

刘源,种培芳,何彩,等.外源脱落酸对盐胁迫下沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)幼苗生长及生理的影响[J].中国沙漠,2026,46(4):193–203.

外源脱落酸对盐胁迫下沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)幼苗生长及生理的影响

刘源¹,种培芳¹,何彩²,晋敏²,胡芳²,张德¹

(1.甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730000; 2.武威市林业科学研究院,甘肃 武威 733000)

摘要:盐胁迫对植物的生长发育有明显抑制作用,而适宜浓度的脱落酸可以有效缓解盐胁迫对植物造成的损伤。本研究以沙木蓼幼苗为材料,采用盆栽试验方法,以不施加外源脱落酸对照(CK),探究150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫下施加不同浓度(2.5、5、7.5、10、15 mg·L⁻¹)外源脱落酸对沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)幼苗各器官生长及生理影响,从而筛选出能在盐胁迫下也可促进沙木蓼生长的适宜脱落酸浓度。结果显示:低浓度脱落酸通过降低丙二醛含量来缓解盐胁迫伤害。5 mg·L⁻¹处理下,沙木蓼幼苗各器官丙二醛含量最低,其中根部较CK降低38.46%,茎部降低34.78%,叶部降低26.25%。高浓度脱落酸处理使可溶性糖和淀粉含量显著上升,15 mg·L⁻¹时幼苗根部可溶性糖含量较CK增长61.19%,茎部和叶部可溶性糖含量均达最高;根部淀粉含量较CK增长36.01%,茎部增长48.61%,叶部增长51.48%。这表明低浓度脱落酸(2.5、5 mg·L⁻¹)可有效缓解盐胁迫对沙木蓼幼苗的伤害,而高浓度脱落酸(15 mg·L⁻¹)对盐胁迫的缓解能力下降,甚至抑制幼苗生长。主成分分析显示,丙二醛含量、干鲜重、脯氨酸含量、淀粉含量和超氧化物歧化酶活性可作为外源脱落酸对沙木蓼盐胁迫缓解能力的主要鉴定指标。运用隶属函数对沙木蓼幼苗根、茎、叶的10个指标进行综合评价,结果表明,施加5 mg·L⁻¹的外源脱落酸溶液时,各器官平均隶属度最高,分别为0.97、0.93和0.73,说明该浓度的外源脱落酸对沙木蓼耐盐性的调控能力最强。

关键词:沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*);脱落酸;盐胁迫;生理指标;主成分分析

文章编号:1000-694X(2026)04-193-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00058

中图分类号:Q945

文献标志码:A

0 引言

沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)是蓼科木蓼属阔叶灌木,具有根系发达、生长速度快的特点,因此在流动沙丘或半固定沙丘上栽植均能够发挥良好的防风固沙作用^[1-2]。沙木蓼还具有耐旱、抗寒、抗风蚀、耐沙埋的极端环境适应性,对改善荒漠地区生态环境具有重要作用^[3-5]。西北干旱区存在大片盐渍化土地,盐胁迫会导致沙木蓼生长发育受阻,从而影响防风固沙的效果。目前沙木蓼的逆境胁迫相关研究主要为抗旱性,如He等^[6]对自然高温干旱环境下不同年份的沙木蓼进行了多组学分析,结果

表明,随年份增长,多数生理指标呈增长趋势,除抗氧化酶活性外,黄酮类物质生物合成、植物昼夜节律通路等通路差异表达基因和差异累积代谢物的增加与其抗旱性密切相关。有关沙木蓼抗旱的形态、生理、分子机制已进行了大量深入的研究,而有关盐胁迫的研究较少,对于如何提高其耐盐性仍需要进一步研究。目前,缓解植物盐胁迫的主要方式有添加植物激素等化学方法、水分调节等物理方法和微生物法,而植物激素在盐胁迫的缓解中起着重要作用,如外源褪黑素可以提高抗氧化酶活性,反式脱落酸可以减少植物受到的氧化损伤^[7]。

脱落酸(Abscisic Acid, ABA)是植物体内由叶

收稿日期:2025-11-15; 改回日期:2026-04-07

资助项目:甘肃省科技重大专项(25ZDWA007);甘肃省国土空间生态修复适宜植物应用试验示范项目;甘肃省科技计划资助优秀博士项目(25JRRA389);甘肃省研究生创新之星项目(2025CXZX-831);甘肃省科技计划项目(25JRRH004, 24JRRH007);武威市科技计划项目(WW24B01NY045)

作者简介:刘源(2000—),男,甘肃定西人,博士研究生,从事植物逆境生理生态研究。E-mail:1169321037@qq.com

通信作者:种培芳(E-mail:zhongpf@gsau.edu.cn);何彩(E-mail:hcyldfcl@163.com)

黄质合成的一种抑制生长的植物激素,在植物种子的萌发、幼苗的生长发育、叶片的衰老脱落和果实的成熟等多种生长过程中具有重要作用并参与了多种生理生化反应,广泛分布于高等植物^[8-10]。除了参与植物生长发育的调控外,ABA可以通过控制植物细胞水分平衡和提高植物体内抗氧化酶活性的方式来减轻逆境胁迫的影响,具有增强植物抗逆性的功能,因此广泛应用于缓解植物逆境胁迫的研究^[11]。大量研究表明,盐胁迫下外源ABA能诱导植物体产生抗性,可促进盐胁迫处理下植物的渗透调节物质、叶绿素含量的积累,保护植物的光合系统,进而降低植物体内丙二醛含量,提高植物抗氧化酶活性,维持细胞膜完整性^[12-14]。沙木蓼作为盐渍化土地修复和防风固沙的核心树种,其耐盐性不足已成为制约其生态修复效能发挥的关键因素,因此开展外源激素缓解沙木蓼盐胁迫的相关研究,不仅能够完善沙木蓼逆境生理调控机制,为其耐盐性提升提供科学依据和技术支撑,还能推动西北干旱区盐渍化土地的修复,改善区域生态环境,具有重要的理论意义和实践价值。

综上所述,目前对于沙木蓼耐盐性已有一些研究,而针对沙木蓼盐胁迫的调控技术尚不完善,缺乏高效、低成本的耐盐性提升方案,并未系统阐述如何提高其抗盐性,制约了其生态修复效能的充分发挥。大量研究表明,外源ABA可以缓解植物受到盐胁迫的损伤,但该效果尚未在沙木蓼中得以验证,若存在缓解效果,其生理机制仍需进一步研究,同时施加外源ABA缓解沙木蓼盐胁迫的最适浓度尚不明确。基于此,本研究以沙木蓼幼苗为研究对象,通过施加不同浓度的外源ABA溶液,探究ABA对沙木蓼幼苗的缓解效果及生理机制,筛选出对盐胁迫具有显著缓解作用的ABA处理浓度,为提高沙木蓼耐盐性提供新的方向和依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与材料

