

外源 ABA 对楸树幼苗 NaCl 胁迫的缓解效应 及其生长生理响应特征

张 钰, 陈 慧, 王改萍*

(南京林业大学 林学院, 南京 210037)

摘 要:以 2 年生楸树(苏楸 1 号和 008-1)扦插苗为材料,采用盆栽试验法,分析盐胁迫(0.5% NaCl)处理下楸树幼苗生长、生理的变化,并分析不同浓度外源 ABA(15、25、35 mg/L)对盐胁迫(30 d)楸树幼苗的缓解效应及其生理生化特性,以探索重度盐胁迫下适合楸树幼苗生长的适宜外源 ABA 浓度,为增强盐碱地楸树的耐盐性、提高盐碱地的利用提供理论依据。结果显示:(1)0.5% NaCl 胁迫下,两品种楸树幼苗叶片表现出不同程度的盐害症状,且‘苏楸 1 号’叶片盐害症状较‘008-1’严重;随胁迫时间延长,两品种楸树幼苗的相对电导率(REC)均呈先上升后下降的变化趋势,叶绿素(Chl)、相对含水量(RWC)均呈降低趋势,可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、脯氨酸(Pro)以及超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈先上升后下降趋势,但‘008-1’的 REC 显著低于‘苏楸 1 号’,Chl、RWC、SS、SP、Pro、SOD 均显著高于苏楸 1 号,表明‘008-1’的耐盐性较‘苏楸 1 号’更强。(2)喷施外源 ABA 使得盐胁迫下‘008-1’楸树的苗高显著增加、新叶提前萌发,表明外源 ABA 在一定程度上能够缓解盐胁迫对楸树生长的影响;喷施外源 ABA 降低了盐胁迫下‘008-1’楸树幼苗叶片的 REC,提高了 Chl、RWC、SS、SP、Pro、SOD、过氧化物酶(POD)以及过氧化氢酶(CAT)活性,促进了内源激素生长素(IAA)、脱落酸(ABA)、赤霉素(GA₃)以及玉米素核苷(ZR)的积累。研究表明,楸树品种‘008-1’的耐盐性更强;外源喷施适宜浓度 ABA 能够缓解盐胁迫对楸树幼苗生长的影响,降低幼苗叶片细胞膜透性,促进幼苗渗透调节物质的积累,增强渗透调节能力,并提高盐胁迫下幼苗的抗氧化酶活性,促进植物对内源激素含量的调节,从而提高楸树的耐盐性,且以 25 mg/L ABA 处理的效果最好。

关键词:楸树;盐胁迫;外源脱落酸

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

Alleviating Effects of Exogenous ABA on *Catalpa bungei* Seedlings under NaCl Stress and Growth Physiological Response Characteristics

ZHANG Yu, CHEN Hui, WANG Gaiping*

(College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In this experiment, we took the cuttings of two-year-old *C. bungei* tree (*C. bungei* No. 1 and 008-1) as materials, and used pot experiment to analyze the growth and physiological changes of *C. bungei* tree seedlings under salt stress (0.5% NaCl). The alleviating effects of different concentrations of ABA (15, 25, 35 mg/L) on salt-stressed (30 d) *C. bungei* seedlings and their physiological and biochemical characteristics were analyzed, so as to explore the appropriate concentration of ABA for the growth of *C. bungei* seedlings under severe salt stress, and to provide theoretical basis for enhancing the salt-alkali tolerance of *C. bungei* and improving the utilization of saline-alkali land. The results showed as follows: (1) Under 0.5% NaCl stress, the seedling leaves of the two cultivars showed different degrees of salt damage

收稿日期: 2022-08-16; 修改稿收到日期: 2023-05-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD06000604)

作者简介: 张 钰(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育方面的研究。E-mail: 614204585@qq.com

* 通信作者: 王改萍, 副教授, 硕士生导师, 主要从事经济林定向栽培研究。E-mail: 905181635@qq.com

symptoms, and the salt damage symptoms of the leaves of ‘*C. bungei* No. 1’ were more serious than ‘008-1’. As the stress time increased, the relative electrical conductivity (REC) of the seedlings of the two cultivars increased first and then decreased, chlorophyll (Chl) and relative water content (RWC) decreased, and the activities of soluble sugar (SS), soluble protein (SP), proline (Pro) and superoxide dismutase (SOD) increased first and then decreased. However, the REC of ‘008-1’ was significantly lower than that of ‘*C. bungei* No. 1’, and the Chl, RWC, SS, SP, Pro and SOD of ‘008-1’ were significantly higher than that of ‘*C. bungei* No. 1’, indicating that ‘008-1’ had stronger salt tolerance than ‘*C. bungei* No. 1’. (2) The seedling height of *C. bungei* ‘008-1’ was significantly increased and the new leaves germinated in advance under salt stress, which indicated that exogenous ABA could alleviate the effects of salt stress on the growth of *C. bungei* to a certain extent. ABA treatment decreased the REC of *C. bungei* ‘008-1’ seedlings under salt stress, and increased contents the of Chl, RWC and activities SS, SP, Pro, SOD, peroxidase (POD) and catalase (CAT). It promoted the accumulation of endogenous hormone auxin (IAA), abscisic acid (ABA), gibberellin (GA_3) and zeatin nucleoside (ZR). The results showed that the salt-tolerance of ‘008-1’ was stronger. Exogenous ABA spraying with appropriate concentration could alleviate the effects of salt stress on the growth of *C. bungei* seedlings, reduce the permeability of cell membrane in seedling leaves, promote the accumulation of osmotic regulatory substances in seedlings, enhance osmotic regulation ability, and improve the antioxidant enzyme activities, and promote the regulation of endogenous hormone contents in plants of seedlings under salt stress, thus improve the salt-tolerance of *C. bungei* seedlings. 25 mg/L ABA treatment had the best effect.

