

DOI:10.11686/cyxb2025022

<http://cyxb.magtech.com.cn>

田戈, 南丽丽, 王利群, 等. 盐胁迫下外源ABA对红豆草幼苗生长与生理特性的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 95—106.

TIAN Ge, NAN Li-li, WANG Li-qun, *et al.* Effects of exogenous ABA on growth and physiological characteristics of sainfoin seedlings under NaCl stress. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 95—106.

盐胁迫下外源 ABA 对红豆草幼苗生长与生理特性的影响

田戈, 南丽丽*, 王利群, 马香香, 何蓉, 郭佳雨

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 土壤盐渍化是限制植物营养吸收和生长发育的重要因素。红豆草是我国盐碱地区的乡土草种, 外源脱落酸(ABA)在提高植物抗逆性方面起着积极的调控作用。为探究外源ABA对盐胁迫下红豆草幼苗生长和生理特性的影响, 本试验采用营养液砂培法, 在0.8% NaCl处理下, 对耐盐(‘GH’、‘GN’、‘1994’)和敏盐(‘10295’、‘2323-2’、‘2668’)红豆草幼苗叶面喷施不同浓度的ABA, 即设置1个对照组CK和4个处理组: 0.8% NaCl(T₁)、0.8% NaCl+0.1 mmol·L⁻¹ ABA(T₂)、0.8% NaCl+0.2 mmol·L⁻¹ ABA(T₃)、0.8% NaCl+0.3 mmol·L⁻¹ ABA(T₄), 筛选出缓解盐胁迫的最佳ABA缓释浓度。结果表明: ABA对盐胁迫有缓解效应, 能显著提高盐胁迫下红豆草幼苗的株高、叶面积、地上生物量、地下生物量、叶片相对含水量、根系活力、K⁺含量、叶片与根系赤霉素和玉米素及叶片生长素(IAA)含量, 耐盐材料‘GH’的变化较显著, 相较于0.8% NaCl处理, T₃处理下其株高、叶面积、地上生物量、地下生物量、叶片相对含水量、根系活力、K⁺含量、叶片与根系赤霉素和玉米素及叶片生长素(IAA)含量分别上升了20.48%、4.63%、26.75%、56.66%、28.19%、65.41%、24.36%、47.55%、36.05%、24.39%、80.53%和19.20%; 能降低丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、Na⁺含量、Ca²⁺含量、叶片与根系ABA及根系IAA含量, 敏盐材料‘10295’变化较不明显, 相较于0.8% NaCl处理, T₃处理下其丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、Na⁺含量、Ca²⁺含量、叶片与根系ABA及根系IAA含量分别下降了14.91%、18.64%、26.15%、10.08%、24.47%、30.24%、8.72%、27.64%和30.87%。研究表明外源ABA可以减弱盐胁迫对细胞的氧化损伤, 维持细胞膜系统的完整性和细胞渗透压, 并以0.2 mmol·L⁻¹ ABA效果最佳, 且耐盐材料对ABA的响应比敏盐材料更显著。

关键词: 红豆草; 盐胁迫; 脱落酸; 内源激素

Effects of exogenous ABA on growth and physiological characteristics of sainfoin seedlings under NaCl stress

TIAN Ge, NAN Li-li*, WANG Li-qun, MA Xiang-xiang, HE Rong, GUO Jia-yu

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Key Laboratory of Forage Germplasm Innovation and New Variety Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou 730070, China

Abstract: Soil salinization is a significant factor that limits plant nutrient uptake and affects plant growth and development. Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) is a native fabaceae species in saline-alkali regions of China, and

收稿日期: 2025-01-20; 改回日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(32360339)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助。

作者简介: 田戈(1999—), 女, 山东聊城人, 在读硕士。E-mail: 1934224372@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nanll@gsau.edu.cn

exogenous abscisic acid (ABA) plays a positive regulatory role in enhancing plant stress resistance. This study investigates the effects of exogenous ABA on the growth and physiological characteristics of sainfoin seedlings subjected to salt stress. Using a nutrient solution sand culture method, various concentrations of ABA were sprayed on the leaves of both salt-tolerant ('GH', 'GN', '1994') and salt-sensitive ('10295', '2323-2', '2668') sainfoin seedlings under a 0.8% NaCl treatment. Specifically, one control group (CK) and four treatment groups were established: 0.8% NaCl (T_1), 0.8% NaCl+0.1 mmol·L⁻¹ ABA (T_2), 0.8% NaCl+0.2 mmol·L⁻¹ ABA (T_3) and 0.8% NaCl+0.3 mmol·L⁻¹ ABA (T_4). The optimal concentration of ABA for alleviating salt stress was identified. The results indicate that ABA has a mitigating effect on salt stress. That plant height, leaf area, aboveground biomass, underground biomass, relative leaf water contents, root activity, K⁺ contents, gibberellin contents in leaves and roots, zeatin contents in leaves and roots and auxin (IAA) contents in leaves decreased with increasing salt stress. The changes in the salt-tolerant material 'GH' were quite significant. The plant height increased by 20.48%, while the leaf area increased by 4.63%; Additionally, the aboveground biomass saw an increase of 26.75%, and the underground biomass increased significantly by 56.66%; The relative leaf water content rose by 28.19%, and root activity experienced a substantial increase of 65.41%. Furthermore, K⁺ content increased by 24.36%, leaf gibberellin content rose by 47.55%, and root gibberellin content increased by 36.05%; The leaf zeatin content increased by 24.39%, while leaf zeatin saw a notable rise of 80.53%, and leaf IAA content increased by 19.20%, respectively, in 0.8% NaCl, compared to control. Additionally, malonaldehyde contents, superoxide dismutase activity, peroxidase activity, catalase activity, Na⁺ contents, Ca²⁺ contents, ABA contents in leaves and roots and IAA contents in roots were reduced in response to salt. The changes in the salt-sensitive material '10295' were relatively insignificant, with malonaldehyde contents, superoxide dismutase activity, peroxidase activity, catalase activity, Na⁺ contents, Ca²⁺ contents, ABA contents in leaves, ABA contents in roots and IAA contents in roots increasing by 14.91%, 18.64%, 26.15%, 10.08%, 24.47%, 30.24%, 8.72%, 27.64%, and 30.87%, respectively, in 0.8% NaCl stress. These results indicate that exogenous ABA can mitigate oxidative damage to cells caused by salt stress, maintaining the integrity of the cell membrane system and cell osmotic pressure. In this study, 0.2 mmol·L⁻¹ ABA demonstrated the most effective results, with a more pronounced response observed in salt-tolerant materials compared to salt-sensitive materials.

Key words: sainfoin; salt stress; abscisic acid; endogenous hormones

盐分胁迫是影响植物生长和生产的主要非生物因子之一^[1]。我国盐渍化土地面积约为 3.67×10^7 hm²,主要分布在新疆、青海和甘肃等西北地区,对农业生产和生态环境的可持续发展构成了威胁^[2-4]。红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)作为多年生豆科牧草,享有“牧草皇后”之美誉,具有适口性好、抗性强、营养丰富等优点,除作为青饲料外,还可调制为青干草、草颗粒等草产品,是牛、羊、马等家畜的优良饲料;根系发达、根瘤多,具有水土保持和改善土壤肥力等作用^[5]。以往研究表明,盐胁迫下植物的生长发育会受到显著影响,导致生物量减少、根系发育不良和叶片生理功能受损^[6],盐胁迫会造成活性氧积累,对细胞膜系统和蛋白质等生物大分子造成损伤^[7],盐胁迫还会破坏细胞内的离子稳态,如Na⁺和K⁺的失衡,影响细胞的生理功能^[8]。盐胁迫显著影响植物内源激素的合成、运输和代谢调节,如生长素(auxin, IAA)和赤霉素(gibberellin, GA₃)的合成和运输受到抑制,从而干扰细胞的分裂和生长^[9]。因此,寻找缓解盐分胁迫对植物生长与生理影响的技术方法,培育耐盐新品种,是提高盐渍化土地作物产量和改良盐碱地的有效途径^[10]。

