 3 Regression equation and salt tolerance threshold of *E. angustifolia* seedlings under alkaline salt stress

沙枣种源	回归方程	$R^2$	耐碱性盐阈值(%)
NX	$y=20.820-10.977x$	$R^2=0.969$	0.917
GS	$y=19.856-9.727x$	$R^2=0.975$	0.966

表 4 基于主成分分析的 2 种源沙枣耐碱性盐指标主成分载荷表

Table 4 Load list of principle components among alkali tolerance index of *E. angustifolia* from two provenances

沙枣种源	主成分	指标											
		MP	Chl	MDA	SS	Pro	SP	SOD	POD	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$T_r$
NX	1	0.970	-0.938	0.978	0.961	0.972	0.710	0.260	-0.104	-0.968	-0.949	0.917	-0.955
	2	-0.138	0.254	-0.005	0.117	-0.034	0.556	0.875	0.933	0.165	-0.065	-0.242	-0.095
GS	1	0.929	-0.955	0.933	0.984	0.934	0.857	0.444	-0.213	-0.909	-0.944	0.630	-0.955
	2	0.072	0.194	-0.230	-0.061	-0.053	0.312	0.827	0.891	0.008	-0.166	-0.498	-0.168

表 5 基于主成分分析的 2 种源沙枣耐碱性盐指标主成分系数及贡献率

Table 5 Proportion and coefficient of alkali tolerance index of *E. angustifolia* from two provenances

沙枣种源	主成分	指标												特征值	贡献率 (%)	累积 贡献率(%)
		MP	Chl	MDA	SS	Pro	SP	SOD	POD	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$T_r$			
NX	1	0.327	-0.316	0.329	0.324	0.327	0.239	0.088	-0.035	-0.326	-0.320	0.309	-0.322	8.817	73.477	73.477
	2	-0.094	0.173	-0.003	0.08	-0.023	0.380	0.598	0.637	0.113	-0.044	-0.165	-0.065	2.144	17.87	91.347
GS	1	0.319	-0.328	0.320	0.338	0.321	0.294	0.152	-0.073	-0.312	-0.324	0.216	-0.328	8.490	70.754	70.754
	2	0.051	0.138	-0.163	-0.043	-0.038	0.222	0.588	0.633	0.006	-0.118	-0.354	-0.119	1.981	16.508	87.261

2.144,贡献率分别为 73.477%、17.870%,累积贡献率达到了 91.347%。GS 沙枣 2 主成分的特征值分别为 8.490、1.981,贡献率分别为 70.754%、16.508%,累积贡献率 87.261%,代表了绝大部分信息,原各单项指标可由这 2 个主成分指标来代替。

以各指标对应系数为权重构建 NX、GS 沙枣评分模型表达式,并以归一化处理的方差贡献率为权重,构建综合评分模型表达式

$$NX:F=0.804 \times F_1+0.196 \times F_2$$

$$GS:F=0.811 \times F_1+0.189 \times F_2$$

将各项指标代入综合评分模型,计算出 NX、GS 种源沙枣的综合得分分别为 1.049、1.146,同样说明 GS 沙枣耐碱性盐能力强于 NX 沙枣。

3 结论与讨论

3.1 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗生长特性的影响

碱性盐胁迫下,植物最敏感和直接的表现抑制植株生长<sup>[12]</sup>。NX 沙枣的叶长生长量在  $T_1$  下高于对照,当盐含量大于  $T_1$  时各生长量下降,表现出“低促高抑”的现象,这与流苏<sup>[13]</sup>、盐穗木<sup>[14]</sup>的表现类似。这种现象可能是因为低浓度碱性盐胁迫促进了沙枣细胞的渗透调节过程<sup>[13]</sup>,同时说明了 NX 沙枣耐受低浓度的碱性盐胁迫的能力高于 GS 沙枣;高浓度碱性盐胁迫对 2 种源沙枣的生长影响较大,整体上看 NX 沙枣苗各生长量受胁迫影响较大。这

是由于 NX、GS 沙枣长期生长于不同环境条件下,体内遗传物质突变、迁移等因素的影响而表现出了在胁迫条件下抗逆性的差异<sup>[15]</sup>。

### 3.2 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗生理特性的影响

碱性盐胁迫下,植物的膜系统最先受到迫害,引起膜脂氧化反应,MDA 是植物膜脂过氧化的产物之一,科学研究中常用膜透性和 MDA 含量来反映细胞膜的受害程度<sup>[16-17]</sup>。在胁迫前期, $T_1$  胁迫下,2 种源沙枣膜透性、MDA 含量与对照差异不显著,表明在低浓度短时间胁迫下,沙枣的细胞膜系统未受到明显盐害。胁迫后期,高碱性盐胁迫致使沙枣膜脂过氧化程度加剧,该结果与 NaCl 胁迫下对尖果沙枣、大果沙枣<sup>[18]</sup>耐盐性研究的结论一致;40 d 时  $T_4$  浓度处理下,NX 沙枣 MP 较 CK 上升 126%,GS 沙枣较 CK 上升 80%,这表明 NX 沙枣的细胞膜受损程度高于 GS。