Key words: *Catalpa bungei*; salt stress; exogenous abscisic acid

目前,很多国家的土地正在遭受盐碱化的迫害,中国的盐渍土总面积可达 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占可用耕地的 4.88%,且有 $9.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的耕地正面临着盐渍化的影响^[1]。还有因长期的低标准田间灌溉导致泥质滨海区域几乎整体次生盐渍化,地力日趋衰退^[2]。重重压力下,如何开发利用盐碱地已成为世界性的问题。而栽种、培育能够耐受盐碱的植物不仅能改良土壤,减缓盐渍化,还能实现对盐碱地的利用^[1]。因此,寻求适宜方法提高植物耐盐性是关键,而利用外源物质缓解盐害、提高植物的耐盐性是近些年的热点研究。

盐胁迫指生长在高盐环境中的植物受到高渗透势的影响,从而引发离子毒害和渗透胁迫,在生理、细胞和分子水平上受到损害^[3]。盐胁迫下由于叶绿素的分解和合成受到阻碍,植物的光合作用减弱,从而对光合性能产生一定影响^[4]。细胞质膜是植物体内和外部的重要通道,盐胁迫会使植物细胞失去水分发生质壁分离,从而对细胞膜的选择透性造成不良影响^[5]。盐胁迫还会使植物释放大量对植物体造成氧化性损伤的活性氧^[6],若不能及时清除,会对植物造成不可逆的损伤。对此,植物已进化出一系列生理生化保护机制来适应盐胁迫,如通过渗透调节物质的合成、抗氧化酶活性的提高等一系列响应机制^[7]。

ABA 作为植物的生长抑制剂,在植物的生长发育中具有多重功能,如抑制种子萌发,促进植物叶片

和果实的衰老脱落,抑制植物的生长,促进植株休眠等^[8]。ABA 作为公认的逆境激素或胁迫激素,在诱导提高植物抗逆性方面起着积极的调控作用,其作为一种信号物质,能够诱导植物体内抗逆基因的表达,促进植物体内渗透调节物质的积累,缓解盐浓度过高造成的渗透胁迫和离子胁迫,维持细胞水分平衡,维持细胞膜结构的稳定性,提高保护性酶的活性,从而减轻盐害^[9]。

楸树(*Catalpa bungei*),为紫葳科梓树属,高大落叶乔木,原产于中国,至今已有 2 000 多年栽培历史,在中国分布范围广泛,遍及暖温带及亚热带,尤以山东、江苏、河南、湖北等省分布较多^[10]。楸树材质优良,是中国特有的珍贵用材林树种^[11]。由于楸树质地坚韧致密,在生产工艺上具有优良特性,被国家列为重要材种。经前人研究发现楸树有一定的耐盐性^[11-12],目前关于外源脱落酸和盐胁迫共同影响楸树幼苗生长的研究鲜有报道。本试验通过研究在盐胁迫条件下,不同浓度外源脱落酸对楸树幼苗生长生理特性的影响,探索重度盐胁迫下适合楸树幼苗生长的适宜外源脱落酸浓度,为楸树在盐碱地的栽培提供合理方案,为充分利用盐碱地提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试楸树(*Catalpa bungei*)材料为‘008-1’和

‘苏楸 1 号’品种,经前人研究成果发现对低浓度盐胁迫具有较好的适应性,2 年生扦插苗,来源于南京林业大学白马教学科研基地;ABA 来自合肥巴斯夫生物科技有限公司。

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,以 2 年生楸树扦插幼苗为研究对象,设置 1 个盐浓度(0.5% NaCl)和 3 个 ABA 喷施浓度(15,25,35 mg/L)。单纯盐胁迫期间,分 4 个处理,分别为苏楸 1 号空白对照组 S0(只进行清水处理);苏楸 1 号盐胁迫组 S1(0.5% NaCl 处理);008-1 空白对照组 Y0(只进行清水处理);008-1 盐胁迫组 Y1(0.5% NaCl 处理)。外源 ABA 缓解期间分 5 个处理,分别为空白对照组 CK1(只进行清水处理);盐胁迫对照组 CK2(0.5% NaCl 处理);ABA 喷施组 A1(0.5% NaCl+15 mg/L ABA),ABA 喷施组 A2(0.5% NaCl+25 mg/L ABA),ABA 喷施组 A3(0.5% NaCl+35 mg/L ABA)。

试验安排时间为 2021 年 7—9 月。7 月上旬配制一定浓度的 NaCl 溶液,对长势一致、无病虫害、无损伤、生命力强的健康植株进行浇灌。每次浇盐水 500 mL,分 4 次浇完,使土壤含盐量达到 0.5%。盐害反应到一定程度即盐胁迫处理 45 d 后喷施外源激素 ABA,外源物质喷施状态为液珠挂满叶面,6 d 内喷 3 次(早晚喷施)。试验共计 90 d。每处理设 3 个生物学重复,每个重复 9 株。

1.3 测试指标及方法

1.3.1 生长指标 苗高地径测定:使用卷尺和游标卡尺于试验始末测量盆栽楸树幼苗的苗高和地径。苗高增量和地径增量均为 7 月到 10 月的差值。

盐害指数测定:盐害指数 = $\sum(\text{盐害级值} \times \text{对应盐害级株数}) / (\text{总株数} \times \text{盐害最高级值}) \times 100$ 。

叶片形态观察:在盐处理后的各个时期拍照记录楸树幼苗叶片状态和叶色变化。

1.3.2 生理指标 叶片相对含水量(RWC)采用称重法进行测定;相对电导率(REC)采用电导率仪法进行测定;光合色素叶绿素(Chl)采用乙醇浸提法进行测定;游离脯氨酸(Pro)采用酸性茚三酮比色法测定;可溶性蛋白(SP)采用考马斯亮蓝 G-520 染色法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢分解法测定;可溶性糖(SS)采用蒽酮比色法测定^[6]。单盐处理采样时间分别为盐胁迫后的 7 d、14 d、21 d、28 d,ABA 喷施处理采样时间为新叶萌发 30 d 后,每次采

取植株顶端新鲜叶片 15~20 片。

1.3.3 内源激素含量测定 楸树叶片 ABA、ZR、IAA、GA₃ 含量由中国农业大学作物化学控制研究中心采用酶联免疫吸附法(ELISA)测定。每个处理 3 次重复,结果取平均值。于 2021 年 9 月 19 日采样,每份 0.5 g,用锡纸包裹置于液氮速冻,30 min 后放置-80 ℃冰箱保存待送样。

1.4 数据处理

使用 SPSS 软件进行 one-way ANOVA 统计分析,采用 Duncan 方法进行多重比较及差异显著性检验,采用 Excel 软件进行整理数据与绘图,采用 Photoshop 软件进行图片整合。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对楸树幼苗生长及生理特性的影响

2.1.1 NaCl 胁迫下楸树幼苗的盐害指数和叶片形态观察 盐胁迫期间,植物的形态变化是其受到胁迫的最直观指标,能直接表现出盐害程度。随着胁迫时间延长,苏楸 1 号和 008-1 在表型上分别表现出不同变化,主要表现为失水、萎蔫、失绿、卷曲、干枯、落叶等症状。在胁迫 28 d 时,苏楸 1 号有大部分枝枯、叶落、死亡现象,008-1 大部分叶片有叶尖、叶缘焦枯、落叶和部分死亡现象。由图 1 可知,在盐胁迫期间,两品种楸树叶片逐渐呈现盐害反应,其中 008-1 盐害症状轻于苏楸 1 号,表 1 盐害指数也反映了各个时期的盐害程度。