本试验于2024年7月至10月在武威市林业科学研究院试验基地进行,试验基地地处甘肃省武威市凉州区(38°02'N、102°42'E),海拔1 480 m,年平均降水量166 mm,平均年蒸发量2 020 mm,年平均气温7.8℃,属温带大陆性干旱气候。本研究在日光温室中采用人为控制试验进行幼苗培育和试验

处理,营养钵大小为10 cm×12 cm×9 cm,种子及外源脱落酸由武威市林业科学研究院提供,脱落酸纯度99%,试验进行前存放于-20℃冰箱。

1.2 试验设计

沙木蓼幼苗采用营养土盆栽种植方式,每盆种植16粒沙木蓼种子进行育苗,共种植200盆沙木蓼幼苗。前期试验表明,150 mmol·L⁻¹盐胁迫处理对沙木蓼幼苗生长有明显抑制作用且能保持其生长特性,因此选择在该盐浓度下对沙木蓼幼苗施加不同浓度的外源ABA激素进行处理^[15]。在试验正式开始前进行预处理,设置0、2.5、5、7.5、10、15、20、25、30共9个ABA激素浓度梯度,筛选出对盐胁迫下沙木蓼幼苗生长有明显影响且能维持其正常生长的CK(0 mg·L⁻¹)、A1(2.5 mg·L⁻¹)、A2(5 mg·L⁻¹)、A3(7.5 mg·L⁻¹)、A4(10 mg·L⁻¹)、A5(15 mg·L⁻¹)共6个ABA激素处理。本试验处理所用溶液为NaCl溶液和外源脱落酸激素溶液,每个处理设置12个重复。育苗完成后筛选出72盆长势均一的沙木蓼幼苗进行盐处理,平均每隔3 d将浓度为150 mmol·L⁻¹的NaCl溶液浇灌至每个处理的盆钵中,每个处理浇灌2 L盐溶液,使得每个营养钵吸收至饱和,共计处理5次。盐处理完成后进行ABA激素处理,平均每隔5 d喷洒不同浓度的ABA激素溶液75 mL至对应的盆钵中,每次喷洒保证各处理的沙木蓼幼苗叶片有溶液滴下,共计处理3次,试验在温室大棚中进行,试验期间保证植株处于水分充足的状态。播种日期为2024年7月5日,盐处理日期为2024年8月14日,ABA激素处理日期为2024年8月30日,采样日期为2024年9月15日。

1.3 生长与生理指标测定

株高为植株根底部至叶顶部的距离,将样品与标尺放于同一个背景下拍照,将照片导入Image J软件测量得到沙木蓼幼苗的株高(cm)。样品破坏性取样分离为根、茎和叶测量鲜重(g),在烘箱中105℃杀青30 min,于80℃烘干至恒重后称量得到沙木蓼幼苗的干重(g)。根据鲜重与干重计算得到沙木蓼幼苗的含水率和根冠比:

$$W=(FW-DW)/FW \quad (1)$$

式中:W为含水率;FW为植物鲜重(g);DW为植物干重(g)。

丙二醛(Malondialdehyde,MDA)含量使用硫代

巴比妥酸比色法测定^[16];游离脯氨酸(Proline, Pro)含量采用茚三酮比色法测定^[17];可溶性糖(Soluble Sugars, SS)和淀粉(Starch, ST)含量采用蒽酮比色法测定^[18];可溶性蛋白(Soluble Protein, SP)含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[19];超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用 WST-8 法活性测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)测定;过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性使用可见显色法过氧化氢酶试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)测定;过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性使用愈创木酚法过氧化物酶试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)测定。所有指标测定均设置3个重复。

株高、干鲜重、含水率及根冠比等生长指标反映沙木蓼幼苗生长状况;丙二醛含量反映沙木蓼幼苗细胞膜损伤程度;抗氧化酶活性反映幼苗的抗氧化能力;可溶性蛋白及游离脯氨酸等渗透调节物质含量反映沙木蓼幼苗对胁迫的耐受能力;可溶性糖及淀粉等非结构性碳水化合物含量反映幼苗生理状态与适应能力。

1.4 数据分析

本研究使用 Excel 软件对沙木蓼幼苗的各项数据进行分类整理,使用 SPSS 27.0 对整理所得数据进行单因素方差分析、相关性分析和主成分分析,采用沃勒-邓肯法进行多重比较($P < 0.05$)。使用 Origin 2024b 软件对所有数据分别绘图。使用隶属函数(R_i)法进行综合评价^[20]:

$$R_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$R_i = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

式中: X_i 为沙木蓼幼苗生理指标的测定值 i ; $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别表示测定值重复中的最小值与最大值。当测定值与耐盐性呈正相关时,使用隶属函数法(式2),若测定值与耐盐性呈负相关,则使用反隶属函数法(式3),最后对所有指标的隶属函数值取平均数。

2 结果与分析

2.1 外源 ABA 对盐胁迫下沙木蓼幼苗生长发育的缓解效果

外源 ABA 处理后,沙木蓼幼苗株高随激素浓度升高呈现先上升后下降的趋势(表1),在 A5 处理时出现最小值,在 A3 处理时出现最大值。A1、A2 和 A3 较 CK 分别增长 4.68%、11.29% 和 23.77%。A3 与

A2 处理间差异不显著($P > 0.05$),但与其他处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

外源 ABA 处理后,沙木蓼幼苗各器官鲜重和干重均随激素浓度升高呈现先上升后下降的趋势(表1),根部升幅最大,叶部升幅最小。根部生物量变化表明,幼苗根部干鲜重均在 A2 处理时出现最大值,其中鲜重较 CK 分别增长 93.97%、130.22%、72.86%、43.24%、46.74%,干重较 CK 分别增长 60.19%、101.01%、40.70%、11.66%、8.07%;茎部和叶部干鲜重均在 A3 处理时达到最大值,在 A5 处理时降至最小值,其中茎部最大值较 CK 分别上升 54.91%(鲜重)和 23.98%(干重),最小值较 CK 分别降低 15.93%(鲜重)和 15.69%(干重),且 A5 处理茎部干重与其他处理间存在显著差异($P < 0.05$);叶部最大值较 CK 分别上升 35.44%(鲜重)和 27.89%(干重),最小值较 CK 分别降低 8.62%(鲜重)和 20.50%(干重)。

外源 ABA 处理后,沙木蓼幼苗根冠比随激素浓度升高总体呈现上升趋势(表1),在 A2 处理时出现最大值,各处理较 CK 分别升高 49.11%、67.57%、11.01%、2.75% 和 34.38%,CK 和 A3、A4 处理间差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 外源 ABA 对盐胁迫下沙木蓼幼苗抗氧化能力的缓解效果