脱落酸(abscisic acid, ABA)是一种重要的植物激素,在植物应对环境胁迫中发挥着关键作用^[11]。已有研究表明,外源ABA能够缓解干旱、低温等逆境胁迫对植物生长发育的影响,其机制包括调节光合生理、诱导基因表达、促进渗透调节物质积累和提高保护酶活性等^[12]。外源ABA能够促进逆境胁迫下植物体内ABA的合成,以此

调控气孔,降低水分散失,增强植物抗逆性^[13];适宜浓度的 ABA 能促进植物对内源激素含量及其相互作用的调节,提高楸树(*Catalpa bungei*)幼苗的耐盐性^[14]。可见,对于外源 ABA 的研究多集中于调节抗氧化酶活性和缓解干旱胁迫等方面,针对红豆草的研究多集中于农艺性状和种质筛选等方面^[12,15],有关盐胁迫下外源 ABA 对红豆草幼苗生长及生理特性缓解效应的研究少见报道。

本研究以 6 份红豆草为材料,探究不同浓度外源 ABA 对红豆草生长和生理特性的影响,筛选出缓解红豆草盐胁迫的最适 ABA 浓度,为提高红豆草在盐碱地区的种植面积、产量及品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试红豆草共 6 份(表 1),为前期筛选出的耐盐材料‘1994’、‘甘航’红豆草(*O. viciaefolia* ‘Ganhang’,GH)和‘甘农 1 号’红豆草(*O. viciaefolia* ‘Gannong No. 1’,GN);敏盐材料为‘10295’、‘2323-2’和‘2668’,其中材料‘1994’、‘10295’、‘2323-2’和‘2668’由中国农业科学院北京畜牧兽医研究所从俄罗斯瓦维洛夫植物基因库引进, GH 为航天诱变材料,GN 为甘肃农业大学选育的新品系,其种子均由甘肃农业大学草业学院提供,均于 2022 年 7 月收获于甘肃省武威市黄羊镇牧草站。

表 1 供试红豆草种质及来源

Table 1 Germplasm resources and origins of tested sainfoin

材料 Material	来源地 Origin	种质 Germplasm resource	千粒重 1000-seed weight (g)
1994	俄罗斯 Russia	野生材料 Wild material	20.23±0.53
GH	甘肃 Gansu Province	航天诱变 Space flight	22.36±0.81
GN	甘肃 Gansu Province	新品系 New strain	21.29±0.69
10295	俄罗斯 Russia	野生材料 Wild material	20.78±0.92
2323-2	俄罗斯 Russia	野生材料 Wild material	23.63±0.39
2668	俄罗斯 Russia	野生材料 Wild material	21.92±0.56

1.2 试验设计

试验于 2024 年 3 月在甘肃农业大学草业学院植物生长室进行,以仅浇灌 Hoagland 营养液的幼苗为对照组(CK),以浇灌含 0.8% NaCl 的 Hoagland 营养液的幼苗为处理组(T₁)^[7],2 d 后对盐胁迫处理组进行 ABA 缓释处理,共设置 3 个 ABA 处理浓度,分别为 0.8% NaCl+0.1 mmol·L⁻¹ ABA(T₂)、0.8% NaCl+0.2 mmol·L⁻¹ ABA(T₃)、0.8% NaCl+0.3 mmol·L⁻¹ ABA(T₄),ABA 以叶面喷施的方式每隔 2 d 喷施 1 次,CK 和 T₁ 喷施等量清水,每个处理 3 次重复。种植采用营养液砂培法,将 500 g 细沙经 121 °C 高温灭菌 30 min 后装入塑料花盆中(外口径、内口径、高和底径分别为 13.2、12.0、14.0 和 9.2 cm)中,将经 75% 无水乙醇消毒的红豆草种子均匀撒播于花盆,覆沙 3~4 cm 后,每隔 2 d 浇灌 60 mL Hoagland 营养液,出苗后间苗,每盆保留生长和分布均匀的幼苗 15 株。待其生长至 35 d 时,按照上述试验设计处理 6 d 后采集红豆草幼苗叶片和根系进行相关指标测定,每个指标 3 次重复。

1.3 测定方法

1.3.1 形态指标 株高采用卷尺测量植株的绝对高度,求均值;叶面积采用叶面积仪(LI-3000C,北京力高泰科技)扫描测定,选取从顶端向下数第 3 个叶片的植株;分离地上部和地下部,取 10 株植株并于 70 °C 烘干至恒重,分别测定地上生物量(aboveground biomass,AGB)和地下生物量(underground biomass,UGB)。

1.3.2 生理指标 生理指标参考邹琦^[16]的方法测定。用 2, 3, 5-氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力,以单位时间(h)内单位根系组织(g)还原生成的 TTF(TTC 还原产物)的量(μg)表示;叶片相对含水量(RWC)采用饱和称重法测定,称量鲜重(FW)后的幼苗在蒸馏水中浸泡 24 h,测定饱和鲜重(SW),后于 70 °C 烘干至恒重后,测定其干物质质量(DM),计算公式为:RWC(%)=(FW - DM)/(SW - DM)× 100;丙二醛(malonaldehyde,MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定,磨匀样品后加入 5% 三氯乙酸(TCA),离心后取上清液加

入硫代巴比妥酸(TBA),在100℃沸水浴中反应,冷却后取上清液分别于450、532、600 nm处测定吸光度,以单位质量(g)样品中丙二醛的含量(μmol)表示。

过氧化物酶(peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定,将样品提取液加入反应体系(含愈创木酚和 H_2O_2),在470 nm波长下测定吸光度的变化,计算POD活性,以单位质量(g)的样品在单位时间内(min)消耗的底物量或生成的产物量(以酶活力单位U计)表示;过氧化氢酶(catalase, CAT)活性采用高锰酸钾滴定法测定,将样品提取液与 H_2O_2 反应后,加入 H_2SO_4 终止反应,用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4$ 标准溶液滴定,通过消耗的 KMnO_4 量计算CAT活性,以每g样品每min分解 H_2O_2 的量(mg)表示;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定,将样品提取液加入反应体系(包含NBT、核黄素等),在560 nm波长达到50%抑制NBT还原所需的酶量被定义为SOD的一个单位,以每g样品每min抑制NBT还原的酶活性单位(U)表示; K^+ 、 Na^+ 含量采用火焰光度计法^[17]测定,将样品提取液通过火焰光度计(F300,上海元析仪器)测定其特征光谱强度,通过标准曲线计算 K^+ 和 Na^+ 的浓度,以每kg样品中 K^+ 和 Na^+ 的含量(g)表示; Ca^{2+} 含量采用乙二胺四乙酸二钠(EDTA-Na_2)络合滴定法^[18]测定,将样品提取液用乙二胺四乙酸(EDTA)标准液滴定,通过消耗EDTA的量计算 Ca^{2+} 的浓度,以每kg样品中 Ca^{2+} 的含量(g)表示;内源激素IAA、 GA_3 、ABA和玉米素(zeatin, ZT)含量采用高效液相色谱法^[19]测定,研碎冻样,浸提后取上清液浓缩近干,于四元梯度超快速液相色谱仪(Waters Arc-2998 PDA Waters,美国沃特世公司)测定目标激素的峰面积,结合标准曲线计算其含量,以每g样品中IAA、 GA_3 、ABA和ZT的含量(ng)表示。

1.4 数据统计分析

利用Microsoft Excel 2021软件整理数据并绘制表格,利用SPSS 27.0(IBM,美国)软件对各项指标进行Duncan多重比较($P<0.05$),利用OriginPro 2024软件绘图。

2 结果与分析

2.1 形态指标

与CK相比,盐胁迫条件(T_1)下,供试红豆草的株高、叶面积、AGB和UGB均下降($P<0.05$,图1)。施加外源ABA后,随着ABA浓度增加,株高、叶面积、AGB和UGB均先上升后下降,且在 T_3 处理达到最高值($P<0.05$)。

