

ABA 对紫花苜蓿幼苗抗苏打盐碱渗透调节 和氧化性损伤的影响*

李波¹, 刘骅峻¹, 林浩¹, 李红², 杨曌²

(1. 齐齐哈尔大学 生命科学与农林学院, 抗性基因工程与寒地生物多样性保护黑龙江省重点实验室,
黑龙江 齐齐哈尔市 161006; 2. 黑龙江省农业科学院 畜牧兽医分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘要:【目的】探究不同浓度ABA对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿幼苗生理效应的影响。【方法】以WL343HQ紫花苜蓿为试验材料,对其幼苗进行150 mmol/L苏打盐碱胁迫和不同浓度的ABA缓解处理,测定不同处理幼苗叶片的生理生化变化,采用隶属函数法对ABA缓解效应进行综合分析。【结果】苏打盐碱胁迫紫花苜蓿幼苗喷施ABA后,紫花苜蓿叶片的可溶性糖、甜菜碱、脯氨酸、可溶性蛋白含量以及POD、PAL、CAT、AXP活性均随着ABA浓度的增加呈现先增后降的趋势,4种渗透调节物质和4种抗氧化酶活性在ABA浓度为50或100 μmol/L时达最大值。【结论】通过隶属函数值综合分析,在ABA浓度为25~100 μmol/L时对苏打盐碱胁迫均有一定缓解作用,且在ABA浓度为50~75 μmol/L时对苏打盐害缓解效果最佳。

关键词:紫花苜蓿;脱落酸(ABA);苏打盐碱胁迫;渗透调节物质;抗氧化酶;隶属函数

中图分类号: S 541.103.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X(2019)04-0689-06

Effects of ABA on Soda Saline-alkali Osmotic Regulation and Oxidative Damage of Alfalfa Seedlings

LI Bo¹, LIU Huajun¹, LIN Hao¹, LI Hong², YANG Zhao²

(1. College of Agriculture, Forestry and Life Sciences, Qiqihar University, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of
Resistance Gene Engineering and Protection of Biodiversity in Cold Areas, Qiqihar 161006, China; 2. Institute of
Animal Husbandry and Veterinary of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161005, China)

Abstract:【Purpose】To explore the effects of different concentrations of ABA on the physiological
effects of alfalfa seedlings under soda saline-alkali stress.【Method】The seedlings cultured with
WL343HQ alfalfa seeds were treated with 150 mmol/L soda saline-alkali stress and ABA alleviation
at different concentrations. The physiological and biochemical changes of leaves of seedlings alleviated
by ABA were determined. The alleviation effect of ABA was comprehensively analyzed by
membership function method.【Result】After spraying ABA on alfalfa seedlings under saline-alkali
stress, the contents of soluble sugar, betaine, proline, soluble protein and the activities of POD, PAL,
CAT and AXP in alfalfa leaves increased firstly and then decreased with the increase of ABA concen-
tration. The four osmotic regulating substances and four antioxidant enzymes activities reached their
maximum at ABA concentration of 50 or 100 μmol/L.【Conclusion】According to the comprehens-

收稿日期: 2018-11-25 修回日期: 2019-06-10 网络首发时间: 2019-07-23 14:34:41

*基金项目: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135209267); 黑龙江省应用技术研究与开
发计划重大项目(GA15B105-5); 齐齐哈尔市科技计划一般项目(NYGG-201916)。

作者简介: 李波(1962—), 女, 辽宁鞍山人, 学士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事细胞生物学研
究。E-mail: libo1962@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20190723.1341.002.html>



ive analysis of membership function value, it could alleviate the soda saline-alkali stress when the concentration of ABA was 25-100 $\mu\text{mol/L}$. But when ABA concentration was 50-75 $\mu\text{mol/L}$ it has the best mitigation effect on soda salt damage.