2.2.1 外源 ABA 对盐胁迫下沙木蓼幼苗氧化伤害的缓解效果

外源 ABA 处理后,沙木蓼幼苗各器官的丙二醛(MDA)含量随 ABA 浓度升高总体呈现先下降后上升的趋势(图1),各器官 MDA 含量在 A2 处理时出现最小值,说明沙木蓼幼苗各器官所受盐胁迫的氧化伤害均有一定程度的缓解。和对照相比,幼苗根部 MDA 含量各处理分别降低 18.68%、38.46%、14.29%、24.18%、9.89%,A1 与其他处理间差异不显著($P > 0.05$),CK 与 A2、A4 处理间差异显著($P < 0.05$);和对照相比,茎部 MDA 含量各处理分别降低 28.99%、34.78%、13.04%、13.04%、7.25%,CK 和 A5 处理间差异不显著($P > 0.05$),但与其他处理间存在显著差异($P < 0.05$);幼苗叶部 MDA 含量和对照相比,各处理分别降低 20.45%、26.25%、26.25%、24.60%、20.45%。

2.2.2 外源 ABA 对盐胁迫下沙木蓼幼苗抗氧化酶活性的缓解效果

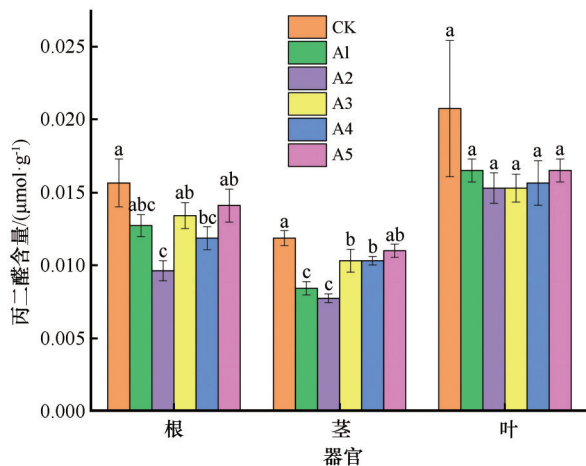
外源 ABA 处理后,沙木蓼幼苗各器官中超氧化

表1 盐胁迫下施加外源ABA后沙木蓼幼苗生长指标的变化

Table 1 Changes in growth indicator of *A. bracteata* seedlings under salt stress after application of exogenous ABA

处理	器官	鲜重/g	干重/g	含水率	株高/cm	根冠比
CK	根	0.3462±0.063 ^d	0.2075±0.023 ^c	0.3860±0.040 ^a	29.6693±2.45 ^b	0.1863±0.022 ^d
	茎	0.8920±0.035 ^d	0.4020±0.005 ^c	0.5484±0.012 ^a		
	叶	1.6288±0.033 ^c	0.5711±0.008 ^d	0.6488±0.012 ^b		
A1	根	0.6715±0.021 ^{ab}	0.3323±0.031 ^b	0.5057±0.039 ^a	31.05767±0.47 ^b	0.2778±0.029 ^{ab}
	茎	1.0383±0.035 ^c	0.4060±0.006 ^c	0.6077±0.019 ^b		
	叶	1.8624±0.032 ^b	0.6343±0.005 ^c	0.6593±0.003 ^b		
A2	根	0.7970±0.049 ^a	0.4170±0.004 ^a	0.4733±0.028 ^a	33.0180±1.59 ^{ab}	0.3122±0.004 ^a
	茎	1.2153±0.053 ^b	0.4791±0.006 ^{ab}	0.6038±0.023 ^b		
	叶	2.1345±0.033 ^a	0.6856±0.008 ^b	0.6786±0.008 ^{ab}		
A3	根	0.5984±0.013 ^{bc}	0.2919±0.013 ^b	0.5112±0.030 ^a	36.7207±1.86 ^a	0.2068±0.009 ^{cd}
	茎	1.3817±0.019 ^a	0.4983±0.002 ^a	0.6392±0.004 ^b		
	叶	2.2060±0.079 ^a	0.7305±0.005 ^a	0.6681±0.011 ^{ab}		
A4	根	0.4959±0.041 ^c	0.2317±0.009 ^c	0.5239±0.054 ^a	29.5663±1.16 ^b	0.1914±0.010 ^{cd}
	茎	1.0556±0.034 ^c	0.4244±0.030 ^{bc}	0.5989±0.016 ^{ab}		
	叶	2.1577±0.050 ^a	0.6309±0.008 ^c	0.7073±0.007 ^a		
A5	根	0.5080±0.059 ^c	0.2242±0.012 ^c	0.5440±0.069 ^a	28.5310±0.74 ^b	0.2503±0.026 ^{bc}
	茎	0.7499±0.036 ^c	0.3389±0.032 ^d	0.5500±0.023 ^a		
	叶	1.4883±0.058 ^c	0.4541±0.023 ^c	0.6931±0.026 ^{ab}		

注:数据呈现方式统一为平均值±标准误差;不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著($P<0.05$)。