与 T_1 相比, T_3 处理下,材料‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’的株高、叶面积、AGB和UGB分别增加了20.48%、4.63%、26.75%和56.66%,21.69%、23.74%、37.46%和49.85%,22.35%、22.48%、26.73%和58.40%,19.42%、7.62%、25.97%和25.69%,17.68%、5.74%、73.85%和41.60%,18.87%、14.84%、57.85%和40.91%,但均低于CK($P<0.05$)。与 T_1 相比,耐盐材料‘GH’、‘GN’、‘1994’的UGB在 T_3 处理下增幅显著大于敏盐材料‘2323-2’($P<0.05$)。

2.2 MDA含量、抗氧化酶活性、叶片相对含水量及根系活力

盐胁迫条件下(T_1),供试红豆草的MDA含量、SOD、POD和CAT活性较CK均升高($P<0.05$,表2);施加外源ABA后,随着ABA浓度增加,MDA含量、SOD、POD和CAT活性均先降后升,且均在 T_3 处理降到最小值。与 T_1 相比, T_3 处理下,材料‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’的MDA含量、SOD、POD和CAT活性分别降低了37.14%、10.90%、43.88%和26.18%,32.20%、5.37%、28.62%和19.28%,19.25%、11.75%、26.18%和14.66%,14.91%、18.64%、26.15%和10.08%,19.73%、21.61%、29.02%和13.09%,31.83%、25.13%、27.74%和18.93%,但均高于CK($P<0.05$)。与 T_1 相比,耐盐材料‘GH’、‘GN’的POD活性降幅显著大于敏盐材料‘10295’、‘2668’($P<0.05$)。

盐胁迫条件下(T_1),供试红豆草的叶片相对含水量和根系活力较CK均降低($P<0.05$,表2);施加外源ABA后,随着ABA浓度增加,叶片相对含水量和根系活力均先增加再下降,均在 T_3 处理达到峰值。相较于 T_1 , T_3 处理下,材料‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’的叶片相对含水量分别增加了28.19%、17.91%、34.22%、42.38%、21.93%和39.62%,但显著低于CK($P<0.05$),根系活力分别增加了65.41%、86.69%、

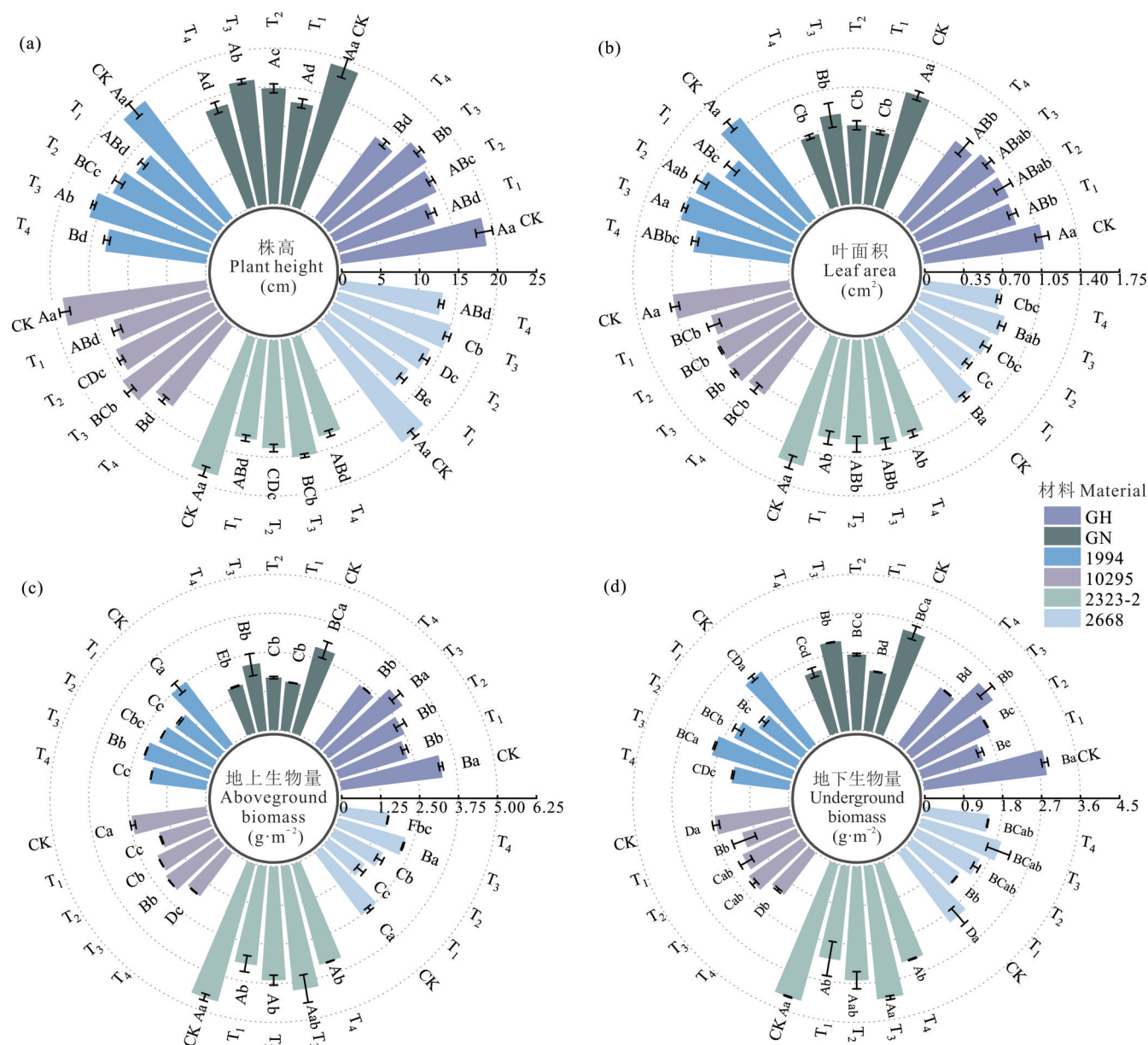


图1 外源激素ABA对盐胁迫下6份红豆草幼苗形态指标的影响

Fig. 1 The effect of exogenous hormone ABA on morphological indicators of six sainfoin seedlings under salt stress

不同大写字母表示材料间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different capital letters indicate significant differences among different materials ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

43.98%、56.93%、83.53% 和 75.80%, 并低于 CK ($P < 0.05$)。与 T₁ 相比, 耐盐材料 ‘GH’、‘GN’ 的根系活力增幅显著大于敏盐材料 ‘10295’ ($P < 0.05$)。

2.3 离子含量

由图 2 可知, 与 CK 相比, 盐胁迫条件下 (T₁), 供试红豆草的 Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量均升高 ($P < 0.05$); 施加外源 ABA 后, 随着 ABA 浓度增加, Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量均先下降后上升, 均在 T₃ 处理降到最小值, 材料 ‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’ 的 Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量均高于 CK ($P < 0.05$), 但较 T₁ 处理分别下降了 39.05% 和 25.41%, 42.77% 和 19.16%, 31.80% 和 25.83%, 24.47% 和 30.24%, 19.80% 和 41.41%, 16.08% 和 31.68%。

与 CK 相比, 供试红豆草 K⁺ 含量在盐胁迫条件下 (T₁) 均下降 ($P < 0.05$, 图 2); 施加外源 ABA 后, 随着 ABA 浓度增加, K⁺ 含量先上升后下降, 且在 T₃ 处理达到最高水平, 材料 ‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’ 的 K⁺ 含量较 T₁ 处理分别增加了 24.36%、20.20%、20.62%、23.27%、25.45%、15.23%, 但均低于 CK

表2 外源激素ABA对盐胁迫下6份红豆草幼苗MDA含量、抗氧化酶活性、叶片相对含水量及根系活力的影响

Table 2 The effect of exogenous hormone ABA on MDA content, antioxidant enzyme activity, leaf relative water content, and root activity in seedlings of six sainfoin varieties under salt stress