逆境条件下,植物通过积累脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)作为重要的有机渗透调节物质,来平衡调节渗透压进行自我保护,是植物抗逆性强弱体现<sup>[19-20]</sup>。40 d 时,2 种源沙枣在各处理的  $T_3$  下 Pro 值均上升至最大值,其中 NX 沙枣的 Pro 含量的升幅较大;Pro 在这个过程中作为渗透调节物质的同时又能清除活性氧,而 SS 含量增加,可以提高植物的保水力,进而减少碱性盐胁迫对植物的损伤<sup>[20-21]</sup>。胁迫初期,由于沙枣产生了应激性使得 2 种源沙枣 SP 含量均显著上升;随着胁迫的进行,SP 含量出现不同幅度的下降,这是因为受到盐分胁迫,蛋白质的分解加快,形成包括 Pro 在内的各种氨基酸,使得 SP 含量下降;胁迫后期,沙枣细胞膜受到损害,膜蛋白水解成 SP,从而导致 SP 含量上升<sup>[22]</sup>。试验结果表明在碱性盐胁迫下,表现为 Pro、SS 及 SP 通过交替积累和转化发挥渗透调节作用来平衡细胞渗透势,从而提高沙枣的耐盐碱能力<sup>[23-24]</sup>。

盐碱胁迫下,植物体内的酶促反应和非酶促反应两类活性氧清除系统对于维持细胞膜的稳定性,保障植物正常生理代谢具有重要意义,酶促反应中 SOD、POD 等酶起重要作用<sup>[25-26]</sup>。随着胁迫时间延长,NX、GS 沙枣的 SOD 活性、POD 活性表现出先上升后下降的趋势,这与对白花泡桐<sup>[27]</sup>和榉树<sup>[28]</sup>的研究结论一致。在短期碱性盐胁迫下,沙枣的保护酶活性均维持在较高的水平,相互协作消除植物体内多余的活性氧自由基,从而防止膜系统受到损伤。随胁迫时间的延长及碱性盐浓度的增加,SOD、POD 活性显著降低,保护酶系统受到一定程度的伤害,最终导致细胞膜系统受到损伤。

碱性盐胁迫导致植物叶片的叶绿素(Chl)含量减少,原因是胁迫增强了植物体内的叶绿素酶活性,使叶绿体发生降解,或是减少了叶绿素结合蛋白的形成,造成 Chl 含量降低,且盐碱浓度越高抑制程度越大<sup>[29]</sup>,叶绿素含量的大小并不直接反映植物耐盐性,但能表示植物在胁迫条件下光合作用的强弱<sup>[30]</sup>。本研究表明在盐害初期,低浓度碱性盐可促进 Chl 的合成;在高浓度碱性盐胁迫下,Chl 的合成受到的抑制最大,该结果与 NaCl 胁迫对白玉兰<sup>[31]</sup>、紫穗槐幼苗<sup>[32]</sup>叶绿素总量的影响一致。整体来看,NX 沙枣的 Chl 含量降幅小于 GS。

### 3.3 碱性盐胁迫对不同种源沙枣苗光合作用的影响

光合作用为植物提供物质和能量,盐胁迫下会随着胁迫含量的加重降幅逐渐增大<sup>[33]</sup>。胁迫初期,沙枣  $G_s$  降低,这是由于初期气孔限制导致  $C_i$  降低,从而使  $P_n$  下降;胁迫后期,沙枣叶片的  $G_s$ 、 $T_r$  值随盐浓度增大而持续下降, $C_i$  随盐浓度增大而上升,2 种源沙枣  $P_n$  受到显著的抑制,这主要是由非气孔限制所引起的<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,沙枣受到碱性盐胁迫后其光合作用下降是由气孔因素和非气孔因素共同影响的,并且气孔和非气孔因素随胁迫浓度的变化和胁迫时间的长短而处于动态变化之中。

### 3.4 不同种源沙枣耐碱性盐程度综合评价

评价植物抗逆性的生长指标、生理生化指标和光合指标较多,且各指标间有一定的相关性和重叠性,因此综合各指标分析植物的耐盐性更为合理<sup>[35]</sup>。本研究综合植株生理特性、光合参数等 12 项指标构建综合评分模型,分析发现 MDA、Pro、MP 各项指标为评价 NX 沙枣耐碱性盐程度的主要指标,POD、SOD 含量为辅助指标;SS、Chl、Tr 含量为评价 GS 沙枣耐碱性盐程度的主要指标,POD、SOD 含量为辅助指标;研究认为 GS 沙枣耐碱性盐能力强于 NX 沙枣。因此,在碱性盐渍土进行沙枣引种栽培时,建议选择 GS 种源沙枣,能有效发挥其生态和经济效益。