2.1.2 NaCl 胁迫对楸树幼苗叶片相对含水量、叶绿素含量、相对电导率的影响

如表 2 所示,在胁迫 14、21、28 d 时,两品种楸树幼苗的相对电导率相较于各自对照组均显著上升,苏楸 1 号分别增加 6.37%、18.54%、17.83%,008-1 分别增加 7.96%、17.39%、13.77%;苏楸 1 号盐胁迫组的叶片相对含水量与对照组 S0 相比显著下降,分别降低 3.03%、12.43%、19.49%,008-1 盐胁迫组与对照组 Y0 相比变化不明显。随着胁迫时间的延长,苏楸 1 号和 008-1 盐胁迫组的相对电导率均呈现先升后降趋势,均在 21 d 达到峰值;两胁迫组的叶片含水量均呈现降低趋势,其中苏楸 1 号胁迫组的下降幅度大于 008-1 胁迫组。在胁迫 21、28 d 时,苏楸 1 号、008-1 盐胁迫组的叶绿素含量比对照组 S0、Y0 均显著降低,其中苏楸 1 号胁迫组分别降低了 26.03%、31.65%,008-1 胁迫组分别降低了 19.28%、29.19%,随着胁迫时间的延长,苏楸 1 号和 008-1 盐胁迫组的叶绿素含量均呈现降低趋势,但每个阶段 008-1 胁迫组的叶绿素含量均高于苏楸 1 号胁迫组。

表 1 楸树幼苗盐胁迫盐害指数

Table 1 Salt stress and hazard index of *C. bungei* seedlings

NaCl 处理 NaCl treatment/%	处理时间 Processing time/d			
	7	14	21	28
S0	0	0	0	8.3
S1	25.0	47.2	61.1	91.7
Y0	0	0	0	0
Y1	16.7	25.0	47.2	83.3

注:S. 苏楸 1 号;Y. 008-1;0. 空白对照;1. 盐胁迫。下同。
Note:S. *C. bungei* No. 1; Y. 008-1; 0. Control; 1. Salt stress. The same as below.

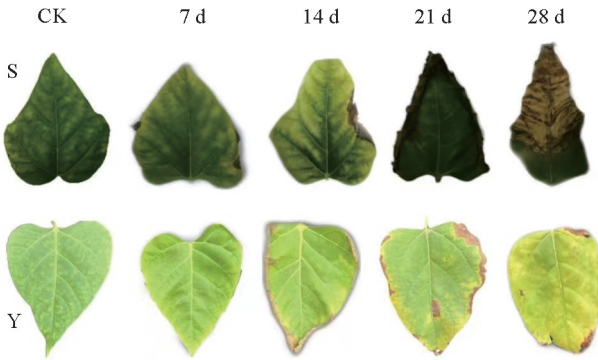


图 1 盐胁迫对楸树幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of salt stress on growth *C. bungei* seedlings

表 2 NaCl 处理对楸树幼苗叶片相对含水量、叶绿素含量、相对电导率的影响

Table 2 Effects of NaCl on relative water content, relative conductivity, and chlorophyll content of leaves of *C. bungei* seedlings

指标 Index	处理 Treatment	处理时间 Processing time/d			
		7	14	21	28
相对含水量 Relative water content/%	S0	69.50±0.55bA	67.43±1.51abB	70.50±0.58aA	69.72±2.47aA
	S1	67.59±0.23cA	65.39±0.34bAB	61.74±2.65bB	56.13±3.54cC
	Y0	70.03±0.57bA	69.53±0.56aA	66.62±2.10aB	66.31±0.63abB
	Y1	71.15±0.53aA	68.10±1.74aB	66.66±2.37aBC	64.97±0.91bC
叶绿素含量 Chlorophyll content /(mg/g)	S0	1.44±0.03bB	1.58±0.07bA	1.46±0.05bB	1.58±0.04aA
	S1	1.43±0.03bA	1.42±0.08bA	1.08±0.01cB	1.08±0.07bB
	Y0	1.45±0.00bC	1.79±0.04aA	1.66±0.14aAB	1.61±0.05aB
	Y1	1.51±0.02aA	1.56±0.12bA	1.34±0.08bB	1.14±0.01bC
相对电导率 Relative conductivity/%	S0	76.36±0.51bC	78.93±0.60bB	81.62±1.64bA	79.34±0.34cB
	S1	77.48±0.62abD	83.96±0.35aC	96.75±0.28aA	93.49±1.02aB
	Y0	77.88±0.78aC	78.16±0.31bC	81.12±0.53bA	79.73±1.05cB
	Y1	78.74±0.91aD	84.38±0.81aC	95.23±1.01aA	90.71±0.60bB

注:同列不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示同一处理不同时间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different normal letters in the same stage indicate significant difference at 0.05 level among ABA treatments, while different capital letters in the same concentration indicate significant difference at 0.05 level among treatment time points ($P<0.05$). The same as below.

2.1.3 NaCl 处理对楸树幼苗渗透调节物质的影响

如图 2 所示,在盐胁迫 7、14、21 d 时,苏楸 1 号的可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于对照组,可溶性糖含量分别增加 24.57%、62.32%、59.12%,可溶性蛋白含量分别增加 22.72%、25.52%、81.93%,苏楸 1 号和 008-1 胁迫组的游离脯氨酸含量均显著高于对照组,苏楸 1 号胁迫组分别增加 22.37%、29.81%、48.28%,008-1 胁迫组分别增加 16.91%、21.22%、21.37%。

在胁迫 28 d 时,苏楸 1 号的可溶性糖含量与对照组相比显著降低了 25.18%,可溶性蛋白含量与对照组相比显著降低了 49.29%。

整个胁迫期间 008-1 胁迫组的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均显著高于对照,其中可溶性糖含量分别增加 16.09%、66.59%、82.86%、18.59%,可溶性蛋白含量分别增加 43.05%、57.62%、76.86%、39.05%。

随胁迫时间延长,苏楸 1 号胁迫组和 008-1 胁

迫组的可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量均呈现先上升后降低趋势,整个阶段 008-1 胁迫组的可溶性糖、可溶性蛋白含量均显著高于苏楸 1 号胁迫组。