材料 Material	处理 Treatment	丙二醛含量 Malonaldehyde content ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	过氧化物酶活性 Peroxidase activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	过氧化氢酶活性 Catalase activity ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	叶片相对含水量 Leaf relative wa- ter content (%)	根系活力 Root activity ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
GH	CK	13.16 $\pm$ 0.70ABe	127.47 $\pm$ 0.25Ae	10.95 $\pm$ 0.15Ec	1.29 $\pm$ 0.15Be	91.68 $\pm$ 0.20Ba	122.25 $\pm$ 0.38Da
	T ₁	26.31 $\pm$ 0.04Aa	154.66 $\pm$ 0.25Ba	19.95 $\pm$ 0.26Ea	1.89 $\pm$ 0.23Aa	65.37 $\pm$ 0.57Ad	66.51 $\pm$ 0.71Ee
	T ₂	21.29 $\pm$ 0.28Ac	145.45 $\pm$ 0.15Bc	16.09 $\pm$ 0.39Eb	1.53 $\pm$ 0.05Bc	74.31 $\pm$ 0.37Ac	106.19 $\pm$ 0.39Dc
	T ₃	16.54 $\pm$ 0.14Ad	137.80 $\pm$ 0.15Ad	11.19 $\pm$ 0.39Fc	1.40 $\pm$ 0.07Cd	83.80 $\pm$ 0.40Ab	110.02 $\pm$ 0.65Db
	T ₄	24.08 $\pm$ 0.22Ab	153.04 $\pm$ 0.25Bb	18.80 $\pm$ 0.53Ea	1.81 $\pm$ 0.08Ab	65.55 $\pm$ 0.41Bd	79.88 $\pm$ 0.39Dd
GN	CK	14.09 $\pm$ 0.04Ac	123.62 $\pm$ 0.51Bd	11.68 $\pm$ 0.30Ee	1.21 $\pm$ 0.12Ce	93.00 $\pm$ 0.33Aa	182.89 $\pm$ 0.67Aa
	T ₁	23.63 $\pm$ 0.48Ba	135.84 $\pm$ 0.25Da	18.42 $\pm$ 0.39Fa	1.71 $\pm$ 0.33Ca	54.19 $\pm$ 0.41Dd	92.98 $\pm$ 0.66Be
	T ₂	21.89 $\pm$ 0.77Aa	133.32 $\pm$ 0.25Cb	16.39 $\pm$ 0.44Ec	1.59 $\pm$ 0.09Ac	58.82 $\pm$ 0.11Ec	107.82 $\pm$ 0.68Dc
	T ₃	16.02 $\pm$ 0.07Ab	128.54 $\pm$ 0.15Cc	13.15 $\pm$ 0.15Ed	1.38 $\pm$ 0.21Cd	63.89 $\pm$ 0.22Db	173.58 $\pm$ 0.39Ab
	T ₄	22.52 $\pm$ 0.76Ba	134.07 $\pm$ 0.38Db	17.43 $\pm$ 0.15Fb	1.65 $\pm$ 0.15Cb	54.49 $\pm$ 0.24Dd	96.14 $\pm$ 0.66Cd
1994	CK	12.88 $\pm$ 0.09BCd	120.60 $\pm$ 0.25Ce	12.98 $\pm$ 0.53De	1.18 $\pm$ 0.29De	81.76 $\pm$ 0.40Da	182.79 $\pm$ 0.37Aa
	T ₁	20.49 $\pm$ 0.09Ca	151.69 $\pm$ 0.25Ca	21.62 $\pm$ 0.25Da	1.55 $\pm$ 0.23Da	57.04 $\pm$ 0.24Ce	100.77 $\pm$ 0.99Ae
	T ₂	17.12 $\pm$ 0.02Bc	145.75 $\pm$ 0.25Bc	18.96 $\pm$ 0.25Dc	1.46 $\pm$ 0.19Cc	72.11 $\pm$ 0.31Bc	127.35 $\pm$ 0.39Bc
	T ₃	16.54 $\pm$ 0.52Ac	133.86 $\pm$ 0.15Bd	15.96 $\pm$ 0.26Dd	1.33 $\pm$ 0.18Dd	76.56 $\pm$ 0.29Bb	145.09 $\pm$ 0.39Cb
	T ₄	18.24 $\pm$ 0.45Cb	149.66 $\pm$ 0.29Cb	20.39 $\pm$ 0.26Db	1.53 $\pm$ 0.21Db	67.13 $\pm$ 0.32Ad	109.52 $\pm$ 0.39Ad
10295	CK	11.51 $\pm$ 0.28Dc	77.25 $\pm$ 1.69Ee	18.41 $\pm$ 0.39Be	1.13 $\pm$ 0.15Ee	77.19 $\pm$ 0.47Ea	101.23 $\pm$ 0.38Fa
	T ₁	16.21 $\pm$ 0.49Da	111.71 $\pm$ 0.29Ea	29.19 $\pm$ 0.26Ba	1.39 $\pm$ 0.32Ea	51.21 $\pm$ 0.38Ee	59.20 $\pm$ 0.66Fe
	T ₂	14.05 $\pm$ 0.06Cb	99.19 $\pm$ 0.25Dc	24.82 $\pm$ 0.44Bc	1.32 $\pm$ 0.15Dc	69.04 $\pm$ 0.84Cc	82.61 $\pm$ 0.66Ec
	T ₃	13.79 $\pm$ 0.25Bb	90.89 $\pm$ 0.39Ed	21.56 $\pm$ 0.39Bd	1.25 $\pm$ 0.16Ed	72.92 $\pm$ 0.35Cb	92.90 $\pm$ 0.39Eb
	T ₄	14.76 $\pm$ 0.44Eb	107.13 $\pm$ 0.25Eb	27.65 $\pm$ 0.15Bb	1.35 $\pm$ 0.18Eb	64.39 $\pm$ 0.51Bd	75.03 $\pm$ 0.38Ed
2323-2	CK	14.01 $\pm$ 0.36ABc	64.31 $\pm$ 0.25Fe	15.52 $\pm$ 0.26Ce	1.40 $\pm$ 0.31Ae	75.54 $\pm$ 0.63Fa	174.80 $\pm$ 0.38Ba
	T ₁	20.33 $\pm$ 0.23Ca	101.72 $\pm$ 0.25Fa	24.94 $\pm$ 0.15Ca	1.68 $\pm$ 0.07Ca	60.53 $\pm$ 0.50Bd	87.51 $\pm$ 0.39Ce
	T ₂	16.75 $\pm$ 1.01Bb	94.11 $\pm$ 0.39Ec	20.08 $\pm$ 0.15Cc	1.58 $\pm$ 0.12Ac	63.63 $\pm$ 0.20Dc	130.74 $\pm$ 0.39Ac
	T ₃	16.32 $\pm$ 0.26Ab	79.74 $\pm$ 0.25Fd	17.70 $\pm$ 0.39Cd	1.46 $\pm$ 0.13Ad	73.81 $\pm$ 0.27Cb	160.60 $\pm$ 0.39Bb
	T ₄	19.17 $\pm$ 0.10Ca	100.14 $\pm$ 0.53Fb	23.68 $\pm$ 0.15Cb	1.64 $\pm$ 0.15Cb	62.76 $\pm$ 0.22Cc	102.83 $\pm$ 0.76Bd
2668	CK	11.93 $\pm$ 0.29CDe	106.00 $\pm$ 0.39De	20.39 $\pm$ 0.26Ae	1.39 $\pm$ 0.16Ae	86.46 $\pm$ 0.26Ca	155.15 $\pm$ 0.65Ca
	T ₁	20.32 $\pm$ 0.27Ca	165.62 $\pm$ 0.39Aa	32.18 $\pm$ 0.15Aa	1.77 $\pm$ 0.31Ba	59.42 $\pm$ 0.13Be	82.07 $\pm$ 0.65De
	T ₂	14.95 $\pm$ 0.20Cc	150.34 $\pm$ 0.39Ac	27.49 $\pm$ 0.26Ac	1.55 $\pm$ 0.32Bc	69.34 $\pm$ 0.37Cc	125.26 $\pm$ 0.67Cc
	T ₃	13.86 $\pm$ 0.33Bd	124.01 $\pm$ 0.15Dd	23.25 $\pm$ 0.30Ad	1.43 $\pm$ 0.21Bd	82.96 $\pm$ 0.34Ab	144.28 $\pm$ 0.37Cb
	T ₄	16.90 $\pm$ 0.27Db	160.03 $\pm$ 0.53Ab	30.30 $\pm$ 0.15Ab	1.70 $\pm$ 0.15Bb	61.92 $\pm$ 0.53Cd	108.82 $\pm$ 0.38Ad