Keywords: alfalfa; abscisic acid; soda saline-alkali stress; osmotic adjustment substance; antioxidant enzymes; membership function

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是多年生的豆科植物, 是一种优质牧草, 具有适应性强、产量高、营养丰富等特点。苜蓿在盐碱环境下对其产量和品质产生一定的影响^[1]。土壤盐化与碱化分别以盐度、pH 值升高为主要特点, 并非两种相同的非生物胁迫。盐碱胁迫会降低土壤渗透势、使离子失衡、打乱生理过程、抑制植物生长、降低作物的质量和产量^[2]。一般情况下, 当植物遭受盐碱胁迫时, 体内会产生大量的渗透调节物质, 并且抗氧化酶活性也会有所提高。研究植物对盐碱胁迫的生理响应特点, 提高植物生长能力和产量对改良和利用退化盐碱草地具有重要意义。植物激素是植物响应胁迫信号转导的主要成员, 其含量随着胁迫浓度变化而变化, 且外源植物激素可缓解非生物胁迫对植物的伤害^[3]。植物激素脱落酸在植物体内最显著的作用是调控植物生长发育和植物对非生物胁迫应答中的反应, 在面对非生物逆境胁迫例如盐碱胁迫、低温胁迫时会对植物的生长发育造成一定影响, 使得植物生长发育进程正常进行^[4]。有研究表明: 外源 ABA 可通过改善光合作用的方式增加受 NaCl 胁迫的甘薯幼苗的耐盐性^[5]。赵许朋等^[6]的研究表明: ABA 可以明显缓解受 NaCl 胁迫的番茄幼苗的氧化损伤。因此, 培育耐盐碱品种的植物, 提高植物的耐盐碱能力是缓解盐碱地对植物影响的一个有效生物措施, 同时还可以产生较好的生态和经济效益, 促进农业的可持续发展。本试验采用苏打盐碱胁迫紫花苜蓿幼苗, 对盐碱胁迫后紫花苜蓿幼苗施加不同浓度的 ABA, 从抗氧化酶活性、渗透调节物质含量的变化进行探讨, 以期为外源物质 ABA 在缓解盐碱抗性提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以黑龙江畜牧研究所提供的 WL343HQ 紫花苜蓿种子为材料。

1.2 方法

1.2.1 紫花苜蓿幼苗的培养和苏打盐碱胁迫

选取 WL343HQ 紫花苜蓿种子, 播种于装有 2/3 营养土的花盆中(高 14 cm, 直径 27 cm), 每盆播种 30 粒种子, 出苗后进行间苗, 使每盆中留下 10 株幼苗。待幼苗培养至 15~20 cm 时进行 150 mmol/L 苏打盐碱溶液 (NaHCO_3 和 Na_2CO_3 摩尔质量比为 9 : 1) 胁迫, 每盆紫花苜蓿幼苗于晚 6 点浇灌 500 mL 苏打盐碱溶液, 每 72 h 补充苏打盐碱溶液 1 次, 共做 3 组平行处理。

1.2.2 ABA 对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿幼苗的缓解

对采用苏打盐碱胁迫 1 周后的紫花苜蓿幼苗进行缓解处理, 共设置 4 个浓度梯度, 分别为 25、50、75 和 100 $\mu\text{mol/L}$, 于晚 6 点进行叶面喷施, 喷施以叶面均匀布满水膜为准, 对照组用清水喷施, 每 3 d 喷施 1 次, 用量为 200 mL, 共处理 2 次, 在处理后的第 6 天采集紫花苜蓿叶片, 于超低温冰箱保存。

1.2.3 生理生化指标测定方法

取紫花苜蓿幼苗的叶片, 进行各项生理生化指标的测定。甜菜碱含量采用雷氏盐光谱法^[7], 可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[8], 脯氨酸含量采用酸性茚三酮法^[8], 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法^[8], 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法^[8], 苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性和过氧化氢酶活性 (POD) 采用紫外分光光度法^[8]。各指标值均为 3 次平均值。

1.2.4 数据的分析处理

利用 Excel 2010 对数据进行整理, 采用 SPSS 17.0 中单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对紫花苜蓿生理特征指标进行差异显著性检验。

隶属函数值计算公式^[9]:

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

反隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为指标测定值, X_{\min} 和 X_{\max} 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 外源ABA对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片渗透调节物质的影响

2.1.1 可溶性糖含量的变化

经过不同浓度ABA缓解处理,苏打盐碱胁迫后紫花苜蓿叶片中可溶性糖含量变化见表1。随着ABA浓度的增加,可溶性糖含量呈现先增后降的趋势。ABA浓度在25和100μmol/L时叶片中可溶性糖含量与对照组差异不显著($P>0.05$),ABA浓度在50和75μmol/L时叶片中可溶性糖含量高于对照组($P<0.05$),分别比对照增加了36.64%和23.21%,ABA浓度为50μmol/L时叶片可溶性糖含量最高,100μmol/L时叶片可溶性糖含量最低。一定ABA浓度可缓解盐害胁迫对可溶性糖合成的抑制作用,50和75μmol/L的ABA可以增加紫花苜蓿叶片在苏打盐碱胁迫下可溶性糖含量的积累。