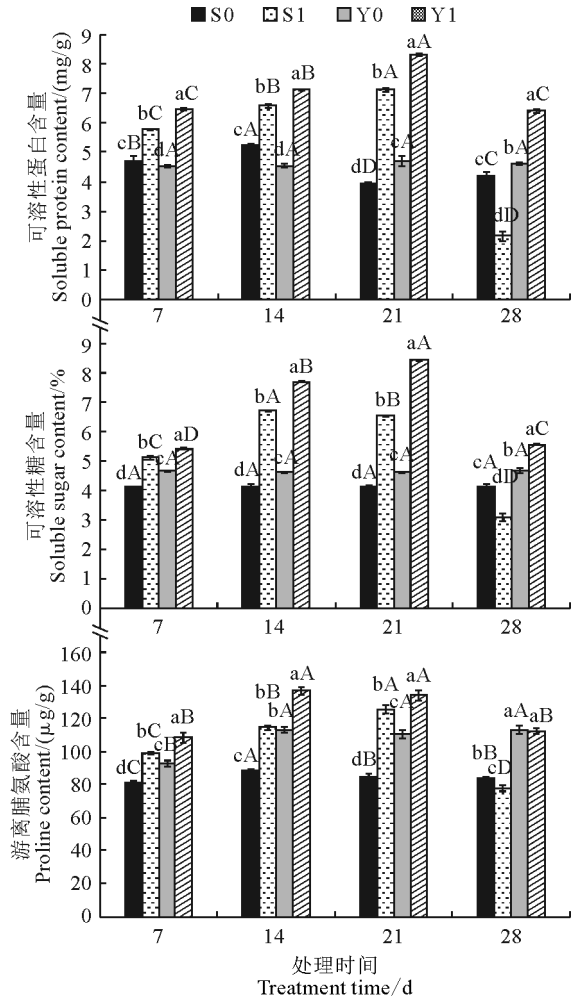


图2 NaCl 处理对楸树幼苗渗透调节物质的影响
Fig. 2 Effects of NaCl on osmotic adjustment substances of *C. bungei* seedlings

2.1.4 NaCl 胁迫对楸树幼苗保护酶活性的影响

如图 3 所示,盐胁迫 7、14、21 d 时,苏楸 1 号胁迫组的 SOD 活性显著高于对照组 S0,分别增加 2.07%、11.68%、17.96%,胁迫 28 d 时,苏楸 1 号胁迫组的 SOD 活性与对照组相比显著降低 26.61%。

整个胁迫期间 008-1 胁迫组的 SOD 活性均显著高于对照,分别增加 2.88%、15.67%、25.33%、1.62%。

随着胁迫时间的延长,两胁迫组的 SOD 活性均呈现先上升后下降趋势,并且均在 21 d 达到峰值。整个胁迫期间,008-1 胁迫组的 SOD 活性均显著高于苏楸 1 号胁迫组。

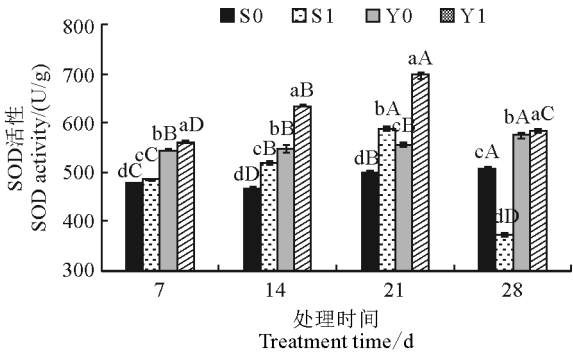


图3 NaCl 处理对楸树幼苗 SOD 活性的影响
Fig. 3 Effects of NaCl on SOD activity of *C. bungei* seedlings

2.2 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗的缓解作用

2.2.1 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗叶片表型及生长的影响 如表 3 所示,在 0.5% NaCl 处理下,楸树幼苗叶片的苗高增量和地径增量与 CK1 对照组显著差异,施加 35 mg/L 外源 ABA 时苗高增量与 CK2 组差异不显著,而施加 15 和 25 mg/L 的外源 ABA 处理组与 CK2 对照组的苗高增量差异显著,楸树幼苗的地径增量在施加 15 mg/L、25 mg/L、35 mg/L 浓度的外源 ABA 时与 CK2 组均无明显差异。随着盐胁迫时间的延长,各处理组表现出盐害反应,老叶逐渐掉落,并开始生长新叶,激素处理组最先冒新叶,盐胁迫对照组 14 d 之后方冒新叶,最终成活率除对照组 CK1 之外 A2 处理组最高。

表 3 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗苗高、地径、新叶萌发日期和成活率的影响

ABA 处理 ABA treatment (mg/L)	苗高增量 Seedling height increment/cm	地径增量 Ground diameter increment/mm	新叶萌发日期 (月-日) Germination date of new leaves	成活率 Survive rate/%
CK1	26.90±1.61a	1.43±0.22a	—	100.00
CK2	11.23±0.60d	0.91±0.42b	9-05	75.00
A1	13.97±0.72c	0.64±0.43b	8-22	86.67
A2	16.33±0.57b	0.97±0.38b	8-22	93.33
A3	12.67±0.32cd	0.51±0.16b	8-25	73.33

注:CK1. 空白对照;CK2. 盐胁迫对照;A1. 15 mg/L ABA; A2. 25 mg/L ABA; A3. 35 mg/L ABA; 同列数值不同字母表示差异达 5% 差异水平。下同。
Note:CK1. Blank control;CK2. Salt stress control; A1. 15 mg/L ABA; A2. 25 mg/L ABA; A3. 35 mg/L ABA; Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level. The same as below.

2.2.2 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗叶片相对含水量、相对电导率、叶绿素含量的影响 如表 4 所示,0.5% NaCl 胁迫下,楸树幼苗叶片含水量比 CK1 组显著升高,升幅为 30.57%,施加浓度为 25

mg/L、35 mg/L 的外源 ABA 时叶片含水量比 CK1 组有所上升,但差异不显著。楸树幼苗叶片的相对电导率在 0.5% NaCl 胁迫下比 CK1 显著增加 12.98%,施用外源 ABA 后各处理组相对电导率比 CK2 组均显著下降,其中浓度 25 mg/L 时下降幅度最大,降幅为 9.14%。与对照组 CK1 相比,CK2 的叶绿素含量有所上升,但差异不显著,施加外源 ABA 后各处理组的叶绿素含量均比 CK2 组有所增加但差异不显著。

表 4 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗叶片相对含水量、相对电导率、叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of exogenous ABA on relative water content, relative conductivity and chlorophyll content in leaves of <i>C. bungei</i> seedlings under salt stress			
ABA 处理 ABA treatment (/mg/L)	相对含水量 Relative water content/%	相对电导率 Relative conductivity/%	叶绿素含量 Chlorophyll content (/mg/g)
CK1	63.40±0.26c	80.88±0.23d	1.11±0.18b
CK2	82.78±1.02ab	91.38±0.67a	1.48±0.15ab
A1	80.56±2.99b	84.28±1.55c	1.56±0.15a
A2	85.35±1.88a	83.03±2.58cd	1.89±0.26a
A3	82.84±3.04ab	88.83±0.45b	1.61±0.33a