注:不同大写字母表示材料间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences among different materials ($P<0.05$), different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

($P<0.05$)。与T₁相比,耐盐材料‘GN’、‘1994’的Na⁺含量降幅显著高于敏盐材料‘10295’、‘2323-2’,‘GN’的K⁺含量增幅显著高于‘2668’($P<0.05$)。

2.4 内源激素含量

盐胁迫条件下(T₁),供试红豆草叶片和根系GA₃、叶片和根系ZT及叶片中IAA含量较CK均显著下降($P<0.05$),施加外源ABA后,随着ABA浓度增加,供试材料‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’的叶片

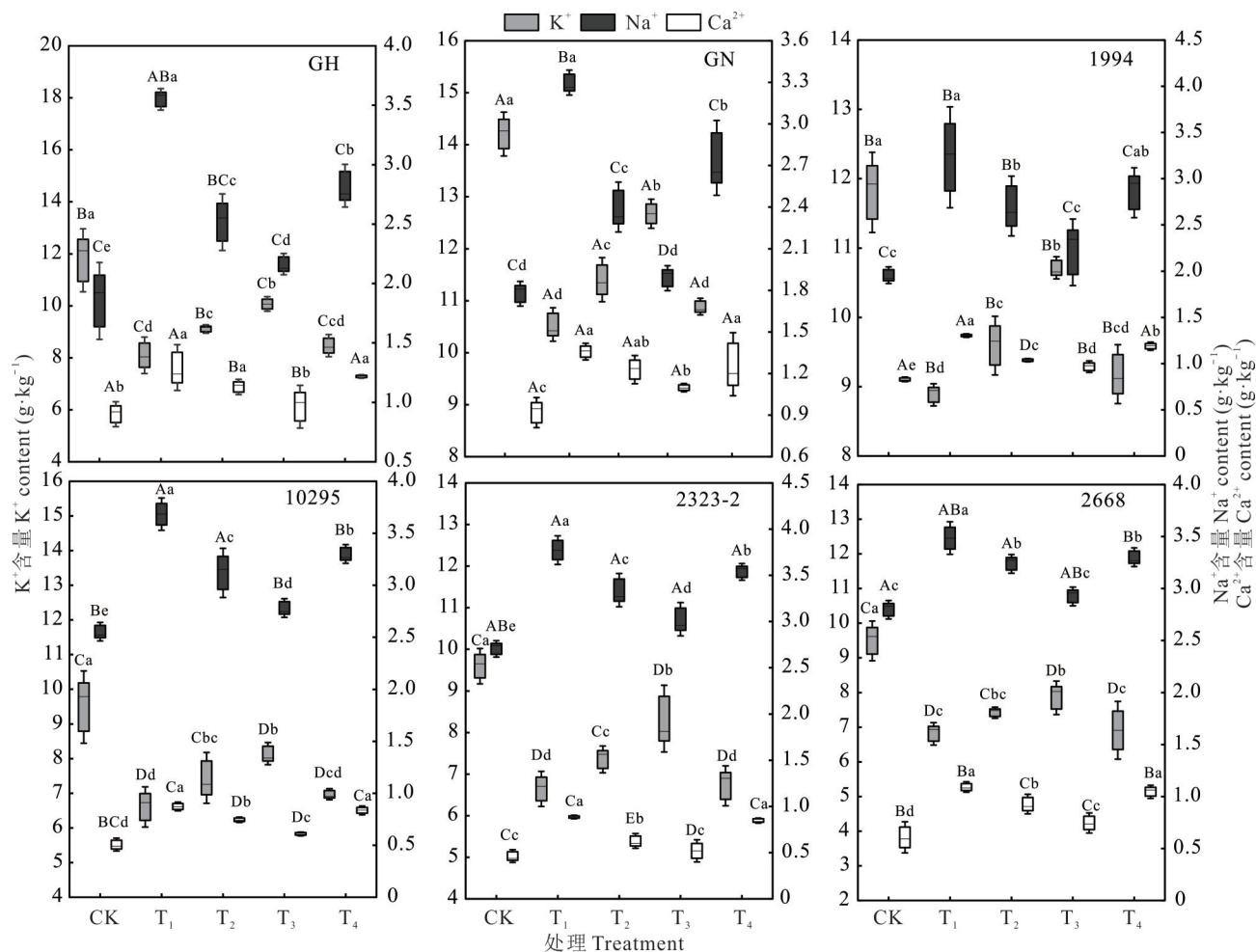


图2 外源激素ABA对盐胁迫下6份红豆草幼苗离子含量的影响

Fig. 2 The effect of exogenous hormone ABA on ion content in seedlings of six sainfoin varieties under salt stress

与根系 GA₃ 和 ZT 及叶片中 IAA 含量均先升后降, 且在 T₃ 处理升到最大值, 相较于 T₁, 其含量分别提高了 47.55%、36.05%、24.39%、80.53% 和 19.20%、86.90%、82.98%、50.05%、51.73% 和 19.81%、79.04%、87.71%、57.57%、40.48% 和 19.36%、74.36%、48.08%、60.48%、73.29% 和 17.97%、139.96%、49.34%、50.52%、81.34% 和 19.82%、73.16%、54.05%、55.98%、53.50% 和 16.74%, 但均低于 CK ($P < 0.05$, 表 3)。

与 CK 相比, 供试红豆草叶片与根系中的 ABA 及根系中的 IAA 含量在盐胁迫条件下 (T₁) 均上升 ($P < 0.05$, 表 3), 而供试红豆草材料 ‘GH’、‘GN’、‘1994’、‘10295’、‘2323-2’、‘2668’ 叶片与根系中的 ABA 及根系中的 IAA 含量在施加外源 ABA 后, 随着 ABA 浓度增加, 均先减小后增长, 且在 T₃ 处理降到最低水平 ($P < 0.05$), 其含量分别降低了 13.69%、28.04% 和 26.79%, 11.99%、25.91% 和 34.29%, 15.31%、26.60% 和 46.62%, 8.72%、27.64% 和 30.87%, 9.88%、22.24% 和 25.30%, 15.62%、23.86% 和 27.74%, 且均高于 CK ($P < 0.05$)。与 T₁ 相比, 耐盐材料 ‘GN’ 叶片的 ABA 含量降幅显著高于敏盐材料 ‘10295’, 耐盐材料 ‘GH’ 根系的 IAA 含量降幅显著高于敏盐材料 ‘2323-2’ ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 盐胁迫下红豆草幼苗形态指标对外源 ABA 的响应

形态改变往往体现植物内部的生理变化, 是植物应对不良环境的适应性反应机制^[20]。盐胁迫对植物生长发育有抑制作用, 主要表现为根变短变粗、株高变矮、叶片发黄卷曲等^[21]。生物量是评估植物抗盐性的重要指标之一, 其变化及分配格局直观地体现了植物受逆境影响的程度^[22]。本研究中, 盐胁迫下, 供试材料的株高、叶面积、

表 3 外源激素 ABA 对盐胁迫下 6 份红苕草幼苗内源激素含量的影响

Table 3 The effect of exogenous hormone ABA on endogenous hormone content in seedlings of six sainfoin varieties under salt stress (ng·g⁻¹)