### 参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, (5): 837-845.  
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, (5): 837-845. (in Chinese)
- [2] 张若溪,蔡亚南,李庆卫. 混合盐胁迫对栎树光合生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 98-106.  
ZHANG R X, CAI Y N, LI Q W. Effect of Mixed Salt Stress on Photosynthetic Physiological Indexes of *Koelreuteria pan-*



- iculata* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42 (1): 98-106. (in Chinese)
- [3] KARAMI O, BAHMANI P R. Plant regeneration through callus cultures derived from immature-cotyledon explants of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) [J]. *Trees Structure & Function*, 2009.
- [4] SHAH J J F, TIBBETS M J H M. *Elaeagnus angustifolia* Elevates Soil Inorganic Nitrogen Pools in Riparian Ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2010, 13(1): 46-61.
- [5] JOHNSON G V, SCHWINTZER C R, TJEPKEMA J D. The acetylene-induced decline in nitrogenase activity in root nodules of *Elaeagnus angustifolia* [J]. *Plant & Soil*, 1997, 191 (2): 157-161.
- [6] 林静. NaCl胁迫对大果沙枣光合特性的影响[D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
- LIN J. Effects of salt stress on the photosynthesis characteristics of *Elaeagnus moorcroftii* Wall ex Schlecht [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2017. (in Chinese)
- [7] 刘正祥, 张华新, 杨升, 等. NaCl胁迫对沙枣幼苗生长和光合特性的影响[J]. *林业科学*, 2014, 50(1): 32-40.
- LIU Z X, ZHANG H X, YANG S, *et al.* Effects of NaCl Stress on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Elaeagnus angustifolia* Seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(1): 32-40. (in Chinese)
- [8] 李思思. NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>盐胁迫对沙枣生长和生理生化特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- LI S S. Effects of NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Saline Stress on Growth and Physiological and Biochemical Characteristics of *Elaeagnus angustifolia* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [9] 高俊凤. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 王殿, 袁芳, 王宝山, 等. 能源植物杂交狼尾草对NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 572-577.
- WANG D, YUAN F, WANG B S, *et al.* Response of plant biofuel hybrid Pennisetum to NaCl stress and its salinity threshold [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(6): 572-577. (in Chinese)
- [12] 李彦, 张英鹏, 孙明, 等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, (1): 258-265.
- LI Y, ZHANG Y P, SUN M, *et al.* Research Advance in the Effects of Salt Stress on Plant and the Mechanism of Plant Resistance [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, (1): 258-265. (in Chinese)
- [13] 刘文静, 欧阳敦君, 韩丽霞, 等. 盐碱胁迫对流苏幼苗生长及离子分布的影响[J]. *中国野生植物资源*, 2019, 38(6): 27-32.
- LIU W J, OUYANG D J, HAN L X, *et al.* Effects on Growth and Ion Allocation under Salt-alkaline Stresses about *Chionanthus retusus* Seedlings [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2019, 38(6): 27-32. (in Chinese)
- [14] 吉小敏, 彭钊植, 雷春英, 等. 不同类型盐分对盐穗木种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 114-119.
- JI X M, PENG M Z, LEI C Y, *et al.* Effects of Different Types of Salinity on Seed Germination and Young Seedling Growth of *Halostachys caspica* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 114-119. (in Chinese)
- [15] 杨升, 张华新, 杨秀艳, 等. NaCl胁迫下不同种源沙枣的生长表现差异[J]. *林业科学*, 2015, 51(9): 51-58.
- YANG S, ZHANG H X, YANG X Y, *et al.* Differential Growth Performance of *Elaeagnus angustifolia* Provenances under NaCl Stress [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(9): 51-58. (in Chinese)
- [16] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 422-439.
- [17] POMPELLI M F, BARATA-LUIS R, VITORINO H S, *et al.* Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2010, 34(8): 1207-1215.
- [18] 张晓勉, 王泳, 高智慧, 等. 盐胁迫对尖果沙枣和大果沙枣膜脂过氧化和渗透调节的影响[J]. *浙江林业科技*, 2012, 32(4): 1-5.
- ZHANG X M, WANG Y, GAO Z H, *et al.* Effect of Salt Stress on Membrane Lipid Peroxidation and Osmotic Adjustment in *Elaeagnus oxycarpa* and *E. moorcroftii* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2012, 32(4): 1-5. (in Chinese)
- [19] 樊秀彩, 张亚冰, 刘崇怀, 等. NaCl胁迫对葡萄幼苗叶片有机渗透调节物质和膜脂过氧化的影响[J]. *果树学报*, 2007, (6): 765-769.
- FAN X C, ZHANG Y B, LIU C H, *et al.* Effects of NaCl stress on the contents of organic osmolytes and lipid peroxidation in grape leaves [J]. *Journal of Fruit Science*, 2007, (6): 765-769. (in Chinese)
- [20] LI G, WAN S W, ZHOU J, *et al.* Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels [J]. *Industrial Crops and Products*, 2010, 31(1): 13-19.
- [21] DUREL. Plant responses to cellular dehydration during environment Stress [J]. *Plant Physiology*, 1993, 103(10): 91-93.
- [22] 田晓艳, 刘延吉, 郭迎春. 盐胁迫对NHC牧草Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Pro、可溶性糖及可溶性蛋白的影响[J]. *草业科学*, 2008, (10): 34-38.
- TIAN X Y, LIU Y J, GUO Y C. Effect of salt stress on Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、proline, soluble sugar and protein of NHC [J]. *Pratacutural Science*, 2008, (10): 34-38. (in Chinese)
- [23] MEGDICHE W, AMOR N B, DEBEZ A, *et al.* Salt tolerance of the annual halophyte *Cakile maritima* as affected by the provenance and the developmental stage [J]. *Acta Physiol Plant*, 2007, 29(4): 375-384.
- [24] AHMAD P, ASHRAF M, HAKEEM K R, *et al.* Potassium starvation-induced oxidative stress and antioxidant defense responses in *Brassica juncea* [J]. *J Plant Interact*, 2014, 9(1): 1-9.
- [25] 汪晓丽. 大叶榉新品种‘恨天高’对盐碱胁迫的生理生化响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- WANG X L. Physiological and Biochemical responses of the