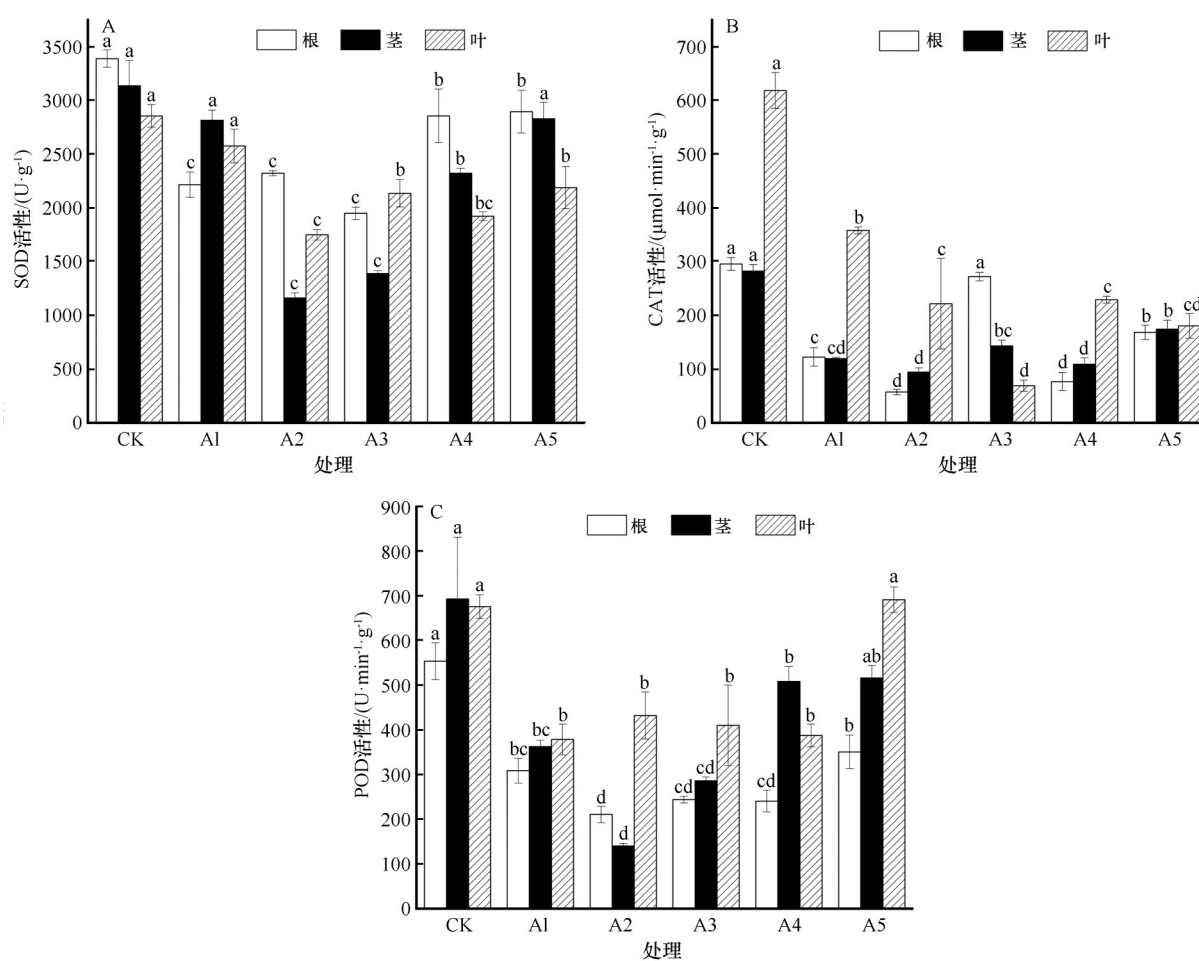


注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著($P<0.05$)

图1 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗氧化伤害的缓解效果
Fig.1 The alleviating effect of exogenous ABA on oxidative damage in *A. bracteata* seedlings under salt stress

物歧化酶(SOD)活性随ABA浓度升高总体呈先下降后上升的趋势,过氧化氢酶(CAT)活性呈下降趋势,过氧化物酶(POD)活性总体呈先下降后上升的趋势(图2),沙木蓼幼苗茎部SOD活性降幅最大,根

部与叶部CAT活性降幅较大。根部SOD活性在A3处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低34.65%、31.50%、42.52%、15.75%、14.57%,CK与其他处理均存在显著差异($P<0.05$);茎部SOD活性在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低10.21%、62.98%、55.74%、25.96%、9.79%,A4和其他处理间差异显著($P<0.05$);叶部SOD活性在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低9.81%、38.79%、25.23%、32.71%、23.36%。根部CAT活性在A2处理时出现最小值,与对照相比降低80.86%,A1、A5与其他处理间均存在显著差异($P<0.05$);茎部CAT活性在A2处理时出现最小值,与对照相比降低68.40%;叶部CAT活性在A3处理时出现最小值,各处理较CK分别降低42.20%、64.25%、88.95%、63.05%、70.70%,A1与其他处理间差异显著($P<0.05$)。根部POD活性在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低44.19%、61.89%、55.88%、56.50%、36.61%;茎部POD活性在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低



注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著($P < 0.05$)

图2 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗抗氧化酶活性的缓解效果

Fig.2 Relief effect of exogenous ABA on antioxidant enzyme activity in *A. bracteata* seedlings under salt stress

47.61%、79.67%、58.65%、26.60%、25.49%;叶部POD活性在A1处理时出现最小值,较CK降低43.92%,在A5处理时出现最大值,较CK增长2.27%。

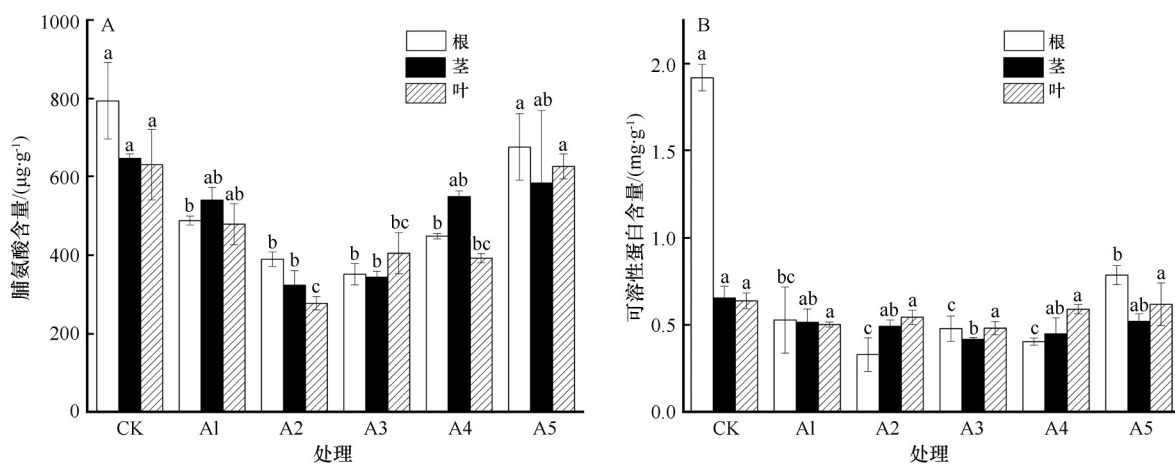
2.3 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗渗透调节物质的缓解效果

外源ABA处理后,沙木蓼幼苗各器官中脯氨酸(Pro)含量随ABA浓度升高总体呈先下降后上升趋势,可溶性蛋白(SP)含量总体呈下降趋势(图3)。幼苗根部Pro含量在A3处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低38.52%、50.93%、55.77%、43.52%、14.81%;茎部Pro含量降幅最小,在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低16.43%、50.07%、46.90%、15.04%、9.70%;叶部Pro含量降幅最大,在A2处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低24.08%、56.13%、35.85%、37.88%、0.76%,CK与A2、A3、A4处理间存在显著

差异($P < 0.05$)。幼苗根部SP含量降幅最大,在A2处理时出现最小值,与对照相比降低82.92%,CK和其他处理间存在显著差异($P < 0.05$);茎部SP含量在A3处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低21.35%、24.91%、36.39%、31.63%、20.56%;叶部SP含量降幅最小,在A3处理时出现最小值,与对照相比,各处理分别降低21.37%、14.88%、24.61%、7.58%、3.12%。