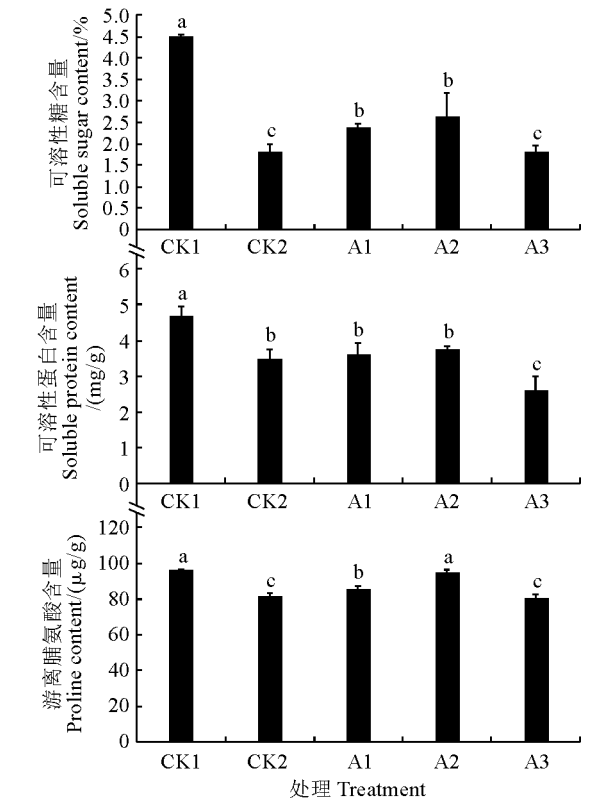


图 4 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗渗透调节物质的影响
Fig. 4 Effects of exogenous ABA on osmotic adjustment substances of *C. bungei* seedlings under salt stress

2.2.3 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗渗透调节物质的影响 如图 4 所示,0.5% NaCl 胁迫下,楸树幼苗可溶性糖含量显著降低,而施加 15 mg/L 和 25 mg/L 的外源 ABA 处理组可溶性糖含量比 CK2 分别显著增加 32.96%和 46.93%,当外源 ABA 浓度为 35 mg/L 时与 CK2 无显著差异。与对照组 CK1 相比,CK2 的可溶性蛋白含量显著下降,在施加外源 ABA 浓度为 15 mg/L 和 25 mg/L 时可溶性蛋白含量比 CK2 有所上升,但不显著,其中浓度为 35 mg/L 时下降幅度较大,比 CK2 下降了 24.86%。

楸树幼苗的脯氨酸含量在 0.5% NaCl 胁迫下显著下降,而施加外源 ABA 浓度为 15 mg/L、25 mg/L 的处理组脯氨酸含量比 CK2 分别显著增加 4.19%、16.07%,当外源 ABA 浓度为 35 mg/L 时与 CK2 无显著差异。

2.2.4 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗保护酶活性的影响 如图 5 所示,CK1 对照组的 SOD 活性最高,0.5% NaCl 胁迫下的 SOD 活性显著下降,降幅为 7.50%,加入外源 ABA 后,在浓度为 15 mg/L、25 mg/L 处理组中盆栽楸树幼苗叶片 SOD 活性均有上升,15 mg/L 处理组的上升不显著,25 mg/L 处理组的上升显著,而浓度为 35 mg/L 处理与 CK2 无显著差异。

与对照组 CK1 相比,0.5% NaCl 胁迫下的 POD 和 CAT 活性显著下降,降幅分别为 57.84%、46.87%,加入外源 ABA 后,在浓度为 15 mg/L、25 mg/L 处理组中盆栽楸树幼苗叶片 POD、CAT 活性均显著上升,而浓度为 35 mg/L 处理组与 CK2 无显著差异。

2.2.5 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗叶片内源激素含量的影响 逆境环境下,植物可通过调节内源激素含量来改变植物生长。由表 5 可得知,0.5% NaCl 胁迫下,楸树幼苗叶片的各内源激素含量较 CK1 组显著降低,施加外源 ABA 浓度为 15 mg/L 时,IAA、GA₃、ABA 含量分别显著提升 31.73%、94.55%、69.34%,ZR 含量无显著变化;施加外源 ABA 浓度为 25mg/L 时,IAA、GA₃、ZR、ABA 含量分别显著提升 54.91%、121.36%、72.70%、66.34%;施加外源 ABA 浓度为 35mg/L 时,IAA 含量显著降低 25.13%,GA₃、ZR 含量无显著变化,ABA 含量显著上升 9.85%。说明盐胁迫条件下,喷施外源 ABA 能够提高楸树植株叶片的内源激素含量,其中浓度为 25 mg/L 效果最佳,超过 25 mg/L 时效果不明显甚至降低 IAA 含量。

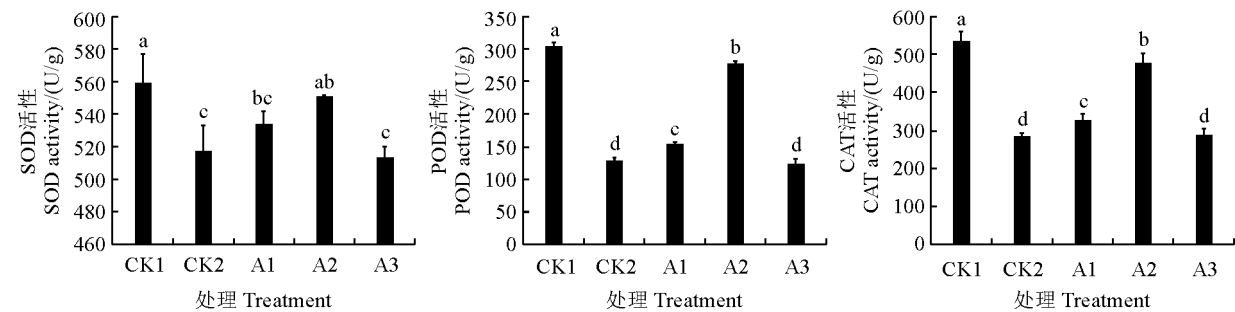


图 5 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 5 Effects of exogenous ABA on antioxidant enzyme activities of *C. bungei* seedlings under salt stress

表 5 外源 ABA 对盐胁迫下楸树幼苗叶片内源激素含量的影响

Table 5 Effects of exogenous ABA on endogenous hormone contents of *C. bungei* seedlings under salt stress