2.1.2 脯氨酸含量的变化

经过不同浓度的ABA缓解处理,苏打盐碱胁迫后苜蓿叶片中脯氨酸含量变化见表1。随着ABA浓度的增加,叶片脯氨酸含量呈现先增后降的趋势。在ABA浓度为25~100μmol/L时,紫花苜蓿叶片脯氨酸含量均高于对照组($P<0.05$),分别比对照增加了169.06%、234.50%、285.74%和227.98%。与对照相比,喷洒不同浓度ABA对脯氨酸含量的积累都起到了促进作用,其中ABA浓度为75μmol/L时对苏打盐碱胁迫下苜蓿叶片中脯氨酸含量积累效果最佳。

2.1.3 可溶性蛋白含量的变化

经过不同浓度ABA缓解处理,苏打盐碱胁迫后紫花苜蓿叶片中可溶性蛋白的含量变化见表1。随着ABA浓度的增加,叶片可溶性蛋白含

量呈现先增后降的趋势。在ABA浓度为25μmol/L时,紫花苜蓿叶片可溶性蛋白含量略高于对照组,但差异不显著,在ABA浓度为50~100μmol/L时,紫花苜蓿叶片可溶性蛋白含量显著高于对照组,分别比对照增加了75.00%、192.50%和95.00%,ABA浓度为75μmol/L时叶片可溶性蛋白含量增加的幅度最大,说明ABA能缓解苏打盐碱胁迫对可溶性蛋白合成的抑制作用,除ABA浓度为25μmol/L时其可溶性蛋白含量与对照差异不显著外,其他ABA浓度下紫花苜蓿叶片可溶性蛋白含量均与对照比较差异显著($P<0.05$),ABA浓度为75μmol/L时对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片可溶性蛋白含量积累效果最为显著。

2.1.4 甜菜碱含量的变化

在苏打盐碱胁迫下,经过不同浓度的ABA缓解处理后紫花苜蓿叶片中甜菜碱含量变化见表1。随着ABA浓度的增加,叶片甜菜碱含量呈现先增后降的趋势,在ABA浓度为25μmol/L时,叶片甜菜碱含量与对照组差异不显著($P>0.05$),在ABA浓度为50、75和100μmol/L时,叶片甜菜碱含量均高于对照组($P<0.05$),分别比对照增加了157.42%、122.85%和42.34%。ABA浓度为50和100μmol/L时其甜菜碱含量增加的幅度比较大,说明一定ABA浓度能有效缓解苏打盐碱胁迫对甜菜碱合成的抑制作用,50~100μmol/LABA可促进紫花苜蓿叶片中甜菜碱含量的大量积累。

2.2 外源ABA对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片抗氧化酶活性的影响

2.2.1 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的变化

在苏打盐碱胁迫下,经不同浓度ABA缓解处理后紫花苜蓿叶片APX活性变化见表2。随

表1 ABA对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片4种渗透调节物质的影响

Tab. 1 Effects of ABA on four osmotic regulating substances in alfalfa leaves under soda saline-alkali stress

c(ABA)/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	w(可溶性糖)/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble sugar	w(脯氨酸)/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) proline	w(可溶性蛋白)/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble protein	w(甜菜碱)/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) betaaine
0	446.01±27.13 c	30.09±4.12 d	0.40±0.03 c	8.36±1.03 d
25	425.22±15.09 c	80.96±6.73 c	0.43±0.03 c	8.14±0.45 d
50	609.41±27.69 a	100.65±1.74 b	0.70±0.05 b	21.52±0.22 a
75	549.51±10.66 b	116.07±2.68 a	1.17±0.04 a	18.63±0.45 b
100	407.70±32.41 c	98.69±1.92 b	0.78±0.06 b	11.90±1.27 c

注:同列中不同字母表示差异显著($P<0.05$);下同。

Note: The different letters are significantly different between different treatments within the same varieties in the same list ($P<0.05$); the same as below.

