

NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗生长及生理特性的影响

王 涛¹, 蒙仲举^{1*}, 张佳鹏¹, 雷虹娟², 张 格³

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 包头市达茂旗民安镇综合保障和技术推广中心, 内蒙古 达茂旗 014500; 3. 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:为进一步探讨紫穗槐幼苗对 NaCl 胁迫的适应机制, 选取 1 年生紫穗槐幼苗为供试材料, 采用盆栽灌溉盐水控制土壤盐含量的方法进行胁迫处理, 设计 NaCl 含量分别达到土壤干重的 0.1%、0.3%、0.5%、0.7% 4 个梯度, 以不作任何处理作为对照(CK), 研究不同浓度 NaCl 胁迫下紫穗槐幼苗的生长与生理指标变化。结果表明, 随着土壤盐浓度的增加, 紫穗槐幼苗的株高生长量、分枝长度生长量、基径生长量及叶片相对含水量均呈下降趋势, 紫穗槐幼苗叶片的叶绿素含量、抗逆性酶活性及可溶性蛋白质含量呈先上升后下降的趋势。0.1% 土壤盐浓度下叶绿素含量出现峰值, SOD 活性及可溶性蛋白质含量在 0.3% 土壤盐浓度下出现峰值, POD 活性在 0.5% 土壤盐浓度下出现峰值。总体上, 紫穗槐幼苗可以适应 0.1%~0.3% 的 NaCl 胁迫, 表现出一定的耐盐性。

关键词:紫穗槐; NaCl 胁迫; 生长指标; 生理指标

中图分类号: S728.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2021)01-0025-06

Effects of NaCl Stress on the Growth and Physiological Characteristics of *Amorpha fruticosa* Seedlings

WANG Tao¹, MENG Zhong-ju^{1*}, ZHANG Jia-peng¹, LEI Hong-juan², ZHANG Ge³

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

2. Comprehensive Support and Technology Promotion Center Minan Darhan Muminggan Joint Banner Baotou, Darhan Muminggan Joint Banner 014500, Inner Mongolia, China;

3. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to understand the adaptive mechanism of *Amorpha fruticosa* seedlings under different NaCl stress concentrations, annual seedlings of *A. fruticosa* were used as materials, the potted experiment was designed to control NaCl concentration (0%, the control, 0.1%, 0.3%, 0.5%, and 0.7% of the soil dry weight). The changes of the seedling growth and physiological indexes under the stress were analyzed. The results showed that with the increase of NaCl concentration, the growths of seedling height, branch length, basal diameter, and relative water content decreased gradually. The chlorophyll content, stress-resistant enzyme activity, and soluble protein content in the leaves increased first and then decreased. The chlorophyll content reached the peak value under 0.1% salt concentration. The SOD enzyme activity and soluble protein content peaked under 0.3% salt concentration. The POD enzyme activity peaked under 0.5% salt concentration. Overall, *A. fruticosa* seedlings could adapt to 0.1%–0.3% soil salt concentration stress, and presented a certain tolerance to NaCl stress.

Key words: *Amorpha fruticosa*; NaCl stress; growth index; physiological index

收稿日期: 2020-04-04 修回日期: 2020-05-10

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项: 重点区域荒漠化过程与生态修复研究与示范(zdxx2018058~3); 内蒙古自治区第十届“草原英才”(PC201907220608)。

作者简介: 王 涛, 硕士。研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1145468757@qq.com