材料 Material	处理 Treatment	生长素含量 Auxin content		赤霉素含量 Gibberellin content		玉米素含量 Zeatin content		脱落酸含量 Absciscic acid content	
		叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root
GH	CK	181.20±1.08Ca	6.13±0.12Ae	4.22±0.06Ca	1.04±0.05Aa	84.95±0.33Da	24.08±0.11Ba	128.49±1.26Ce	52.20±0.63De
	T ₁	129.19±1.01De	10.07±0.01Ba	2.50±0.03Ae	0.59±0.07Ac	63.71±0.17Ae	12.26±0.19Ce	157.05±1.14Ba	84.18±0.71Ca
	T ₂	141.32±0.89Cc	9.40±0.12Ac	3.34±0.02Bc	0.70±0.02Bc	71.71±0.24Bc	20.27±0.21Ac	145.17±1.21Cc	72.24±0.51Ec
	T ₃	153.99±0.92Db	7.37±0.12Ad	3.69±0.03CDb	0.81±0.01Bb	79.25±0.45Cb	22.14±0.16Bb	135.54±0.92Cd	60.57±0.64Ed
	T ₄	133.25±0.72Dd	9.81±0.13Ab	3.02±0.10Ad	0.65±0.014Ac	66.13±0.36Bd	15.85±0.31Bd	151.52±0.83Db	76.98±0.77Db
GN	CK	189.30±0.66Aa	5.47±0.01Be	4.46±0.16Ba	1.05±0.01Aa	91.74±0.23Ba	22.26±0.36Da	132.38±1.01Ae	65.04±0.86Ae
	T ₁	141.34±0.71Be	9.50±0.03Ca	2.26±0.03Be	0.55±0.01Ae	55.82±0.32Be	13.07±0.23Be	156.78±0.61Ba	94.65±0.33Aa
	T ₂	150.57±1.11Bc	7.75±0.01Bc	3.82±0.06Ac	0.78±0.06Ac	75.70±0.65Ac	15.76±0.24De	145.19±0.91Cc	84.23±0.41Ac
	T ₃	169.34±1.02Bb	6.24±0.12Bd	4.22±0.07Bb	1.01±0.07Ab	83.76±0.28Bb	19.83±0.21Cb	137.99±0.95Ad	70.13±0.65Ad
	T ₄	145.27±0.91Bd	8.59±0.07Bb	3.07±0.01Ad	0.62±0.01ABd	67.75±0.66Ad	14.59±0.15Cd	152.06±1.31Cd	88.70±0.33Ad
1994	CK	182.53±0.91Ba	5.05±0.02Ce	4.63±0.07Aa	0.82±0.01Ba	92.60±0.32Aa	25.39±0.15Aa	131.69±0.93Be	61.43±0.31Be
	T ₁	144.74±0.79Ae	10.28±0.01Aa	2.51±0.01Ad	0.41±0.06Be	54.60±0.41Ce	16.63±0.32Ae	160.62±1.12Aa	94.63±0.67Aa
	T ₂	152.79±0.83Ac	7.69±0.01Bc	3.78±0.07Ab	0.61±0.03Cc	66.14±0.32Dc	19.82±0.61Be	150.28±1.03Ac	80.41±0.72Bc
	T ₃	172.77±0.92Ab	5.49±0.03Dd	4.49±0.29Aa	0.78±0.01Cb	86.04±0.54Ab	23.37±0.35Ab	136.03±0.94Bd	69.46±0.91Bd
	T ₄	150.11±1.21Ad	8.20±0.04Cb	2.99±0.17Ac	0.53±0.02BCd	61.41±0.51Cd	18.22±0.46Ad	156.52±1.21Ab	86.56±0.37Bb
10295	CK	172.80±0.63Da	4.60±0.04De	4.21±0.06Ca	0.74±0.04Ca	84.17±0.32Ea	21.77±0.35Ea	120.70±1.12Ee	51.85±0.61Ee
	T ₁	132.97±0.69Ce	7.72±0.02Ea	2.20±0.08Bd	0.42±0.05Bd	49.44±0.41Ee	10.99±0.25Ee	140.72±1.13Ea	86.53±0.87Ba
	T ₂	140.82±0.71Dc	6.95±0.10Dc	2.60±0.08Cc	0.54±0.03Dc	66.18±0.66Dc	13.45±0.13Fc	136.68±0.85Ec	75.77±0.95Cc
	T ₃	156.86±0.92Cb	5.34±0.12Dd	3.84±0.02Cb	0.62±0.01Eb	79.34±0.51Cb	19.04±0.61Db	128.46±0.95Fd	62.61±0.34Cd
	T ₄	137.98±1.21Cd	7.46±0.04Eb	2.23±0.07Bd	0.51±0.02BCc	61.36±0.61Cd	12.19±0.45Ed	138.04±1.07Fb	77.33±0.56Cb
2323-2	CK	157.25±1.04Ea	5.03±0.07Ce	3.80±0.05Da	0.77±0.05Ca	81.42±0.51Fa	22.55±0.15Ca	116.92±1.24Fe	51.42±0.64Fe
	T ₁	121.19±1.32Fe	7.71±0.02Ea	1.44±0.03De	0.42±0.03Be	51.39±0.35De	12.20±0.19Ce	144.54±1.03Da	80.48±0.59Da
	T ₂	132.80±0.53Fc	6.53±0.03Ec	2.18±0.09Dc	0.51±0.03Ec	65.36±0.64Ec	18.99±0.27Cc	138.08±1.06Dc	71.41±0.71Fc
	T ₃	145.21±1.31Fb	5.76±0.09Cd	3.45±0.11Db	0.63±0.01Eb	77.35±0.54Db	22.12±0.34Bb	130.26±1.15Ed	62.58±0.62Cd
	T ₄	127.66±0.93Fd	6.91±0.01Fb	1.74±0.06Cd	0.47±0.02Cd	60.61±0.54Dd	14.68±0.23Cd	142.49±0.97Eb	76.58±0.55Fb
2668	CK	155.59±0.81Fa	5.02±0.06Ce	3.82±0.07Da	0.78±0.01BCa	88.56±0.36Ca	21.81±0.15Ea	124.90±1.05De	52.63±0.61Ce
	T ₁	127.58±0.83Ee	8.62±0.09Da	1.73±0.03Ce	0.42±0.06Be	48.57±0.34Fe	11.83±0.23De	156.40±1.01Ca	80.61±0.63Da
	T ₂	134.56±0.93Ec	7.34±0.06Cc	2.62±0.10Cc	0.55±0.05Dc	67.83±0.26Cc	14.61±0.36Ec	148.08±0.97Bc	73.38±0.51Dc
	T ₃	148.94±1.04Eb	6.23±0.11Bd	3.00±0.08Eb	0.65±0.06Db	75.77±0.66Eb	18.15±0.54Eb	131.97±0.91Dd	61.37±0.66Dd
	T ₄	131.63±1.12Ed	7.81±0.09Db	2.21±0.08Bd	0.51±0.01BCd	58.15±0.75Ed	13.03±0.61Dd	153.22±1.31Bb	76.97±0.81Eb

AGB和UGB均降低,外源施加ABA后,各指标均增加,这是因为外源ABA既能调节细胞膨压、抑制叶绿素的降解,缓解逆境胁迫引发的叶片卷曲和发黄^[23];又能调节植物同化物的分配与积累,促进光合产物更多地流向生长部位,有利于株高、叶片和生物量的增长^[24]。且ABA浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下增加效果最佳,说明此浓度对盐胁迫的缓解效应最好。此外,材料‘GN’、‘1994’的株高、叶面积、AGB和UGB的增加幅度均大于材料‘10295’,这可能是因为一方面耐盐材料自身的耐盐生理调节机制良好,其气孔对ABA敏感性较高,外源ABA能帮助叶片精准地调控气孔运动;另一方面耐盐材料相较于敏盐材料具有更完善、高效的ABA信号转导网络,能快速响应ABA信号,激活下游响应基因的表达,增强植物对盐胁迫的耐受性^[25-26]。

3.2 盐胁迫下红豆草幼苗生理指标对外源ABA的响应

植物遭受逆境胁迫时,活性氧大量积累,引发细胞膜脂过氧化,破坏膜结构完整性^[15]。MDA是一种反映细胞膜脂质过氧化损伤程度的生物标志物,其累积是活性氧毒害作用的表现,其含量变化直观表现了植物对逆境的响应和耐受能力^[27];而抗氧化酶(SOD、POD、CAT等)系统能借助酶促和非酶促机制,调控细胞内氧化还原过程,保护植物免受氧化损伤^[28]。本研究中,盐胁迫使供试材料MDA含量、SOD、POD和CAT活性均升高,说明活性氧累积诱导了抗氧化酶系统的响应,但未能彻底缓解其氧化损伤,植物的细胞膜结构被破坏。而施加外源ABA后,几项指标均先降后升并在 T_3 处理降到最小值,且材料‘GH’的MDA含量、POD、CAT活性降幅均比‘10295’、‘2323-2’、‘2668’大,说明一定浓度的外源ABA可以缓解氧化损伤,维持活性氧产生与清除动态平衡,且敏盐材料细胞膜更易受损,耐盐材料的细胞膜对外源ABA更敏感;但随着ABA浓度增加至阈值,可能会影响一些正常的生理功能,导致细胞的抗逆能力下降^[24,29]。