2.4 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗非结构性碳水化合物的缓解效果

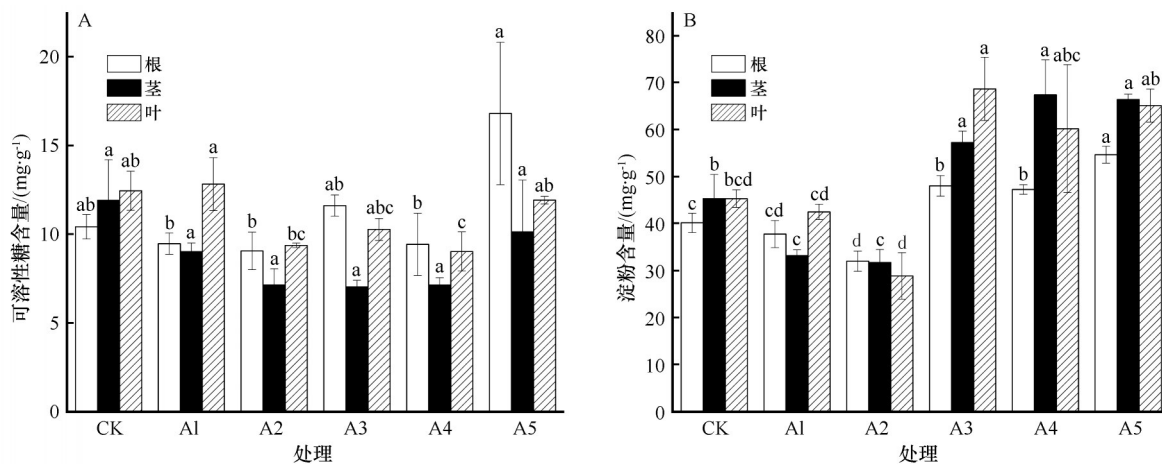
外源ABA处理后,沙木蓼幼苗各器官中可溶性糖(SS)含量随ABA浓度升高总体呈先下降后上升趋势,淀粉(ST)含量也总体呈先下降后上升的趋势(图4)。根部SS含量在A2处理时出现最小值,较CK降低13.04%,在A5处理时出现最大值,较CK增长61.19%;茎部SS含量在A3处理时出现最小值,



注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著($P<0.05$)

图3 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗渗透调节物质的缓解效果

Fig.3 The alleviating effect of exogenous ABA on osmotic regulatory substances in *A. bracteata* seedlings under salt stress



注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著($P<0.05$)

图4 外源ABA对盐胁迫下沙木蓼幼苗非结构性碳水化合物的缓解效果

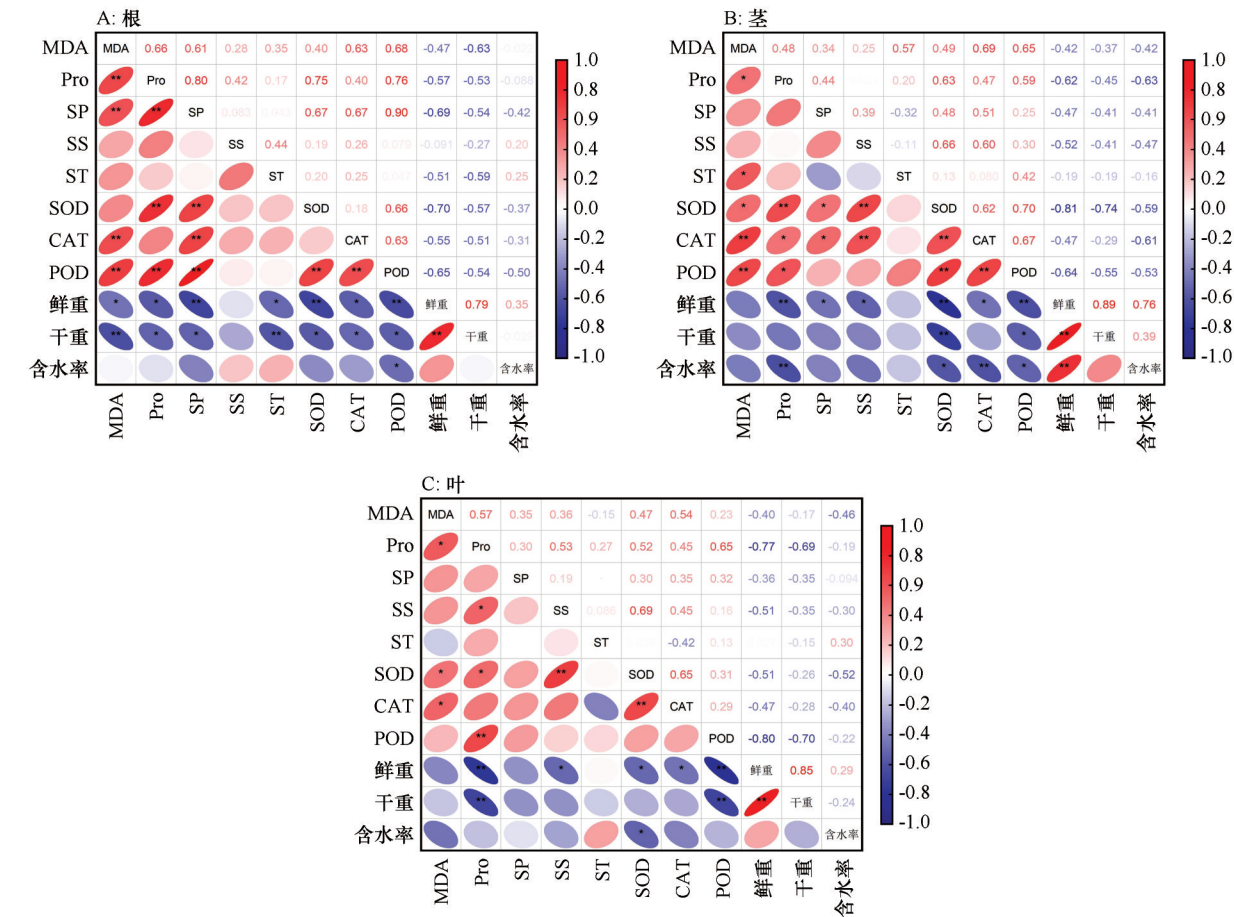
Fig.4 The alleviating effect of exogenous ABA on non structural carbohydrates in *A. bracteata* seedlings under salt stress

与对照相比,各处理分别降低24.26%、39.94%、40.93%、40.08%、14.96%,各处理间均无显著差异($P>0.05$);叶部SS含量在A1处理时略有增长,在A4处理时出现最小值,较CK降低27.44%。根部ST含量升幅最小,在A2处理时出现最小值,较CK降低20.28%,在A5处理时出现最大值,较CK增长36.01%;茎部ST含量在A2处理时出现最小值,较CK降低29.96%,在A4处理时出现最大值,较CK增长48.61%;叶部ST含量升幅最大,在A2处理时出现最小值,较CK降低36.22%,在A3处理时出现最大值,较CK增长51.48%,CK和A3处理间存在显著差异($P<0.05$)。