* 通信作者: 蒙仲举, 教授, 博士生导师。研究方向: 荒漠化防治。E-mail: mengzhongju@126.com

土壤盐渍化会减缓植物的生长,抑制植物的代谢过程,甚至会导致植物出现萎蔫死亡的状况^[1]。不同物种有着不同的耐盐能力,这主要取决于该物种的遗传和生理生化特性。紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)又名棉槐、棉条、紫槐,属豆科(Leguminosae)多年生小灌木^[2],原产于美国的东北部和东南部,后被我国引入,主要分布于我国的西北地区、长江、淮河流域的平原和四川盆地^[3]。其还是优良的绿肥和蜜源植物,具有耐盐、固氮等特性^[4-5],在北方边坡防护工程中被广泛应用^[6-7],被誉为水土保持的“优良树种”^[8]。邹丽娜等^[9]发现,随着 Na_2SO_4 溶液浓度的增加,紫穗槐幼苗的光合参数、抗逆性酶活性及渗透调节物质显著增加。江远芳等^[6]利用不同浓度的 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 及二者混合盐对紫穗槐幼苗进行试验,发现单盐 Na_2CO_3 对植株的伤害程度相比 NaHCO_3 和混合盐处理严重。赵建诚等^[10]利用不同浓度的 NaCl 对紫穗槐种子进行处理,研究发现,随胁迫强度的增加,种子的发芽率、发芽势、活力指数均呈现下降趋势。目前,针对紫穗槐幼苗盐胁迫的研究主要集中于 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 及 NaHCO_3 胁迫对紫穗槐幼苗的影响,而有关 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗影响的研究较少。本试验通过研究紫穗槐幼苗在 NaCl 胁迫生境中的适应性表现,探究紫穗槐幼苗在 NaCl 单盐胁迫下的耐盐机制,为紫穗槐幼苗的栽植提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

选取健壮、长势均匀、大小一致的 1 年生紫穗槐幼苗,于 2019 年 4 月中旬将供试幼苗移栽于内蒙古农业大学沙生植物重点实验室内进行盆栽试验,实验室光照时间 10 h,昼夜温度为 $26^\circ\text{C}/19^\circ\text{C}$,相对湿度为 50%~60%。选用自然晾干并过 4 mm 筛的土和营养土按照 2:1 配比均匀,后装入上口径 25 cm、下口径 20 cm、高度为 20 cm 的底部有孔花盆,每盆移植苗木 1 株。

1.2 试验设计

本试验依据土壤干质量施盐^[11-12],试验共设计 4 个 NaCl 浓度梯度, NaCl 含量分别达到土壤干质量的 0.1%、0.3%、0.5% 和 0.7%,以不作任何处理为对照(CK),每组处理设置 3 个重复。根据生长特点,2019 年 4—7 月为缓苗期,2019 年 7 月 10 日开始采用浇灌盐水控制土壤盐含量的方式进行施盐,为避免盐激反应,每个处理按照其预设盐含量呈等差数列灌溉施入,每 2 d 浇灌 1 次,每次每盆定量 3 L,对照(CK)采用等量清水灌溉。试验期间,为防

止盐分损失及保证盐分渗透均匀,每天称重补水,从而平衡蒸发量,在花盆下放置托盘,每天将渗漏出的溶液返回花盆中。同时为避免边际效应,每 10 d 轮换 1 次盆钵摆放位置。2019 年 8 月中旬开始选取植株中上部发育完全且生长健康的新鲜叶片作为生理试验待测样品。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 盐害等级观测 为较好地反映苗木的受害情况,在孙晶等^[13]研究基础上结合实际情况稍加改动,将盐胁迫对紫穗槐幼苗的危害程度分为以下 5 个等级,0 级:植物无明显盐胁迫危害症状;1 级:植物约 1/4 的叶尖、叶缘变黄;2 级:植物约有 1/2 的叶尖、叶缘焦枯;3 级:植物约 1/2~3/4 的叶尖、叶缘焦枯并且伴随有大量落叶现象;4 级:植物叶片全部落下,枝条干枯。在盐胁迫处理后的第 10、20 天观察和记录紫穗槐幼苗叶片的颜色及形态变化。

1.3.2 生长指标测定 在胁迫处理前测定株高(H_0)、分枝长度(h_0)及基径(D_0),在胁迫处理后的第 20 天再次测定株高(H_1)、分枝长度(h_1)及基径(D_1),测量植株基部/分枝基部到植株生长点/分枝生长点的长度为植株的株高(H)及分枝长度(h),植株基部基径为植株基径(D)。然后计算胁迫前后的株高生长量 ΔH ($\Delta H = H_1 - H_0$)、分枝长度生长量 Δh ($\Delta h = h_1 - h_0$)和基径生长量 ΔD ($\Delta D = D_1 - D_0$)。