ABA 处理 ABA treatment/(mg/L)	IAA 含量 IAA content/(ng/g)	GA ₃ 含量 GA ₃ content/(ng/g)	ZR 含量 ZR content/(ng/g)	ABA 含量 ABA content/(ng/g)
CK1	46.05±3.89a	6.38±0.31a	4.14±0.19b	129.76±2.39b
CK2	25.15±0.67d	2.20±0.10d	3.04±0.13c	93.99±3.94d
A1	33.13±0.57c	4.28±0.21c	3.19±0.18c	159.16±3.94a
A2	38.96±1.46b	4.87±0.30b	5.25±0.30a	156.34±3.53a
A3	18.83±0.86e	1.98±0.08d	2.96±0.03c	103.25±4.46c

3 讨 论

盐胁迫对植株的影响主要表现在对叶片性状、生理代谢的抑制作用^[13-14]。已有研究表明,盐胁迫下,植物的生长会受到抑制,如银边吊兰(*Chlorophytum comosum* var. *variegatum*)的叶面积、叶生物量下降^[15],高羊茅(*Festuca arundinacea*)株高的下降^[16]。顾恒等^[17]研究发现在盐胁迫下金桂(*Osmanthus fragrans* var. *thunbergii*)出现叶片枯黄、脱落甚至植株死亡的现象。本研究中,在 0.5% NaCl 胁迫下,两品种楸树幼苗随着胁迫时间的延长在表型上表现出不同程度的盐害反应,其中 008-1 品种的盐害症状轻于苏楸 1 号,尤其胁迫 28 d 时,苏楸 1 号有大部分枝枯、叶落、死亡现象,008-1 大部分叶片有叶尖、叶缘焦枯、落叶和部分死亡现象,表明 008-1 品种比苏楸 1 号较耐盐。

叶片相对含水量和相对电导率是反映胁迫条件下植物受害程度的重要指标,叶片相对含水量反映叶片水分状况,而相对电导率反映叶片细胞膜稳定性水平,盐胁迫条件下,植物叶片相对含水量会降低,而相对电导率会提高^[18-19]。本研究中苏楸 1 号的叶片相对含水量显著降低,随着胁迫时间的延长下降幅度远大于 008-1,表明苏楸 1 号比 008-1 失水严重,生境中的大量盐离子对其造成生理干旱^[20]。两品种楸树幼苗相对电导率逐渐增加,同时,植物体

内的超氧化物歧化酶活性被激活,从而加大对细胞内自由基的清除作用,提高其自身清除活性氧的能力,减轻膜脂过氧化的程度,其中,超氧化物歧化酶活性逐渐上升,在 21 d 后开始下降,可能是盐胁迫导致植物体内产生大量的活性氧,细胞内超氧化物歧化酶等保护酶系统也受到破坏,导致活性降低,膜系统的伤害指数随之增加^[21-22]。

植物体内叶绿素含量的高低是衡量其光合能力和生长状况的重要指标之一,叶绿素含量下降就会导致光合能力下降,从而影响植物的生长,因此,植物受到盐胁迫后,体内叶绿素含量可以反映植物耐盐的敏感性^[23-24]。本研究中,随着胁迫时间的延长,两品种楸树叶绿素含量均呈现降低趋势,这与鲁少尉等研究发现^[25]一致。苏楸 1 号的叶绿素含量全程低于 008-1,表明盐胁迫对苏楸 1 号叶绿素积累的抑制作用更大。

植物的渗透调节物质在盐胁迫的适应中起着重要作用,其中可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸等一些代谢产物均发挥了重要作用。植物通过积累这些渗透保护物质来响应渗透胁迫,这些物质存在于细胞质中,在渗透胁迫下可以维持细胞膨胀^[26]。林双冀等^[27]研究表明芙蓉菊(*Crossostephium chinense*)的脯氨酸含量随盐胁迫时间延长增加,在胁迫 15 d 后下降。李娜娜等^[28]研究表明蒜薹(*Thlaspi arvense*)的可溶性蛋白含量随盐胁迫时间的延长呈现

先增加后降低的趋势。丁燕等^[29]研究表明随盐胁迫时间的延长菠萝蜜(*Artocarpus heterophyllus*)叶片可溶性糖含量呈现先增后降趋势。本研究中两品种楸树幼苗在盐胁迫条件下 3 种渗透调节物质均随着时间的延长呈先上升后降低趋势,其中苏楸 1 号的 3 种渗透调节物质含量均显著低于 008-1,可能是盐胁迫前期植物积极调动体内渗透调节物质对抗盐害,随胁迫时间延长,渗透调节物质积累能力减弱,这与童辉等^[30]在黄瓜(*Cucumis sativus*)上的研究结果一致。008-1 品种的渗透调节物质积累能力优于苏楸 1 号,反映了前者比后者对盐胁迫的耐受能力更强。

脱落酸作为公认的逆境激素或胁迫激素,在诱导提高植物抗逆性方面起着积极的调控作用^[31]。李振华等^[32]研究结果发现喷施外源 ABA 能使盐胁迫下高羊茅的叶长有所增加。本研究中,盐胁迫下楸树幼苗叶片逐渐损害,喷施外源 ABA 后,苗高增量有所提高,地径增量无明显变化,新叶萌发时间提前,表明外源 ABA 一定程度上缓解了盐胁迫对楸树幼苗生长的抑制,增强了楸树幼苗对盐胁迫的耐受能力。肖强等^[33]研究发现对盐胁迫下甘薯(*Dioscorea esculenta*)幼苗喷施 70 $\mu\text{mol/L}$ ABA 可以显著降低相对电导率。本研究中,盐胁迫下楸树幼苗相对电导率显著升高,喷施外源 ABA 后均显著降低,其中浓度 15 mg/L、25 mg/L 处理降低幅度最大,表明施加外源 ABA 在一定程度能够缓解盐胁迫通过降低楸树幼苗叶片细胞膜透性使电解质渗透率提高而带来的伤害。关于渗透调节物质,盐胁迫下可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量

均显著下降,喷施外源 ABA 后,各渗透调节物质含量有所上升,表明外源 ABA 能够促进楸树幼苗渗透调节物质的积累,增强楸树幼苗的渗透调节能力,从而使楸树幼苗能够适应盐胁迫环境,其中 25 mg/L 处理调节效果最好,这与朱菲菲等^[34]研究结果一致。SOD、POD 和 CAT 是生物膜保护酶系统的重要成员,它们协同作用,防御活性氧或其他过氧自由基对膜系统的伤害,抑制膜脂过氧化减轻盐胁迫等对细胞的伤害^[35-37]。本研究发现外施 ABA 可以提高盐胁迫下楸树幼苗的 SOD、POD 和 CAT 活性,其中 25 mg/L ABA 处理的效果最好。植物内源激素在调节植物对生物及非生物胁迫响应中具有重要作用,逆境环境下,植物可通过调节内源激素含量来改变植物的生长,主要包括脱落酸(ABA)、玉米素核苷(ZR)、生长素(IAA)、赤霉素(GA_3)等^[38-39]。本研究中,喷施外源 ABA 能够提高楸树植株叶片的内源激素含量,其中浓度为 25 mg/L 效果最佳,超过 25 mg/L 时效果不明显甚至降低 IAA 含量。