2.5 指标相关性分析

通过外源ABA处理后沙木蓼幼苗各器官的指

标相关性分析可知,各指标之间存在不同程度的相关性(图5)。沙木蓼幼苗根部SP含量与Pro含量、抗氧化酶活性间呈极显著正相关($P<0.01$),干鲜重与其他指标之间均呈负相关。抗氧化酶活性之间呈正相关,但SOD活性和CAT活性之间不显著($P>0.05$)。MDA含量与Pro之间呈极显著正相关($P<0.01$),与抗氧化酶活性之间呈正相关。沙木蓼幼苗茎部抗氧化酶活性之间均呈极显著正相关($P<0.01$),MDA含量、Pro含量、SS含量与抗氧化酶活性间呈正相关,MDA含量和ST含量间呈显著正相关($P<0.05$),生长指标和生理指标间均呈负相关。沙木蓼幼苗叶部SS含量与Pro含量呈显著正相关($P<0.05$),与SOD活性呈极显著正相关($P<0.01$),Pro含量、POD活性和干鲜重呈极显著负相关($P<0.01$)。



注：*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$ 。MDA：丙二醛；Pro：脯氨酸；SP：可溶性蛋白；SS：可溶性糖；ST：淀粉；SOD：超氧化物歧化酶；CAT：过氧化氢酶；POD：过氧化物酶

图5 指标相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of indicators

2.6 主成分分析

外源 ABA 处理后,对沙木蓼幼苗各器官的 10 个指标进行 PCA 分析(图 6)。结果表明,第一主成分、第二主成分和第三主成分的累计贡献率为 71.9%。第一主成分的主要因子为脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性,反映植物渗透调节与抗氧化能力;第二主成分的主要因子为丙二醛(MDA)、鲜重和干重,反映植物生长与抗氧化能力;第三主成分的主要因子为淀粉(ST),反映植物能源物质的储存(表 2)。根部和茎部与第二、三主成分相关性较大,叶部与第一主成分的部分指标存在相关性。因此,MDA、干重、鲜重和 ST 可作为根茎部外源 ABA 对盐胁迫缓解能力的主要鉴定指标,SOD 活性和 Pro 可作为叶部外源 ABA 对盐胁迫缓解能力的主

要鉴定指标。

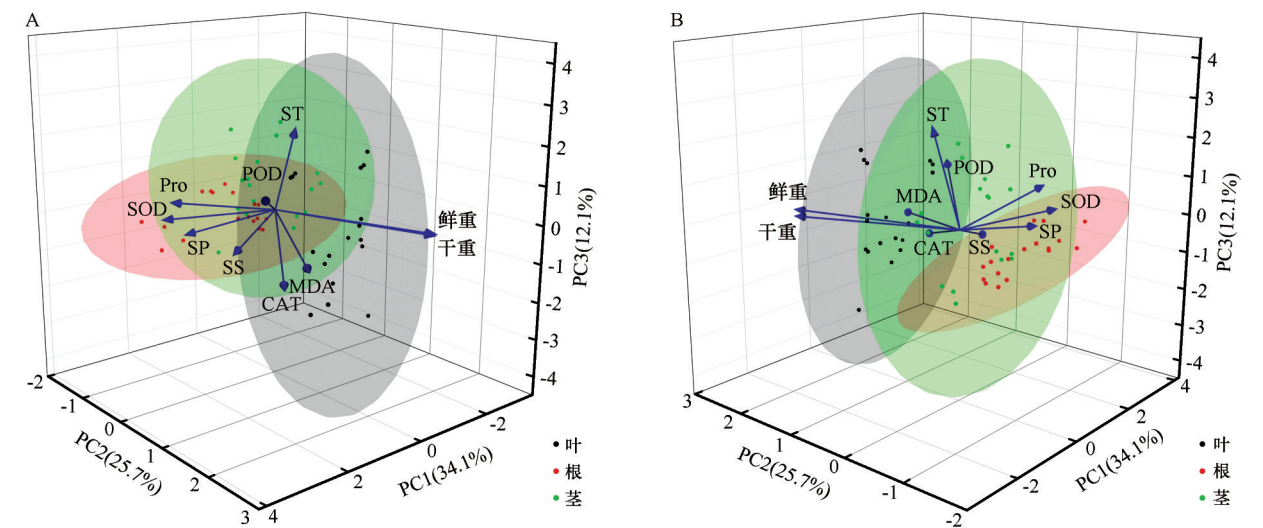
2.7 隶属函数综合评价

对外源 ABA 处理下沙木蓼幼苗根、茎、叶的 10 个指标进行隶属函数综合评价(表 3),经过叶片喷施外源 ABA 后,沙木蓼幼苗各器官平均隶属度均高于 CK。在外源 ABA 浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A2)时根、茎、叶平均隶属度最高,分别为 0.97、0.93、0.73。

3 讨论

3.1 脱落酸对盐胁迫下沙木蓼生长的影响

盐胁迫会影响植物的正常发育,而脱落酸(ABA)作为常见植物激素可以减缓植物生长,从而达到调控缓解盐害的作用^[21-22]。株高、生物量等植物生长指标可以反映植物的生长发育是否正常^[23]。ABA 本身是一种抑制生长的植物激素,本研究结果



注:MDA 为丙二醛;Pro 为脯氨酸;SP 为可溶性蛋白;SS 为可溶性糖;ST 为淀粉;SOD 为超氧化物歧化酶;CAT 为过氧化氢酶;POD 为过氧化物酶。

图 6 施加外源 ABA 后沙木蓼幼苗各器官 PCA 排序

Fig.6 PCA ranking of various organs in *A. bracteata* seedlings after exogenous ABA application

表 2 因子载荷量

Table 2 Factor load scale

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
MDA	1.5098	1.8875	-0.4907
Pro	2.5965	-0.2064	0.6253
SP	2.1545	-0.3027	-0.3446
SS	1.6581	0.3893	-0.7005
ST	0.2686	0.6522	2.4056
SOD	2.5544	-0.4625	0.0707
CAT	1.6952	1.5345	-1.0633
POD	1.8431	1.2368	1.0746
鲜重	-1.2382	2.4134	0.0525
干重	-1.3798	2.3142	-0.0591
特征值	3.4146	2.5681	1.2130
贡献率/%	34.1462	25.6811	12.1296
累计贡献率/%	34.1462	59.8273	71.9568

注:MDA 为丙二醛;Pro 为脯氨酸;SP 为可溶性蛋白;SS 为可溶性糖;ST 为淀粉;SOD 为超氧化物歧化酶;CAT 为过氧化氢酶;POD 为过氧化物酶。

表明,施加低浓度外源 ABA 后沙木蓼幼苗的株高增加,说明外源 ABA 明显缓解了沙木蓼幼苗受到的盐害,而当外源 ABA 浓度达到 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时,沙木蓼幼苗株高降低至与 CK 一致甚至低于 CK,这种效果与八棱海棠的相关研究结果相近^[24],说明 ABA 对盐胁迫并非简单的缓解作用,较高浓度的 ABA 对沙