1.3.3 生理指标测定 参照文献^[14],在胁迫后的第 20 天测定相关生理指标,其中叶片相对含水量用烘干称重法测定,计算公式:

$$\text{叶片相对含水量(RWC)/\%} = (\text{自然鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和鲜重} - \text{干重}) \quad (1)$$

叶绿素含量用 80% 的丙酮浸提法测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性用氮蓝四唑(NBT)法测定,过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚显色法测定,丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸(TBA)法测定,可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝法测定。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 对数据进行整理,使用 SPSS 25 软件对试验数据进行单因素方差分析,使用 Origin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 紫穗槐幼苗的胁迫状况等级

紫穗槐受不同的浓度 NaCl 胁迫的症状见表 1,伴随着土壤盐含量的增大及胁迫时间延长,紫穗槐幼苗的盐害症状逐步加重。0.3% 土壤盐含量胁迫第 20 天,紫穗槐幼苗叶片叶尖、叶缘开始变黄,盐害

叶片占整株植物叶片的 1/4; 0.5% 土壤盐含量胁迫第 10 天, 紫穗槐幼苗已经出现叶片的叶尖、叶缘变黄, 当胁迫第 20 天, 紫穗槐幼苗 1/2 的叶片的叶尖、

叶缘焦枯及发生卷曲。0.7% 土壤盐含量胁迫第 20 天, 紫穗槐幼苗 1/2~3/4 的叶尖、叶缘焦枯并且伴随有大量落叶(表 1、图 1)。

表 1 NaCl 胁迫下紫穗槐幼苗的胁迫状况等级

Table 1 Stress status of *A. fruticosa* seedlings under NaCl stress

		胁迫状况等级				
土壤盐含量/%		CK	0.1	0.3	0.5	0.7
盐胁迫时间/d	10 d	0	0	0	1	2
	20 d	0	0	1	2	3

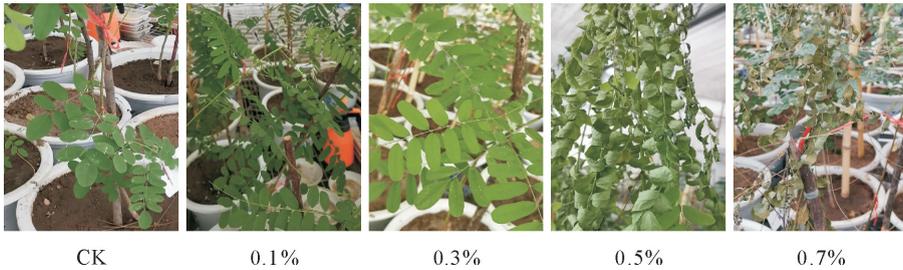


图 1 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗的叶片颜色及形态的影响(20 d)

Fig. 1 Effects of NaCl stress on leaf color and morphology of *A. fruticosa* seedlings(20 d)

2.2 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗生长特征的影响

由表 2 可知, 随着土壤盐含量的递增, 紫穗槐幼苗株高生长量、分枝长度生长量、基径的生长量均显著低于对照($P < 0.05$)。0.1%、0.3%、0.5%、0.7% 盐胁迫下, 紫穗槐幼苗株高生长量分别比对照降低了 20.69%、86.21%、81.59% 和 83.93%; 幼苗分枝长度生长量分别降低了 10.72%、75.03%、71.81%、78.56%; 基径生长量分别降低了 26.58%、40.27%、39.73% 和 44.38%。

表 2 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗生长指标的影响

Table 2 Effects of NaCl stress on the growth indexes of

A. fruticosa seedlings

土壤盐含量/%	株高生长量/cm	分枝长度生长量/cm	基径生长量/mm
CK	14.50±1.08a	9.33±0.50a	0.365±0.05a
0.1	11.50±1.47b	8.33±0.50a	0.268±0.03ab
0.3	2.00±1.41c	2.33±0.47b	0.218±0.04b
0.5	2.67±0.47c	2.63±0.45b	0.220±0.03b
0.7	2.33±0.47c	2.00±0.82b	0.203±0.02c