4 结 论

综上所述,0.5% NaCl 胁迫对苏楸 1 号和 008-1 品种的盆栽楸树幼苗植株生长具有一定的抑制作用,其中苏楸 1 号盐害反应严重,008-1 盐害反应较轻;添加外源 ABA 可在一定程度上缓解盐胁迫,提高盆栽楸树幼苗植株耐盐性;其中,本次试验所拟定的 3 个外源 ABA 浓度,25 mg/L 效果最佳,但 ABA 浓度超过 35 mg/L 时可能对楸树幼苗产生新的胁迫,不利于楸树幼苗生长。

参考文献:

[1] 齐 琪,马书荣,徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, **18**(8): 2 741-2 746.

QI Q, MA S R, XU W D. Research progress on the effects of salt stress on plant growth and the physiological mechanism of salt tolerance[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, **18**(8): 2 741-2 746.

[2] 孟康敏,杨秀清,潘文利,等. 辽宁滨海盐碱地土壤改良及造林技术研究[J]. 林业科学, 1997, **33**(1): 25-33.

MENG K M, YANG X Q, PAN W L, *et al.* Afforestation technique Anda melioration of Liaoning coastal saline—Alkaline soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, **33**(1): 25-33.

[3] 章建红,洪春桃,沈登锋,等. 盐胁迫对薄壳山核桃幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2022(18): 23-28.

ZHANG J H, HONG C T, SHEN D F, *et al.* Effects of salt stress on antioxidant enzyme activity of pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2022(18): 23-28.

[4] 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.

[5] RAPACZ M. Chlorophyll *a* fluorescence transient during freezing and recovery in winter wheat[J]. *Photosynthetica*, 2007, **45**(3): 409-418.

[6] 孟繁昊,王 聪,徐寿军. 盐胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, **29**(3): 315-318.

MENG F H, WANG C, XU S J. Advances in research on effects of salt stress on plant and the mechanism of plant salt tolerance[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities* (Natural Science Edition), 2014, **29**(3): 315-318.

[7] DEINLEIN U, STEPHAN A B, HORIE T, *et al.* Plant salt-tolerance mechanisms[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, **19**(6): 371-379.

[8] 刘瑜臣. ABA 对苹果砧木抗旱和耐盐性影响及转录组分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.

[9] HUANG G T, MA S L, BAI L P, *et al.* Signal transduction during cold, salt, and drought stresses in plants[J]. *Molecular Biology Reports*, 2012, **39**(2): 969-987.

[10] 崔令军, 陈诗嘉, 刘瑜霞, 等. 激素处理对楸树种子在不同温度下萌发特性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2020, **48**(2): 12-16.

CUI L J, CHEN S J, LIU Y X, *et al.* Germination response of *Catalpa bungei* seed to exogenous hormones treatment under different temperatures[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, **48**(2): 12-16.

[11] 吴统贵, 顾沈华, 颜彬彬, 等. NaCl 胁迫对 3 个楸树无性系苗期根系特征的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, **22**(2): 67-71.

WU T G, GU S H, YAN F B, *et al.* Effect of NaCl stress on root characteristics of three clones of *Catalpa bungei* at seedling stage[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2013, **22**(2): 67-71.

[12] 王 臣, 虞木奎, 王宗星, 等. 9 个楸树无性系对盐胁迫的差异响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, **35**(2): 20-24.

WANG C, YU M K, WANG Z X, *et al.* Difference of response to salt stress of nine clones of *Catalpa bungei* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science Edition), 2011, **35**(2): 20-24.

[13] VENDRAMINI F, DÍAZ S, GURVICH D E, *et al.* Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species[J]. *New Phytologist*, 2002, **154**(1): 147-157.

[14] 赵生龙, 曾凡江, 张 波, 等. 盐分胁迫对骆驼刺幼苗叶片性状的影响[J]. *草业科学*, 2016, **33**(9): 1 770-1 778.

ZHAO S L, ZENG F J, ZHANG B, *et al.* Effects of salt stress on leaf traits of *Alhagi sparsifolia* [J]. *Pratacultural Science*, 2016, **33**(9): 1 770-1 778.

[15] 宁 朋, 王 菲, 肖 雨, 等. 外源 ABA 与盐胁迫对银边吊兰生长及生理特性的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2021, **43**(2): 287-295.

NING P, WANG F, XIAO Y, *et al.* Effects of ABA and salt stress on the growth and physiological characteristics of *Chlorophytum comosum* var. *variegatum* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (Natural Science Edition), 2021, **43**(2): 287-295.

[16] 朱 义, 谭贵娥, 何池全, 等. 盐胁迫对高羊茅(*Festuca arundinacea*)幼苗生长和离子分布的影响[J]. *生态学报*, 2007, **27**(12): 5 447-5 454.

ZHU Y, TAN G E, HE C Q, *et al.* Effect of salinization on growth and ion homeostasis in seedlings of *Festuca arundinacea* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(12): 5 447-5 454.

[17] 顾 恒, 李 玲, 欧阳绮霞, 等. 盐胁迫对 3 个桂花品种生长和生理特性的影响[J]. *中国野生植物资源*, 2020, **39**(10): 28-34.

GU H, LI L, OUYANG Q X, *et al.* Effects of salt stress on the growth and physiological characteristics of three sweet *Osmanthus fragrans* varieties [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2020, **39**(10): 28-34.

[18] 生林山, 韩佳一, 盛雨婷, 等. 外源(Z)-3-己烯基乙酸酯缓解小麦盐胁迫的作用机制[J]. *植物生理学报*, 2022, **58**(7): 1 263-1 274.

SHENG L S, HAN J Y, SHENG Y T, *et al.* The role of exogenous(Z)-3-hexenyl acetate in alleviating salt stress in wheat[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, **58**(7): 1 263-1 274.

[19] RUIJIE, LIU. Comparative physiological analysis of lotus (*Nelumbo nucifera*) cultivars in response to salt stress and cloning of *NnCIPK* genes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, **173**: 29-36.

[20] 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.