- new cultivar of *Zelkova schneideriana* 'Hentiangao' under Saline-alkalinity Stress[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016. (in Chinese)
- [26] AMOR N B, JIMÉNEZ A, MEGDICHE W, *et al.* Response of antioxidant systems to NaCl stress in the halophyte *Cakile maritima*[J]. *Physiol Plantarum*, 2010, 126(3): 446-457.
- [27] 朱秀红, 李职, 蔡曜琦, 等. 白花泡桐幼苗对盐、干旱及其交叉胁迫的生理响应[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 135-143.  
ZHU X H, LI Z, CAI Y Q, *et al.* Physiological Responses of *Paulownia fortunei* Seedling under Salt, Drought and their Intercross Stress[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(3): 135-143. (in Chinese)
- [28] 韩浩章, 王晓立, 张丽华, 等. 盐碱胁迫对榉树幼苗生长期生理特性的影响[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(1): 9-14.  
HAN H Z, WANG X L, ZHANG L H, *et al.* Effects of Saline-alkali Stress on Physiological Characteristics of Beech Seedling[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2021, 40(1): 9-14. (in Chinese)
- [29] RISHI A, SNEHA S, CHANDRA S. Effect of Short Term Salt Stress on Chlorophyll Content, Protein and Activities of Catalase and Ascorbate Peroxidase Enzymes in Pearl Millet [J]. *American Journal of Plant Physiology*, 2014, 9(1): A1422.
- [30] 龚佳, 倪细炉, 李健. NaHCO<sub>3</sub> 胁迫对宁夏 4 种灌木生长及光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 8-15.  
GONG J, NI X L, LI J, *et al.* Effects of NaHCO<sub>3</sub> Stress on the Growth and Photosynthetic Characteristics of Four Shrubs in Ningxia[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 8-15. (in Chinese)
- [31] 金荷仙, 沈徐悦, 陈蓉蓉, 等. NaCl 胁迫对白玉兰形态及生理特性的影响[J]. 植物研究, 2021, 41(4): 596-603.  
JIN H X, SHEN X Y, CHEN R R, *et al.* Effects of NaCl Stress on Morphological and Physiological Characteristics of *Magnolia denudata* Desr. [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2021, 41(4): 596-603. (in Chinese)
- [32] 王涛, 蒙仲举, 张佳鹏, 等. NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 25-30.  
WANG T, MENG Z J, ZHANG J P, *et al.* Effects of NaCl Stress on the Growth and Physiological Characteristics of *Amorpha fruticosa* Seedlings[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2021, 36(1): 25-30. (in Chinese)
- [33] ZHANG H, LI D, ZHOU Z, *et al.* Soil water and salt affect cotton (*Gossypium hirsutum* L.) photosynthesis, yield and fiber quality in coastal saline soil[J]. *Agr Water Manage*, 2017, 187: 112-121.
- [34] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomata conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [35] 杨佳鑫, 李庆卫, 郭子燕, 等. 3 个梅花品种幼苗耐盐性综合评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(8): 65-74.  
YANG J X, LI Q W, GUO Z Y, *et al.* Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2019, 47(8): 65-74. (in Chinese)