着ABA浓度增加APX活性呈现先升后降的趋势。在ABA浓度为25和100 μmol/L时,叶片APX活性与对照组差异不显著($P>0.05$);一定浓度ABA能促进苏打盐碱胁迫下APX活性增加,在ABA浓度为50 μmol/L时叶片APX活性最高,ABA浓度为50和75 μmol/L的叶片APX活性与对照比较差异显著($P<0.05$),分别比对照增加了101.76%和38.61%,该浓度ABA可显著促进苏打盐碱胁迫紫花苜蓿叶片APX活性增加。

2.2.2 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的变化

在苏打盐碱胁迫下,经不同浓度ABA缓解处理后紫花苜蓿叶片PAL活性变化见表2。随着ABA浓度的增加PAL活性呈现先升高后下降的趋势。在ABA浓度为25和100 μmol/L时,叶片PAL活性与对照组差异不显著($P>0.05$);一定浓度ABA能促进苏打盐碱胁迫下PAL活性增加,在ABA浓度为50 μmol/L时叶片PAL活性最高,ABA浓度为50和75 μmol/L的叶片PAL活性与对照比较差异显著($P<0.05$),分别比对照增加了47.86%和33.07%,该浓度ABA可显著促进苏打盐碱胁迫紫花苜蓿叶片PAL活性增加。

2.2.3 过氧化物酶(POD)活性的变化

在苏打盐碱胁迫下,经不同浓度ABA缓解处理后紫花苜蓿叶片POD活性变化见表2。随

着ABA浓度的增加POD活性呈现先升后降的趋势。在ABA浓度为25~100 μmol/L时,叶片POD活性高于对照组,分别比对照增加了1.40%、95.25、117.88和105.31%。ABA浓度为50~100 μmol/L时POD活性增加幅度比较大,在ABA浓度为75 μmol/L时叶片POD活性最高。除25 μmol/LABA浓度的POD活性外,其他浓度的叶片POD活性与对照比较差异显著($P<0.05$),50~100 μmol/LABA可显著促进苏打盐碱胁迫紫花苜蓿叶片POD活性增加($P<0.05$)。

2.2.4 过氧化氢酶(CAT)活性的变化

在苏打盐碱胁迫下,经不同浓度ABA缓解处理后紫花苜蓿叶片CAT活性变化见表2,随着ABA浓度的增加CAT活性呈现先升后降的趋势。在ABA浓度为25和50 μmol/L时,叶片CAT活性低于对照组,比对照降低了33.34%和5.12%。在ABA浓度为75和100 μmol/L时,叶片CAT活性均高于对照组,分别比对照增加了135.89%和15.38%。一定浓度ABA能促进苏打盐碱胁迫下CAT活性增加,在ABA浓度为75 μmol/L时叶片CAT活性最高,除50 μmol/LABA浓度的CAT活性外,其他浓度的叶片CAT活性与对照比较差异显著($P<0.05$),75 μmol/LABA可显著促进苏打盐碱胁迫紫花苜蓿叶片CAT活性增加。

表2 ABA对苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片4种抗氧化酶活性(鲜重)影响

Tab. 2 Effects of ABA on four antioxidant enzymes activities in alfalfa leaves (fresh weight) under soda saline-alkali stress

c(ABA)/ (μmol·L ⁻¹)	APX 活性/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) ascorbic acid peroxidase activity	PAL 活性/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹) phenylalanine ammonia lyase activity	CAT 活性/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) catalase activity	POD 活性/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) peroxidase activity
0	38.00±3.46 c	6 346.67±331.82 c	65.00±2.50 c	298.33±31.85 c
25	36.00±4.00 c	6 250.67±97.76 c	43.33±3.82 d	302.50±36.83 c
50	76.67±3.06 a	9 384.00±109.98 a	61.67±2.89 c	582.50±12.50 b
75	52.67±4.16 b	8 445.33±146.72 b	153.33±10.10 a	650.00±27.04 a
100	41.00±7.81 c	6 533.33±172.76 c	75.00±2.50 b	612.50±10.90 ab

2.3 ABA缓解苏打盐害综合分析

将不同浓度ABA处理苏打盐碱胁迫下紫花苜蓿叶片的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、甜菜碱、APX、PAL、CAT和POD 8项生理生化指标的数据代入隶属函数公式计算其隶属值,8项生理生化指标的隶属值见表3,隶属函数综合评价值越大,表明ABA对紫花苜蓿幼苗

苏打盐碱胁迫缓解能力越强,根据隶属函数平均值的大小,不同浓度ABA对苏打盐碱胁迫的紫花苜蓿叶片生理生化指标影响的综合排序依次为75 μmol/L>50 μmol/L>100 μmol/L>25 μmol/L>0 μmol/L。由此可见,50~75 μmol/LABA浓度对紫花苜蓿幼苗苏打盐碱胁迫的缓解作用比较强。