LUO D, SHI Y J, SONG F H. Physiological responses of seedlings of Ping'ou hybrid hazelnuts to salt stress and their evaluation of salt tolerance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(1): 1-8.

[21] 薄鹏飞, 孙秀玲, 孙同虎, 等. NaCl 胁迫对海滨木槿抗氧化系统和渗透调节的影响[J]. *西北植物学报*, 2008, **28**(1): 113-118.

BO P F, SUN X L, SUN T H, *et al.* Antioxidative system and osmotic regulation in seedlings of annual *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc. under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, **28**(1): 113-118.

[22] 郝艳玲, 闫 伟. 混合盐胁迫对白榆幼苗形态及生理指标的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2022, **24**(7): 69-76.

HAO Y L, YAN W. Effects of mixed salt stress on morphological and physiological indexes of *Ulmus pumila* seedlings [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, **24**(7): 69-76.

[23] AHMAD ANSARI F, AHMAD I. Fluorescent *Pseudomonas*-FAP2 and *Bacillus licheniformis* interact positively in biofilm mode enhancing plant growth and photosynthetic attributes[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 4 547.

[24] 施 娴, 李洪有, 卢丙越, 等. 3 个苦苣品种对盐胁迫的生理响应及耐受性评价[J]. *作物杂志*, 2022(3): 149-154.

SHI X, LI H Y, LU B Y, *et al.* Physiological responses of three Tartary buckwheat varieties to salt stress and evaluation of salt tolerance[J]. *Crops*, 2022(3): 149-154.

[25] 鲁少尉, 齐飞, 李天来. NaCl 及等渗 PEG 胁迫对番茄叶片光合特性及蔗糖代谢的影响[J]. *华北农学报*, 2012, **27**(3): 136-141.

LU S W, QI F, LI T L. Effect of NaCl and PEG *Iso*-osmotic stresses on photosyntetic characteristics and sucrose metabolizing in tomato leaf[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, **27**(3): 136-141.

[26] 于 捷, 艾楷棋, 何雅倩, 等. 红光与远红光比值对盐胁迫下番茄幼苗抗氧化能力的影响[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(8): 1 487-1 497.

YU J, AI K Q, HE Y Q, *et al.* Effects of different red to far-red light ratios on oxidation resistance ability of tomato seedling under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalalia Sinica*, 2018, **38**(8): 1 487-1 497.

[27] 林双冀, 孙 明. 盐胁迫下芙蓉菊与 4 种菊属植物生理响应特征及其耐盐机理分析[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(6): 1 137-1 144.

LIN S J, SUN M. Analysis of physiological response and salt tolerance mechanism of *Crossostephium chinense* and four species of *Chrysanthemum* under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalalia Sinica*, 2017, **37**(6): 1 137-1 144.

[28] 李娜娜, 刘同歌, 黄志慧, 等. 草本资源植物茛苳对盐胁迫下生理生态及次生代谢产物响应[J]. 草业学报, 2022, **31**(11): 181-190.

LI N N, LIU T G, HUANG Z H, *et al.* Physiological ecological and secondary metabolic responses of the herbaceous resource plant *Thlaspi arvense* to salt stress[J]. *Acta Praticulturae Sinica*, 2022, **31**(11): 181-190.

[29] 丁 燕, 范紫云, 周 欢, 等. 盐胁迫对菠萝蜜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 东南园艺, 2021, **9**(5): 31-40.

DING Y, FAN Z Y, ZHOU H, *et al.* Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of jackfruit seedlings[J]. *Southeast Horticulture*, 2021, **9**(5): 31-40.

[30] 童 辉, 孙 锦, 郭世荣, 等. 等渗 Ca(NO₃)₂ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗生长及渗透调节物质含量的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(2): 306-311.

TONG H, SUN J, GUO S R, *et al.* Effects of *Iso*-osmotic Ca(NO₃)₂ and NaCl stress on the growth and osmotic substances of cucumber seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalalia Sinica*, 2012, **32**(2): 306-311.

[31] NOSISA, MAYABA, *et al.* ABA increases the desiccation tolerance of photosynthesis in the afromontane understorey moss *Atrichum androgynum*[J]. *Annals of Botany*, 2001, **88**(6): 1 093-1 100.

[32] 李振华, 刘 容, 张馨馨, 等. 外源脱落酸增强高羊茅耐盐性的作用[J]. 北方园艺, 2022(7): 66-75.

LI Z H, LIU R, ZHANG X X, *et al.* Effects of exogenous abscisic acid on enhancing salt tolerance of *Festuca arundinacea*[J]. *Northern Horticulture*, 2022(7): 66-75.

[33] 肖 强, 王 刚, 衣艳君, 等. 外源脱落酸增强甘薯幼苗耐盐性的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(1): 201-208.

XIAO Q, WANG G, YI Y J, *et al.* Enhancing the salt tolerance of sweet potato seedlings through exogenous abscisic acid[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, **22**(1): 201-208.

[34] 朱菲菲, 刘奕清, 陈泽雄, 等. 外源脱落酸对盐胁迫下灰毡毛忍冬幼苗生理特性的影响[J]. 中药材, 2013, **36**(7): 1 043-1 046.

ZHU F F, LIU Y Q, CHEN Z X, *et al.* Effect of abscisic acid on physiological characteristics in *Lonicera macranthoides* seedlings under salt stress[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2013, **36**(7): 1 043-1 046.

[35] 赵许朋, 杨 立, 杨双燕, 等. ABA 对盐胁迫下番茄幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(27): 14 833-14 835.

ZHAO X P, YANG L, YANG S Y, *et al.* Effects of exogenous ABA on physiological characteristics of tomato seedlings under salt stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(27): 14 833-14 835.

[36] 刘 旭, 林碧英, 李彩霞, 等. 外源脱落酸对盐胁迫下茄子幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, **54**(2): 231-236.

LIU X, LIN B Y, LI C X, *et al.* Effects of exogenous abscisic acid on physiological characteristics of eggplant seedlings under salt stress[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, **54**(2): 231-236.

[37] SARVAJEET S G, NARENDRA T. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, **48**(12): 909-930.

[38] 汪 塋, 南丽丽, 李景峰, 等. 干旱胁迫对不同根型苜蓿内源激素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, **40**(3): 30-36.

WANG K, NAN L L, LI J F, *et al.* Effects of drought stress on endogenous hormone contents of different root-type alfalfa[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, **40**(3): 30-36.

[39] YANG W, LI P F, GUO S W, *et al.* Compensating effect of fulvic acid and super-absorbent polymer on leaf gas exchange and water use efficiency of maize under moderate water deficit conditions[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, **83**(3): 351-360.

(编辑:潘新社)