注: 同列中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

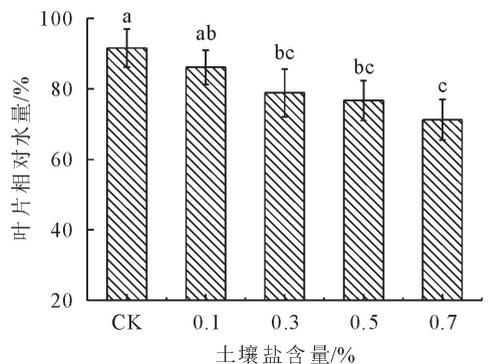
2.3 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗生理特征的影响

2.3.1 对叶片叶绿素含量及相对含水量的影响

随着土壤盐含量的增加, 紫穗槐幼苗叶片相对含水量呈现下降趋势(图 2), 土壤盐含量为 0.3%、0.5%、0.7% 的胁迫处理的叶片相对含水量显著低于对照($P < 0.05$)。可见低浓度的盐溶液对紫穗槐幼苗的水分代谢影响较小, 而高浓度的盐溶液则会抑制紫穗槐幼苗的水分代谢过程。

由表 3 可知, 随着土壤盐含量增加, 紫穗槐幼苗叶片光合色素除叶绿素 a/b(Chla/b) 外, 叶绿素 a

(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、类胡萝卜素(Chlx)、和叶绿素总量(Chla+b) 等均呈现先增大后减小的趋势。当土壤盐含量 $< 0.1\%$ 时, 盐胁迫对紫穗槐幼苗叶片叶绿素含量起到一定的促进作用; 当土壤盐含量 $> 0.1\%$ 时, 紫穗槐幼苗叶片叶绿素含量显著减少; 当土壤盐含量为 0.1% 时, 紫穗槐幼苗叶片的 Chla、Chlb、Chlx、Chla+b 含量, 分别比对照增加了 4.6%、39.81%、3.08% 和 10.89%。当土壤盐含量为 0.5% 和 0.7% 时, 紫穗槐幼苗叶片的 Chla、Chlx、Chla/b、Chla+b 含量显著降低。



注: 图中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 2 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗叶片相对含水量的影响

Fig. 2 Effects of NaCl stress on RWC of *A. fruticosa* seedlings

2.3.2 对叶片抗逆性酶的影响 超氧化物歧化酶(SOD)与过氧化物酶(POD)等酶协同防御来自外界不良环境对细胞膜系统的伤害, 故其活性的高低表征着植被对外界不良环境的抵抗性强弱^[15-16]。由图 3 可知, NaCl 胁迫下紫穗槐叶片的 SOD 及 POD 活性随着土壤盐含量的增加均呈现先增大后减小的

趋势。当土壤盐含量为 0.3% 时, SOD 活性达到峰值, 较对照增加 15.92% (图 3A)。当土壤盐含量为 0.5% 时, POD 活性达到峰值, 较对照增加 22.51% (图 3B)。

表 3 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗叶片光合色素含量的影响

Table 3 Effects of NaCl stress on photosynthetic pigment concentration in the leaves of *A. fruticosa* seedlings

土壤盐含量/%	叶绿素质量分数			叶绿素 a/b	叶绿素 a+b /(mg·g ⁻¹)
	叶绿素 a /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b /(mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 /(mg·g ⁻¹)		
CK	2.045±0.086a	0.432±0.014c	0.357±0.025a	4.734±0.341a	2.476±0.075a
0.1	2.139±0.107a	0.604±0.048a	0.368±0.027a	3.540±0.271b	2.743±0.129b
0.3	1.924±0.092a	0.573±0.007ab	0.365±0.037a	3.356±0.165b	2.497±0.093b
0.5	1.718±0.095b	0.524±0.027b	0.305±0.002b	3.280±0.352b	2.242±0.068c
0.7	1.469±0.060b	0.435±0.018c	0.283±0.025b	3.375±0.079b	1.904±0.075d