表 3 8 项指标的隶属函数值
Tab. 3 The membership function value of 8 indexes

$c(\text{ABA})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	甜菜碱 betaine	可溶性糖 soluble sugar	脯氨酸 proline	可溶性蛋白 soluble protein	APX	PAL	CAT	POD	平均隶属值 average membership value
0	0.016	0.190	0.000	0.001	0.048	0.031	0.197	0.000	0.060
25	0.000	0.087	0.592	0.043	0.000	0.000	0.000	0.012	0.092
50	1.000	1.000	0.821	0.387	0.976	1.000	0.167	0.808	0.770
75	0.784	0.703	1.000	0.999	0.400	0.706	1.000	1.000	0.824
100	0.281	0.000	0.798	0.498	0.120	0.091	0.288	0.893	0.371

3 讨论

3.1 ABA 缓解紫花苜蓿幼苗苏打盐碱胁迫对渗透调节物质的影响

在植物生长发育过程中, 维持正常的渗透调节能力是植物保持良好状态所必不可少的, 当植物处于盐碱胁迫时, 对植物的影响主要表现在渗透胁迫, 植物体内的生命活动会不同程度地受到盐胁迫的影响, 植物对盐分胁迫的反应和适应是一个复杂的生理过程, 是植物体内一系列生理生化过程综合作用的结果^[10-12]。盐碱胁迫植物体内游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白和甜菜碱作为渗透保护物质^[13-14], 对植物的渗透调节起重要作用, 高水平的脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白和甜菜碱有利于植物在逆境下维持细胞的结构和功能, 同时对生物大分子的结构和功能起到稳定和保护作用。本研究结果表明: 通过叶面喷施 ABA 能有效提高盐碱胁迫期间紫花苜蓿幼苗叶片中渗透保护物质可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白和甜菜碱的含量, 特别是在 50~75 $\mu\text{mol}/\text{L}$ ABA 浓度范围内能有效促进盐碱胁迫下紫花苜蓿幼苗叶片中的脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白和甜菜碱含量大幅度增加。李彩霞等^[15]在盐胁迫下外源激素对苦瓜幼苗抗逆性的影响的研究发现: 喷施外源激素 (ABA、SA 和 GA₃) 提高了苦瓜幼苗的渗透调节能力 (可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量), 这与本试验有相似结论, 但他们的研究选择的 ABA 浓度过低 (0.05 $\mu\text{mol}/\text{L}$)。ABA 可缓解苏打盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗的危害, 能明显增加盐胁迫对紫花苜蓿幼苗的渗透调节能力, 提高植株抗盐害能力, 这是 ABA 有效提高紫花苜蓿幼苗的耐盐碱能力、减轻盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗伤害的生理基础。

3.2 ABA 缓解紫花苜蓿幼苗苏打盐害对抗氧化酶活性的影响

干旱、盐碱等逆境环境因子影响植物体内活性氧代谢系统的平衡, 致使活性氧清除剂活性降低, 促使细胞内自由基形成, 引起植物细胞膜脂质过氧化作用的加强, 破坏膜的结构与功能, 对植物造成的伤害与死亡^[16-17]。APX、PAL、CAT 和 POD 作为保护酶系在清除活性氧、缓解细胞膜伤害方面发挥着重要作用, 有利于还原和清除损伤膜和酶分子结构的自由基, 抵抗活性氧的毒害^[18-19]。本研究结果表明: ABA 能有效提高盐碱胁迫下紫花苜蓿苗叶片中的 APX、PAL、CAT 和 POD 活性, 特别是在 50~75 $\mu\text{mol}/\text{L}$ ABA 浓度范围内能有效促进盐碱胁迫下紫花苜蓿幼苗叶片中的 APX、PAL、CAT 和 POD 酶活性维持较高水平。这与刘丹等^[20]研究外源 ABA 对连作障碍下桔梗抗氧化酶系的影响, 发现超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (POD)、过氧化物酶 (CAT)、多酚氧化酶 (PPO)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性总体随外源 ABA 浓度的升高而呈现先增强后减弱趋势的结果一致, 只是 ABA 的处理浓度和方法存在差异。ABA 可缓解苏打盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗的危害, 可通过启动不同的抗氧化酶系, 这是 ABA 有效提高紫花苜蓿幼苗的耐盐能力、减轻盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗伤害的生化基础。