叶片相对含水量可反映植物的渗透调节能力和叶片的水分状态,是表征植物抗逆性的重要指标^[30]。根系活力是衡量根系吸收、合成等功能的综合指标,能反映植物抵御逆境的能力^[31]。本研究中, T_1 处理下,叶片相对含水量和根系活力较CK均降低,说明植物根系的吸收能力变弱,导致植物缺水,其抗逆能力减弱。而施加外源ABA后,两个指标均增长,说明外源ABA与NaCl交互作用,既能促进红豆草根系吸收的水分和养分向地上部分输送,又能提高叶片的保水能力^[30]。且在ABA浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下增加到最大值,说明适宜浓度的ABA在植物抵抗盐胁迫过程中发挥最佳的调节作用,这与前人的研究结果一致^[13]。

3.3 盐胁迫下红豆草幼苗离子含量对外源ABA的响应

盐胁迫会破坏植物体内的离子平衡,造成毒害,致使植物生理和代谢紊乱^[8]。本研究中, T_1 处理下,与CK相比, K^+ 含量降低, Na^+ 和 Ca^{2+} 含量升高,喷施ABA后, Na^+ 和 Ca^{2+} 含量先下降后上升, K^+ 含量先上升后下降,且均在 T_3 处理达到峰值。研究表明,ABA可以激活 K^+ 通道,促进 K^+ 流入,与 Ca^{2+} 信号协同作用,将 Na^+ 排出细胞外,本研究中 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 的含量变化与其一致,且 T_3 处理下,ABA对离子平衡的调节作用表现最佳^[32]。此外,耐盐材料‘GN’的 K^+ 和 Ca^{2+} 与敏盐材料‘10295’差异显著,说明耐盐材料的细胞膜具有较强的离子阻滞能力,与ABA信号协同良好^[12,33]。

3.4 盐胁迫下红豆草幼苗内源激素含量对外源ABA的响应

内源激素是植物体内的微量有机物质,能通过协同或拮抗,帮助植物适应不利环境^[34]。研究表明,盐胁迫下,植物产生生理干旱,整体生长受阻,破坏了细胞分裂素合成和运输,ZT是细胞分裂素的一种,ZT和 GA_3 主要促进细胞伸长、分裂和分化,植物为减少生长消耗,会降低叶片和根系中 GA_3 和ZT的含量^[18,35-36];同时,盐胁迫抑制了叶片中IAA的合成,并加速其分解,而水分亏缺使植物根系吸收水分和养分困难,根系会通过增加IAA含量来促进根系扩展^[14,37]。研究发现,ABA与植物逆境响应紧密相关,根系中其含量升高有利于选择性吸收,叶片中其含量上升可诱导气孔关闭、减少水分散失,本研究中 T_1 处理下内源激素含量变化的结果与其相一致^[14,38-39]。施加外源ABA后,随着ABA浓度的增加,6份红豆草叶片与根系的 GA_3 和ZT含量及叶片中IAA的含量均先升后降,叶片与根系中的ABA及根系中的IAA含量均先下降后上升,说明外源ABA可以通过调节激素合成和代谢等途径优化植物体内的激素平衡,来提高植物对逆境的适应性和耐受性,且在ABA浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对供试材料的缓解效应最好^[40]。

4 结论

盐胁迫对红豆草幼苗的生长发育造成了损伤,外源ABA对红豆草幼苗各形态及生理指标均有不同程度的缓解效应,具体表现在改善幼苗形态、清除活性氧、补给水分、调节细胞离子平衡、维持细胞膜完整性及调控内源激素含量等,且 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA缓解效果最好,耐盐材料相较于敏盐材料效果更显著。因此,外源ABA可作为一种有效的植物生长调节剂,用于提高盐碱地区红豆草的适应性和生产力,为盐渍土的改良和利用提供了新思路。

参考文献 References:

- [1] Zhou H P, Shi H F, Yang Y Q, *et al.* Insights into plant salt stress signaling and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics*, 2024, 51(1): 16–34.
- [2] Yang J S, Yao R J, Wang X P, *et al.* Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10–27.
杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10–27.
- [3] Hu Y, Yang F, Yang N, *et al.* Analysis and prospects of saline-alkali land in China from the perspective of utilization. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 489–494.
胡炎, 杨帆, 杨宁, 等. 盐碱地资源分析及利用研究展望. *土壤通报*, 2023, 54(2): 489–494.
- [4] Nan L L, Guo Q E, Cao S Y. Archaeal community diversity in different types of saline-alkali soil in arid regions of Northwest China. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2020, 130(4): 382–389.
- [5] Huang H J, Zhang Y Q, Du W X, *et al.* Research progress on germplasm resources of sainfoin (*Onobrychis viciaefolia*). *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(8): 2346–2356.
黄海军, 张雨琪, 杜文宣, 等. 红豆草种质资源研究进展. *草地学报*, 2024, 32(8): 2346–2356.
- [6] Kumar S, Li G J, Yang J J, *et al.* Effect of salt stress on growth, physiological parameters, and ionic concentration of water dropwort (*Oenanthe javanica*) cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 660409.
- [7] Liu X, Wang K, Liang P F, *et al.* Screening and comprehensive evaluation of salt tolerant germplasm of sainfoin at seedling stage. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(9): 2171–2179.
刘鑫, 汪堃, 梁鹏飞, 等. 红豆草苗期耐盐种质筛选及综合评价. *西南农业学报*, 2022, 35(9): 2171–2179.
- [8] Wu G Q, Jia S, Liu H L, *et al.* Effect of salt stress on growth, ion accumulation, and distribution in sainfoins seedlings. *Pratacultural Science*, 2017, 34(8): 1661–1668.
伍国强, 贾姝, 刘海龙, 等. 盐胁迫对红豆草幼苗生长和离子积累及分配的影响. *草业科学*, 2017, 34(8): 1661–1668.
- [9] Yu Z P, Duan X B, Luo L, *et al.* How plant hormones mediate salt stress responses. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(11): 1117–1130.
- [10] Wang J T, Sa D W, Shao L H, *et al.* Optimizing agricultural structure and accelerating the development of the forage industry. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2025, 34(2): 211–220.
王加亨, 撒多文, 邵麟惠, 等. 调整优化农业结构, 加快饲草产业发展. *草业学报*, 2025, 34(2): 211–220.
- [11] Xiang H T, Zheng D F, He N, *et al.* Research progress on the physiological response of plants to low temperature and the amelioration effectiveness of exogenous ABA. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2021, 30(1): 208–219.
项洪涛, 郑殿峰, 何宁, 等. 植物对低温胁迫的生理响应及外源脱落酸缓解胁迫效应的研究进展. *草业学报*, 2021, 30(1): 208–219.
- [12] Chen K, Li G J, Bressan R A, *et al.* Absciscic acid dynamics, signaling, and functions in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 62(1): 25–54.
- [13] Ma X L, Wang W Y, Zhou H K, *et al.* Effect of soaking exogenous abscisic acid on *Onobrychis viciaefolia* seed germination and physiological mechanism under drought stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(11): 1882–1890.
马晓兰, 王文颖, 周华坤, 等. 外源ABA对于旱胁迫下红豆草种子萌发及幼苗生理生化特性的影响. *中国生态农业学报*, 2024, 32(11): 1882–1890.
- [14] Zhang Y, Chen H, Wang G P. Alleviating effects of exogenous ABA on *Catalpa bungei* seedlings under NaCl stress and growth physiological response characteristics. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(6): 996–1005.
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. *西北植物学报*, 2023, 43(6):

996—1005.