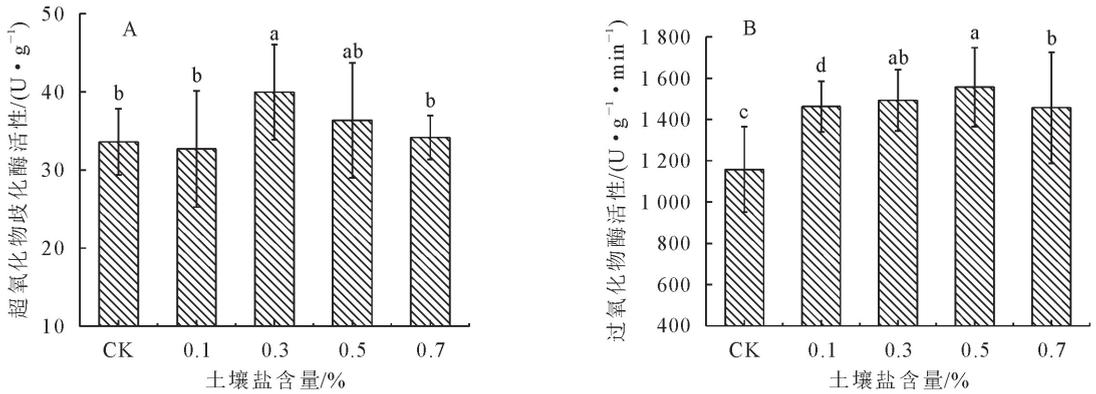


图 3 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of NaCl stress on antioxidant enzyme activities in leaves of *A. fruticosa* seedlings

2.3.3 对叶片丙二醛(MDA)含量的影响 MDA 含量的大小反映着植物膜系统受害的程度, 植物体内的 MDA 含量越高, 表示植物组织的保护能力越弱^[17]。如图 4 所示, 随着土壤盐含量增加, MDA 含量呈现增加趋势, 4 种梯度下 MDA 含量较对照分别增加了 15.14%、24.35%、21.81% 及 29.71%。

0.1%、0.3% 时, 可溶性蛋白质含量分别比对照增加 3.39%、15.87%; 当土壤盐含量为 0.5%、0.7% 时, 可溶性蛋白质含量分别较对照降低 28.30%、68.39%。

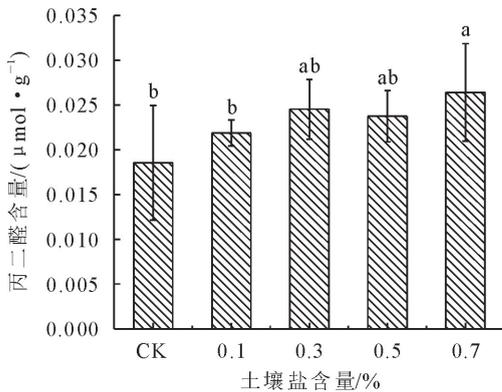


图 4 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗叶片丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effects of NaCl stress on MDA concentration in the leaves of *A. fruticosa* seedlings

2.3.4 对叶片可溶性蛋白质含量的影响 李婷婷^[18]的研究表明, 在逆境作用下, 植物体内渗透压的高低与其诱导合成新的可溶性蛋白质的能力有关。由图 5 可见, 随着土壤盐含量增加, 可溶性蛋白质含量呈现先增高后降低的趋势。当土壤盐含量在

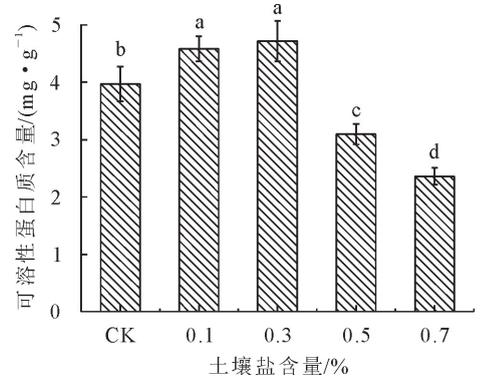


图 5 NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗叶片可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 5 Effects of NaCl stress on the soluble protein content in the leaves of *A. fruticosa* seedlings

3 结论与讨论

通过对紫穗槐幼苗在 NaCl 胁迫生境的适应性表现观察及相应的生长和生理指标测定发现, 紫穗槐幼苗具有一定的耐盐性。在 0.1%、0.3% 土壤盐浓度下, 紫穗槐幼苗可以通过其自身的抗逆性机制来抵抗盐胁迫, 如提高叶绿素含量、抗逆性酶活性、