表 3 隶属函数综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of membership functions

处理	根	茎	叶
CK	0.15	0.12	0.21
A1	0.73	0.58	0.53
A2	0.97	0.93	0.73
A3	0.62	0.80	0.59
A4	0.63	0.52	0.61
A5	0.31	0.24	0.46

木蓼的缓解效果有限,ABA 发挥了植物生长抑制剂的作用,抑制了整株沙木蓼的生长。根系的主要作用为新陈代谢、水分吸收和地上生物量的积累,在受到盐胁迫时,植物通常会调整生物量分配策略,导致植物各器官生物量出现不同程度的变化^[18]。本研究表明,外源施加 ABA 浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,沙木蓼幼苗茎部和叶部生物量均低于 CK,而根部生物量高于 CK,说明沙木蓼不同器官对高浓度外源 ABA 的响应存在显著的器官特异性,也揭示了盐胁迫下植物各器官对 ABA 调控的应答机制存在差异化适配特征。高浓度的 ABA 对沙木蓼幼苗茎部和叶部的生长发育产生了抑制,根部对高浓度的外源 ABA 具有一定耐受性,一方面可能植物各器官内源 ABA 的含量、合成与代谢速率存在差异,施加外源 ABA 影响了沙木蓼各器官的激素平衡;另一方面

ABA于植物根冠和叶中合成后运输至不同器官,根部作为感知环境胁迫的先端器官,通过自身的耐受机制维持着植物生长态势,这可能是植物在盐胁迫叠加高浓度外源激素调控下,为保障根系功能进而维持植株生存而形成的一种抗逆响应策略^[25]。因此在利用外源ABA调控植物抗盐性时,需充分考虑不同器官的响应差异,才能实现抗逆调控效果的最优化。

3.2 脱落酸对盐胁迫下沙木蓼生理的影响

植物通常具有一定的自我调节能力来抵御盐害,抗氧化系统和渗透调节作用是其中重要的保护机制^[26]。丙二醛含量是植物受到盐害程度的重要指标,当植物受到盐胁迫时,植物细胞离子的过量积累导致膜蛋白和膜脂受到伤害,细胞内容物的外渗会导致电导率的增大,由此产生大量膜脂过氧化产物丙二醛^[27]。丙二醛含量的降低说明沙木蓼各器官中活性氧被清除,低浓度的ABA可以有效缓解盐胁迫所带来的盐害,高浓度的ABA对沙木蓼幼苗受到的盐胁迫具有一定缓解作用,这与甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)的相关研究结果接近^[28]。沙木蓼在受到盐胁迫时进行了自我调节,抗氧化系统迅速反应,抗氧化酶活性维持在较高表达水平,通过强化活性氧清除能力来抵御盐胁迫引发的氧化损伤,这是植物应对非生物胁迫的典型适应性生理响应,也是其在盐渍环境中维持生理稳态的核心自我保护策略。施加ABA后抗氧化酶活性降低,这一变化并非抗氧化系统功能的衰退,而是盐胁迫下氧化胁迫压力得到有效缓解的直接生理表征,这一现象充分印证了外源ABA对沙木蓼盐胁迫氧化损伤的有效缓解作用,也揭示了ABA可通过调控植物抗氧化防御系统的表达强度,实现对盐胁迫逆境的精准生理调控,其作用机制并非简单叠加抗氧化能力,而是从本质上提升植株对盐渍环境的适应能力,让抗逆生理过程从被动应激转向主动调控^[29]。沙木蓼幼苗各器官渗透调节物质含量的降低说明低浓度的ABA有效缓解了盐害,沙木蓼不再需要大量的渗透调节物质来维持细胞的结构和功能,可溶性蛋白含量的变化并不明显,可以推测ABA可能对可溶性蛋白的合成有抑制作用。不同器官的渗透调节物质含量变化存在一定差异说明ABA对各器官的缓解能力不同,叶部盐害的缓解效果最明显。可溶性糖除了参与植物的渗透调节外,还是植物体内常

见的能源物质。与其他指标相比,可溶性糖含量变幅较小,推测ABA对其调控作用较弱,可能通过间接通路影响。而淀粉含量的快速升高,表明高浓度ABA可显著促进植株贮藏物质积累,通过强化能量物质储备,提升沙木蓼对盐胁迫的耐受与适应能力。

3.3 指标综合评价

通过相关性分析、主成分分析及隶属函数综合评价体系的系统耦合,本研究精准筛选出沙木蓼盐胁迫缓解能力的核心鉴定指标:根茎部以丙二醛、干鲜重及可溶性糖为关键表征因子,叶部则以SOD(超氧化物歧化酶)活性与脯氨酸含量为核心评价指标,揭示了外源ABA调控沙木蓼抗盐性的器官差异化响应机制。根据隶属函数综合分析,施加 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A2)外源ABA后,沙木蓼幼苗各器官综合得分最高,因此A2为外源ABA缓解沙木蓼盐胁迫的最适浓度,这一发现为盐碱地植被恢复中ABA的精准施用提供了依据。在施加低浓度外源ABA后,沙木蓼幼苗丙二醛、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性均存在不同程度的降低,由此可以推测外源ABA可能通过直接清除活性氧的方式来缓解沙木蓼受到盐胁迫的损伤^[30]。在施加高浓度外源ABA后,沙木蓼生长指标降低,但丙二醛含量低于CK,证明其仍保留一定的胁迫缓解能力,但生长指标显著下降揭示ABA影响抗逆调控的同时还参与了植物生长调控,高浓度的外源ABA发挥了植物生长抑制剂的作用,诱导沙木蓼幼苗进入休眠,抑制了沙木蓼细胞的分裂,限制沙木蓼器官的生长。

4 结论

外源ABA溶液对沙木蓼受到的盐胁迫存在缓解作用。低浓度ABA溶液(2.5 、 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可通过降低丙二醛含量来缓解盐胁迫伤害,而中等浓度ABA溶液(7.5 、 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对盐害的缓解能力有限,当浓度达到 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时甚至会抑制沙木蓼幼苗的生长。外源ABA溶液可能通过直接清除活性氧的方式来调节沙木蓼幼苗的耐盐性, $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 是外源ABA缓解沙木蓼盐胁迫的最适浓度。

参考文献:

- [1] Li W Y, Guo Y, Wu R N, et al. Characteristics of water consumption of *Atraphaxis bracteata* A. Los. in the Mu Us Sandy