综上所述, 紫花苜蓿幼苗在 150 mmol/L 苏打盐碱胁迫下, 在施加外源 ABA 后, 紫花苜蓿幼苗叶片通过自身积累大量渗透调节物质 (可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白和甜菜碱) 和抗氧化酶活性 (APX、PAL、CAT 和 POD 酶活性) 来调节生理代谢功能, 以缓解苏打盐害, 在 50~75 $\mu\text{mol}/\text{L}$ ABA 浓度对紫花苜蓿幼苗苏打盐碱胁迫

的缓解作用比较强。

[参考文献]

- [1] 李波,于海龙. 苏打盐碱胁迫下不同来源苜蓿品种抗盐性综合评价[J]. 草地学报, 2017, 25(1): 204. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2017.01.031](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2017.01.031).
- [2] 王俊珍, 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. DOI: [10.5846/stxb201605160941](https://doi.org/10.5846/stxb201605160941).
- [3] 李晓宇, 穆春生. 盐碱胁迫及外源植物激素对小麦和羊草生长发育的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 257. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2017.02.005](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2017.02.005).
- [4] 吴楠, 聂丹丹, 陈亮, 等. 外源脱落酸在水稻盐碱胁迫作用中的进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(1): 275. DOI: [10.13271/j.mpb.016.000275](https://doi.org/10.13271/j.mpb.016.000275).
- [5] 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. DOI: [10.11674/zwyf.14137](https://doi.org/10.11674/zwyf.14137).
- [6] 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): 14833. DOI: [10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.27.005](https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.27.005).
- [7] 郭培国, 宋波龙, 许兰桂, 等. 光谱法测定植物组织中甜菜碱含量方法的改良[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2011, 10(3): 32. DOI: [10.3969/j.issn.1671-4229.2011.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4229.2011.03.006).
- [8] 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.
- [9] 王谧, 王芳, 王舰. 应用隶属函数法对马铃薯进行抗旱性综合评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2014, 29(4): 476. DOI: [10.3969/j.issn.1004-390X\(n\).2014.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-390X(n).2014.04.002).
- [10] 龚雪欢, 宁欢欢, 刘光照, 等. 外源 SA 对盐胁迫下颠茄生理生化、氮代谢及次生代谢的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(11): 147. DOI: [10.11686/cyxb2017043](https://doi.org/10.11686/cyxb2017043).
- [11] 张丽, 贾志国, 刘雪霞, 等. 外源物质对干旱胁迫下麻黄种子萌发及生理特性的影响[J]. 中药材, 2016, 39(11): 2450. DOI: [10.13863/j.issn1001-4454.2016.11.005](https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2016.11.005).
- [12] 李小玲, 华智锐. 外源脱落酸对盐胁迫下商洛黄芩生理特性的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(7): 36. DOI: [10.19386/j.cnki.jxnyxb.2017.07.08](https://doi.org/10.19386/j.cnki.jxnyxb.2017.07.08).
- [13] 赵小强, 彭云玲, 方鹏, 等. 不同外源调节物质对低温胁迫下玉米的缓解效应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 184. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2018.03.28](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2018.03.28).
- [14] 陈贵华, 石岭, 王萍, 等. 外源过氧化氢对苦菜耐盐生理作用的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 8. DOI: [10.16853/j.cnki.1009-3575.2017.06.002](https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2017.06.002).
- [15] 李彩霞, 郑冬梅, 林碧英, 等. 盐胁迫下外源激素对苦瓜幼苗抗逆性的影响[J]. 亚热带农业研究, 2017, 13(3): 171. DOI: [10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2017.03.006](https://doi.org/10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2017.03.006).
- [16] 何文平, 王新霞, 张旭强, 等. 低温胁迫下外源脱落酸对高山离子芥抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 植物研究, 2016, 36(6): 870.
- [17] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 外源过氧化氢提高燕麦耐盐性的生理机制[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 216. DOI: [10.11686/cyxb2015128](https://doi.org/10.11686/cyxb2015128).
- [18] 颜宏, 石德成, 尹尚军, 等. 外施 Ca^{2+} 、ABA 及 H_3PO_4 对盐碱胁迫的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 889. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2000.0212](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2000.0212).
- [19] 陈展宇, 常雨婷, 邓川, 等. 盐碱生境对甜高粱幼苗抗氧化酶活性和生物量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(1): 15. DOI: [10.13327/j.jjlau.2016.2841](https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2016.2841).
- [20] 刘丹, 吴玉环, 沈洋, 等. 外源脱落酸对连作障碍下桔梗抗氧化酶系的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1989. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.12.010](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.12.010).

责任编辑: 何承刚