MDA 含量及渗透调节物质含量等。在 0.5% 土壤盐浓度下,紫穗槐幼苗已受到一定程度的盐害,其将根部吸收的盐分转移到叶片中,通过落叶将体内的盐分排出。在 0.7% 土壤盐浓度下,紫穗槐幼苗体内的稳态环境已经完全被打乱,各项指标均变化显著,叶片大量落下,枝条枯萎,生长受到了显著的抑制。综上所述,紫穗槐幼苗在以 NaCl 为主的盐渍土中的生存阈值为 0.3%。

在逆境条件下,植物会通过形态特征与生长状态的改变来适应逆境条件,通过调整生物量等的方式来维持逆境下植株的生长,而其主要方式为减少碳同化量和调节渗透能耗等^[19]。本研究发现,NaCl 胁迫下的紫穗槐幼苗株高生长量、分枝长度生长量及基径生长量在土壤盐含量 > 0.3% 时,生长量较对照减少明显,这与闫永庆等^[20]、韩志平等^[21]、D. Wang et al.^[22] 的研究结果相似,低浓度的盐分含量对植被的影响较小,而高浓度的盐分含量则会明显抑制植物的生长。这可能是在高浓度的盐分条件下,植物会重新调整资源分配格局来适应逆境条件,维持自身的正常生长。

植物通过光合作用积累有机物质,维持自身的生长,光合色素是光合作用的基础,光合色素的主要作用是对光能进行吸收、传递、转化,其质量分数在一定程度上反映植物同化物质的能力^[23-25]。李学孚等^[26] 研究发现,低盐胁迫下,植物叶片叶绿素含量无显著变化。而本研究发现,在低浓度的盐分胁迫下,紫穗槐幼苗叶片的叶绿素含量出现了小幅度的上升,但是随着盐分浓度的递增,叶绿素含量却迅速下降。这可能是由于低浓度的盐胁迫可以加速叶绿素的合成,而高浓度的盐胁迫则会抑制 PEP 羧化酶和 RuPEP 羧化酶的活性,降低光合色素的合成速率,加速叶绿素分解,使叶绿素含量下降。这与赵佳伟等^[27]、袁斌玲等^[28] 的研究结果相似。这也证明了叶绿体是对盐胁迫较为敏感的细胞器,NaCl 胁迫对紫穗槐幼苗的光合色素含量有低促高抑的作用。本研究中,当土壤盐含量 > 0.3% 时,紫穗槐幼苗叶片叶绿素含量显著下降 ($P < 0.05$)。

在盐胁迫条件下,植物细胞内会产生大量的活性氧自由基,使得细胞内的自由基的产生与消除的动态平衡难以继续维持,导致膜脂双分子层过氧化,产生大量 MDA,破坏细胞膜结构,致使植物的生理失衡^[29-32],MDA 也被认为是膜脂过氧化水平的标志。此时,植物可以通过细胞内的抗氧化酶等酶的协同作用,消除细胞内的多余的自由基来维持植物细胞内正常的代谢活动。而细胞体内的多余的自由基则主要依靠 SOD 和 POD 来清除^[33]。在本研究

中,随着土壤盐含量增加,紫穗槐幼苗叶片中 MDA 含量也不断地增加,说明在 NaCl 胁迫下紫穗槐幼苗细胞内产生了大量的自由基,已经对紫穗槐幼苗细胞的质膜产生了过氧化伤害。土壤盐含量为 0.7% 时,MDA 含量较对照显著增加,说明此时的细胞膜已受到了严重的伤害,体内的代谢过程已被打乱。而紫穗槐幼苗叶片的 SOD 活性和 POD 活性则呈现先上升后下降的趋势,这与李宏博等^[34] 的研究结果相似,说明在低浓度的盐分胁迫下,SOD 和 POD 可以消除紫穗槐幼苗细胞内的自由基。但是,一旦超过一定的盐分浓度,就会抑制抗氧化酶的活性,导致植物体内的抗氧化酶活性下降。本研究中,土壤盐含量为 0.5% 时,SOD 活性开始下降,当土壤盐含量为 0.7% 时,POD 活性开始下降,这是由于大量的 Na^+ 涌入,导致膜质过氧化程度加剧,细胞内多种功能受到破坏,生理代谢紊乱,使得活性氧的增加远远超过其正常歧化能力,导致 SOD 与 POD 活性下降。