- Land of north central China[J].Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(4): 880–892.
- [2] 马宏文, 杨少云, 马小娟, 等. 不同留茬高度对沙木蓼种条生长的影响[J]. 现代农业科技, 2023(19): 110–112.
- [3] 闫磊, 赵彦坤, 何彩, 等. 沙木蓼组织快繁技术初探[J]. 甘肃林业, 2023(1): 41–43.
- [4] 何彩, 刘伟, 晋敏, 等. 沙木蓼育苗及造林关键技术探究[J]. 农业与技术, 2023, 43(15): 74–77.
- [5] 刘世增, 李昌龙, 纪永福, 等. 甘肃省民勤连古城自然保护区沙木蓼种群的结构与动态[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2763–2769.
- [6] He C, Jin M, Liu W, et al. The metabolomics and transcriptomics of *Atraphaxis bracteata* reveal age-related molecular alterations under naturally high temperature and drought conditions[J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(1): e14129.
- [7] 常长越, 颜宏, 卢雨欣, 等. 植物盐胁迫研究进展[J]. 中国农学通报, 2025, 41(22): 82–88.
- [8] 陈传亮, 尚烨, 闫庚洋, 等. 外源脱落酸对朝天椒幼苗生长和生理的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(23): 22–26.
- [9] 张钰, 陈慧, 王改萍. 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[J]. 西北植物学报, 2023, 43(6): 996–1005.
- [10] 王艳萍, 范宇浚, 马华燕, 等. 外源脱落酸对水稻苗期根系形态建成及其诱导化感作用的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(1): 126–132.
- [11] 刘涛涛, 王雯, 王言, 等. 外源 ABA 缓解干旱胁迫下马铃薯叶片损伤的生理机制[J]. 甘肃农业大学学报, 2025, 60(2): 89–96.
- [12] Yan K, Bian T T, He W J, et al. Root abscisic acid contributes to defending photoinhibition in Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) under salt stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(12): 3934.
- [13] 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.
- [14] 张环宇. 盐胁迫下外源激素对黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(3): 38–41.
- [15] 刘源, 何彩, 晋敏, 等. 沙木蓼幼苗在不同盐度胁迫下的生理适应机制[J]. 草业科学, 2026, 43(1): 65–75.
- [16] 蔡文祺, 李淑霞, 王晓彤, 等. 外源褪黑素与乙烯交互对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(1): 80–93.
- [17] 黄梦婷, 刘文兰. 盐旱胁迫下紫花地丁幼苗生理特性[J]. 草业科学, 2025, 42(5): 1211–1221.
- [18] 马凯, 饶良懿. 盐胁迫下菊芋生长和生理指标对生物炭的响应[J]. 草业科学, 2023, 40(11): 2879–2888.
- [19] 袁惠, 张鲜花, 韩禧卿, 等. 盐、碱胁迫对 4 份梯牧草苗期生物量及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(4): 1184–1193.
- [20] 石诗叠, 王华磊, 罗春丽, 等. NaCl 胁迫对滇黄精幼苗生长和生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(12): 54–60.
- [21] 官秀玲, 杨超, 梅梅, 等. 蒙古栎苗木质量调控的初步研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(2): 215–220.
- [22] 马斯琦, 刘万峰, 吕林, 等. 烟草中脱落酸的相关研究进展[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(1): 94–100.
- [23] 汤日圣, 黄益洪, 唐现洪, 等. 生物源脱落酸对盐胁迫下辣椒苗生长和某些生理指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 856–860.
- [24] 王亚丽. 外源 ABA 对盐胁迫下八棱海棠苗木生长及生理特性的影响[J]. 山西林业科技, 2024, 53(2): 25–28.
- [25] Kefu Z, Munns R, King R W. Abscisic acid levels in NaCl-treated Barley, Cotton and Saltbush[J]. Functional Plant Biology, 1991, 18(1): 17–24.
- [26] 高英, 伍柳芬, 刘昊, 等. 盐胁迫下 ABA 对樱桃幼苗光合及生理特性的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(3): 8–13.
- [27] 熊海琳, 田小霞, 毛培春, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下白三叶幼苗光合及生理特性的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(7): 1734–1745.
- [28] 王涛, 唐天娇, 廖佳元, 等. 外源 ABA 提高甘蓝型油菜抗镉胁迫能力和氮素生理利用效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 522–531.
- [29] 杨雯一. 不同胁迫对各种植物体内抗氧化酶系统的影响综述[J]. 化工管理, 2021(1): 92–93.
- [30] 刘沂欣, 隋晓青, 王鑫尧, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿的缓解作用[J]. 草业学报, 2025, 34(9): 206–214.

Effects of exogenous abscisic acid on the growth and physiological traits of *Atraphaxis bracteata* seedlings under salt stress

Liu Yuan¹, Chong Peifang¹, He Cai², Jin Min², Hu Fang², Zhang De¹

(1. Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China; 2. Wuwei Academy of Forestry, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: Salt stress has a significant inhibitory effect on plant growth and development, while an appropriate concentration of abscisic acid (ABA) can effectively alleviate the damage caused by salt stress. In this study, *Atraphaxis bracteata* seedlings were used as the experimental material, and a pot experiment was conducted to investigate the effects of applying different concentrations (2.5, 5, 7.5, 10, 15 mg·L⁻¹, with 0 as CK) of exogenous ABA on the growth and physiological responses of various organs of *A. bracteata* seedlings under 150 mmol·L⁻¹ NaCl stress. The goal was to identify the suitable concentration of ABA that can promote *A. bracteata* growth even under salt stress. The results showed that low-concentration abscisic acid alleviated salt stress damage by reducing malondialdehyde content. Under the 5 mg·L⁻¹ treatment, the malondialdehyde content in all organs of *A. bracteata* was the lowest, with a 38.46% decrease in roots, 34.78% in stems, and 26.25% in leaves compared to CK. In contrast, high-concentration abscisic acid treatment significantly increased soluble sugar and starch content. At 15 mg·L⁻¹, the soluble sugar content in roots increased by 61.19% compared to CK, while the levels in stems and leaves reached their highest. The starch content in roots increased by 36.01%, in stems by 48.61%, and in leaves by 51.48%. This indicates that low-concentration abscisic acid (2.5, 5 mg·L⁻¹) effectively mitigates salt stress damage in *A. bracteata*, whereas high-concentration abscisic acid (15 mg·L⁻¹) reduces its mitigating capacity and even inhibits seedling growth. Principal component analysis showed that malondialdehyde content, dry and fresh weight, proline content, starch content, and superoxide dismutase activity can serve as the main indicators for evaluating the alleviating effect of exogenous ABA on salt stress in *A. bracteata*. Using membership functions to perform a comprehensive evaluation of 10 indicators in three organs of the seedlings showed that a 5 mg·L⁻¹ exogenous ABA solution had the highest average membership degree in each organ, at 0.97, 0.93, and 0.73 respectively, indicating that this concentration of exogenous ABA had the strongest regulatory ability on salt tolerance in *A. bracteata*. These research results provide a theoretical basis for salt-tolerant cultivation of *A. bracteata* and have important implications for improving desert environments and promoting sustainable agricultural development.

Key words: *Atraphaxis bracteata*; abscisic acid; salt stress; physiological index; principal component analysis