- [15] Zhang Z L, Liu X, Nan L L, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on sainfoin growth and physiological characteristics under sodium chloride stress. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 92—100.
张泽龙, 刘鑫, 南丽丽, 等. 外源SA对NaCl胁迫下红豆草生长和生理特性的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 92—100.
- [16] Zou Q. *Experimental guidance of plant physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 110—174.
邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2003: 110—174.
- [17] Zou D T, Guo W, Sun J, *et al.* Principal component analysis and comprehensive evaluation of salt tolerance related traits in different rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(8): 1—9.
邹德堂, 郭微, 孙健, 等. 水稻不同基因型耐盐相关性状主成分分析及综合评价. *东北农业大学学报*, 2018, 49(8): 1—9.
- [18] Shanab A A W, Elshobary E M, Czubacka A, *et al.* Improvement of salt tolerance in *Vicia faba* (L.) seedlings: a comprehensive investigation of the effects of exogenous calcium chloride. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 200.
- [19] Wang K, Nan L L, Li J F, *et al.* Effects of drought stress on endogenous hormone contents of different root-type alfalfa. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 30—36.
汪堃, 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. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 30—36.
- [20] Yu Y Z, Wang R J, Long S, *et al.* Effects of S-ABA on photosynthesis characteristic of *Elymus nutans* under combined stress of low temperature and drought. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(5): 1418—1424.
余易泽, 王芮嘉, 龙思, 等. S-诱抗素对低温干旱复合胁迫下垂穗披碱草光合特征的影响. *草地学报*, 2025, 33(5): 1418—1424.
- [21] Liang H Y, Li X K, Wang G P, *et al.* Physiological effects of exogenous methyl jasmonate on jujube seedlings under salt stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*. [2024-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1091.Q.20241231.1418.006.html>.
梁含云, 李先宽, 王广莘, 等. 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫酸枣幼苗的生理影响. *西北植被学报*. [2024-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1091.Q.20241231.1418.006.html>.
- [22] Tang H, Hu Y Y, Yu W W, *et al.* Growth, photosynthetic and physiological responses of *Torreya grandis* seedlings to varied light environments. *Trees*, 2015, 29(4): 1011—1022.
- [23] Wang F, Wang T B, Li P D. Protective effects of exogenous ABA on oxidative damage in maize seedlings under drought stress. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2887—2894.
王芳, 王铁兵, 李鹏德. 外源ABA对干旱胁迫下玉米幼苗氧化损伤的保护作用. *草业科学*, 2019, 36(11): 2887—2894.
- [24] Zhang X, Kong X, Li Y, *et al.* Effect of exogenous ABA on the canopy temperature and accumulation and distribution of photoassimilates in wheat under drought conditions. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(9): 1080—1094.
张鑫, 孔祥, 李勇, 等. 外源ABA对干旱条件下小麦冠层温度及光合同化物积累与分配的调控效应. *麦类作物学报*, 2019, 39(9): 1080—1094.
- [25] Wu K L, Zhou X, Liu L, *et al.* Regulation of agronomic traits and yield composition of rice in coastal saline-alkali land by exogenous ABA. *Hybrid Rice*, 2024, 39(5): 97—106.
吴昀伦, 周行, 刘琅, 等. 外源ABA对滨海盐碱地水稻农艺性状与产量构成的调控. *杂交水稻*, 2024, 39(5): 97—106.
- [26] Han C N, Chen G J, Zheng D F, *et al.* Transcriptomic and metabolomic analyses reveal that ABA increases the salt tolerance of rice significantly correlated with jasmonic acid biosynthesis and flavonoid biosynthesis. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 20365.
- [27] Liu X T, Shi F L, Ye W X. Analysis of antioxidant characteristics of exogenous inositol on *Poa pratensis* L. in response to drought stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(8): 2584—2591.
刘雪婷, 石凤翎, 叶文兴. 喷施外源肌醇对草地早熟禾响应于干旱胁迫的抗氧化特性分析. *草地学报*, 2024, 32(8): 2584—2591.
- [28] Wu G Q, Li H, Lei C R, *et al.* Effects of additional KCl on growth and physiological characteristics of sainfoin (*Onobrychis viciaeformis*) under high salt stress. *Acta Pratacultural Sinica*, 2019, 28(6): 45—55.
伍国强, 李辉, 雷彩荣, 等. 添加KCl对高盐胁迫下红豆草生长及生理特性的影响. *草业学报*, 2019, 28(6): 45—55.
- [29] Zhang Y, Jiang W J, Yu H J, *et al.* Exogenous abscisic acid alleviates low temperature-induced oxidative damage in seedlings of *Cucumis sativus* L. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(S2): 221—228.
张颖, 蒋卫杰, 余宏军, 等. 外源ABA缓解黄瓜幼苗中低温诱导的氧化损伤. *农业工程学报*, 2012, 28(S2): 221—228.
- [30] Li W T, Ning P, Wang F, *et al.* Effects of exogenous abscisic acid (ABA) on growth and physiological characteristics of *Machilus yunnanensis* seedlings under drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1543—1550.

- 李琬婷, 宁朋, 王菲, 等. 外源脱落酸对干旱胁迫下滇润楠幼苗生长及生理特性的影响. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1543—1550.
- [31] Zhang S Y, Cui B W, Wang J L, *et al.* Research progress on physiological and molecular responses of plant roots under abiotic stress. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(10): 2391—2401.
- 张思懿, 崔博文, 王佳玲, 等. 非生物胁迫下植物根系的生理与分子响应研究进展. 浙江农业学报, 2024, 36(10): 2391—2401.
- [32] Liu H, Song S B, Zhang H, *et al.* Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca^{2+} in plant stomatal closure in response to drought. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 14824.
- [33] Paheli M, Debasis C. Adaptation of plants to salt stress: the role of the ion transporters. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2021, 30(4): 668—683.
- [34] Shan G L, Ma Z Y, Li J Y, *et al.* Effects of *Euphorbia jolkinii* on physiology and endogenous hormone content of alfalfa seedlings. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(10): 153—161.
- 单贵莲, 马祖艳, 李嘉懿, 等. 大狼毒对紫花苜蓿幼苗生理及内源激素含量的影响. 草业学报, 2023, 32(10): 153—161.
- [35] Xu W, Cao F X, Li M, *et al.* Research on the changes of endogenous hormones in the development of *Davidia involucreata* bracts. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 103—109.
- 胥雯, 曹福祥, 李萌, 等. 珙桐苞片发育过程中内源激素的变化特征. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 103—109.
- [36] Song J X, Lv J, Zong X F, *et al.* Effects of ALA application on plant growth, hormone levels, and transcriptome in *Leymus chinensis* under drought stress. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(7): 73—83.
- 宋吉轩, 吕俊, 宗学风, 等. 干旱胁迫下ALA对羊草生长、内源激素及转录组的影响. 草业学报, 2018, 27(7): 73—83.
- [37] Hao J Q, Meng F, Li X, *et al.* Chitosan promotes root hair growth and endogenous IAA accumulation in root tips of vegetable soybean under NaCl stress. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(9): 1689—1699.
- 郝佳奇, 孟飞, 李星, 等. NaCl胁迫下壳聚糖促进菜用大豆根毛生长和根尖内源IAA积累的机理. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(9): 1689—1699.
- [38] Wang C H, Wang H, Li P X, *et al.* Developmental programs interact with abscisic acid to coordinate root suberization in *Arabidopsis*. The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology, 2020, 104(1): 241—251.
- [39] Liu F, Liu Q, Wu H J, *et al.* *Arabidopsis* calcineurin B-like-interacting protein kinase 8 and its functional homolog in tomato negatively regulates ABA-mediated stomatal movement and drought tolerance. Plant, Cell & Environment, 2024, 47(7): 2396—2409.
- [40] Hu P W, Huang T P, Li M J, *et al.* Research progress on abscisic acid biosynthesis and signaling regulation. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(9): 1193—1196.
- 胡鹏伟, 黄桃鹏, 李媚娟, 等. 脱落酸的生物合成和信号调控进展. 生命科学, 2015, 27(9): 1193—1196.