盐胁迫环境下,土壤的渗透势较低,会导致植物发生水分亏缺现象,为了应对这种伤害,植物会通过积累一些可溶性物质来降低细胞内的渗透压,维持植物的正常代谢过程^[35]。可溶性蛋白质作为植物体内重要的渗透调节物质,对植物抵抗逆境起着一定的作用。有研究发现^[36],盐胁迫条件下植物叶片的可溶性蛋白质含量会增加。而本研究中,随着土壤盐含量的增加,可溶性蛋白质含量呈先增长后降低的趋势,0.3% 土壤盐含量下,可溶性蛋白质含量达到最高,这是由于低浓度下的盐胁迫诱导产生了大量的可溶性蛋白质,植物通过增加渗透调节物质来减缓因盐胁迫对植株造成的水分亏缺伤害,这与周莹等^[37] 研究结果相似。在高浓度的盐胁迫下,可溶性蛋白质含量下降,这是由于高浓度的盐胁迫抑制了可溶性蛋白质的合成,导致其含量下降。

无机盐中植物对钠盐最为敏感,而钠盐中对植物危害最大的是 NaCl,其也是主要的盐害类型。与前人的研究相比^[2],本研究也发现紫穗槐幼苗对 NaCl 的耐盐性低于其他盐类。

参考文献:

- [1] TÜRKAN I, DEMIRAL T. Recent developments in understanding salinity tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 2-9.
- [2] 穆永光. 盐碱胁迫对紫穗槐生长和生理的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [3] 江远芳. PEG-6000 胁迫下紫穗槐种子和幼苗根系的生理及结构变化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [4] 张国君, 李云, 付元瑞, 等. 刺槐、柠条和紫穗槐青贮品质的比较

- [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 151-156.
- ZHANG G J, LI Y, FU Y R, *et al.* Silage quality of *Robinia pseudoacacia*, *Caragana korshinskii* and *Amorpha fruticosa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 151-156. (in Chinese)
- [5] SONG F Q, TIAN X J, HE X B. The influence of desert false indigo, *amorphafruticosa*, and three arbuscular mycorrhizae fungi on the growth of *Populus ussuriensis* seedlings [J]. New Forests, 2009, 37: 265-273.
- [6] 江远芳, 王竞红, 薛菲. 3种碱性盐胁迫对紫穗槐形态和生理的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(8): 30-33, 64.
- [7] 王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [8] 刘璇. 基于转录组测序技术分析紫穗槐菌根差异表达基因 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.
- [9] 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 等. 盐胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响 [J]. 草业学报, 2011, 20(3): 84-90.
- [10] 赵建诚, 秦柱南, 孙超, 等. 紫穗槐种子萌发对盐旱逆境的生理响应 [J]. 种子, 2012, 31(5): 26-29.
- [11] 任子蓓, 薛腾笑, 任士福. 3种连翘属植物对 NaCl 胁迫的生理响应 [J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(3): 55-60.
- [12] 党晓宏, 高永, 蒙仲举, 等. 3种滨藜属植物幼苗叶片对 NaCl 胁迫的生理响应 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 38-49.
- DANG X H, GAO Y, MENG Z J, *et al.* Leaf physiological characteristics of seedlings of three *Atriplex* species under NaCl stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 38-49. (in Chinese)
- [13] 孙晶, 王庆成, 刘强, 等. NaHCO₃ 胁迫下朝鲜接骨木和茶条槭苗木的生长及生理响应 [J]. 林业科学, 2010, 46(8): 71-77.
- [14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 周琦, 祝遵凌, 施曼. 盐胁迫对鹅耳枥生长及生理生化特性的影响 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(6): 56-60.
- [16] 马剑, 刘贤德, 张芬琴, 等. NaCl 胁迫对文冠果生长及生理生化指标的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 182-187.
- [17] 何树斌, 刘国利, 杨惠敏. 不同水分处理下紫花苜蓿刈割后残茬的光合变化及其机制 [J]. 草业学报, 2009, 18(6): 192-197.
- [18] 李婷婷. NaCl 胁迫对香榧幼苗生长和生理生化特性的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [19] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021-1029.
- [20] 闫永庆, 朱虹, 刘兴亮, 等. 盐胁迫对紫穗槐生长发育及生理特性的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(12): 31-35.
- [21] 韩志平, 张海霞, 刘冲, 等. NaCl 胁迫对黄花菜生长和生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2018, 38(9): 1700-1706.
- HAN Z P, ZHANG H X, LIU C, *et al.* Growth and physiological characteristics of daylily plants under NaCl stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(9): 1700-1706. (in Chinese)
- [22] WANG D, POSS J A, DONOVAN T J, *et al.* Biophysical properties and biomass production of e-lephant grass under saline conditions [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(4): 447-456.
- [23] 赵靓, 杨佳鑫, 禹世豪, 等. 盐胁迫下嫁接对梅花光合生理特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 43-48.
- ZHAO L, YANG J X, YU S H, *et al.* Effects of grafting on the photosynthetic physiological characteristic and chlorophyll fluorescence parameters of *Prunus mume* under salt stress [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 43-48. (in Chinese)
- [24] GHOTBI-RAVANDI A A, SHAHBAZI M, SHARIATI M, *et al.* Effects of mild and severe drought stress on photosynthetic efficiency in tolerant and susceptible barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes [J]. J Agron Crop Sci, 2015, 200(6): 403-415.
- [25] 祁鲁玉, 吴峰, 吴瑞雪, 等. 遮阴和不同形态氮素施肥对红松幼苗生长的影响 [J]. 森林工程, 2019, 35(4): 1-5.
- [26] 李学孚, 倪智敏, 吴月燕, 等. 盐胁迫对‘鄞红’葡萄光合特性及叶片细胞结构的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4436-4444.
- [27] 赵佳伟, 王萌, 李清亚, 等. NaCl 胁迫对不同品种北美豆梨光合参数的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 36-41.
- [28] 袁斌玲, 王瑞敏, 陈颖, 等. NaCl 处理下茉莉酸甲酯对金叶银杏光合色素、抗氧化性及黄酮代谢的调控作用 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 64-71.
- YUAN B L, WANG R M, CHEN Y, *et al.* The regulation of methyl jasmonate on photosynthetic pigments, antioxidation and flavonoid metabolism in golden-leaf *Ginkgo biloba* seedlings under salinity treatment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 64-71. (in Chinese)
- [29] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2005, 60(3): 324-349.
- [30] 徐子棋, 张瑜, 杨献坤. 吉林省西部菊芋品质及耐盐碱性优选研究 [J]. 森林工程, 2019, 35(6): 6-15.
- [31] 窦俊辉, 喻树迅, 范术丽, 等. SOD 与植物胁迫抗性 [J]. 分子植物育种, 2010, 8(2): 359-364.
- [32] QIN Y, DRUZHININA I S, PAN X Y, *et al.* Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline Agri-culture [J]. Biotechnology advances, 2016, 34(7): 1245-1259.
- [33] MYOUGA F, HOSODA C, UMEZAWA T, *et al.* A hetero-complex of iron superoxide dismutases defends chloroplast nucleoids against oxidative stress and is essential for chloroplast development in “*Arabidopsis*” [J]. 2008, 20(11): 3148-3162.
- [34] 李宏博, 吕德国, 姜水莺, 等. NaCl 胁迫对珊瑚菜叶绿素荧光动力学参数等生理特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 239-243.
- [35] 岳健敏, 任琼, 张金池. 植物盐耐机理研究进展 [J]. 林业科技开发, 2015, 29(5): 9-13.
- [36] 史军辉, 王新英, 刘茂秀, 等. NaCl 胁迫对胡杨幼苗叶主要渗透调节物质的影响 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 6-11.
- SHI J H, WANG X Y, LIU M X, *et al.* Effects of NaCl stress on main osmotic adjustment substances in the seedling leaves of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 6-11. (in Chinese)
- [37] 周莹, 赵永娟, 黄丽瑾, 等. 荆芥幼苗对盐胁迫的生理响应 [J]. 核农学报, 2019, 33(1): 166-175.