



盐胁迫下3种外源物对高羊茅生理指标的影响

林之林 郝田 于景金 杨志民

Effects of three exogenous substances on the physiological indexes of tall fescue under salt stress

LIN Zhilin, HAO Tian, YU Jingjin, YANG Zhimin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0537>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源2, 4-表油菜素内酯对盐胁迫下燕麦种子萌发抑制的缓解效应

Mitigating effect of exogenous 2, 4-epibrassinolide on the inhibition of oat seed germination under salt stress

草业科学. 2020, 37(5): 916 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0469>

外源抗坏血酸引发促进Na₂SO₄胁迫下燕麦幼苗的生长

Exogenous ascorbic acid priming promoted oats seedling growth under Na₂SO₄ stress

草业科学. 2018, 12(3): 558 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0305>

不同盐胁迫水平下硅对高羊茅幼苗生物量、酶活性和渗透调节物质的影响

Effect of silicon supplies on biomass and antioxidase and osmolytes of tall fescue seedlings under different salt concentration conditions

草业科学. 2018, 12(7): 1653 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0382>

外源NO对盐胁迫下紫花苜蓿生长及膜脂过氧化的影响

Effects of exogenous nitric oxide on the growth and membrane lipid peroxidation of *Medicago sativa* under salt stress

草业科学. 2019, 36(10): 2580 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0723>

DMTU对镉胁迫下高羊茅根系的缓解作用

Mitigation effect of dimethyl thiourea on tall fescue (*Festuca arundinacea*) roots under cadmium stress

草业科学. 2020, 37(8): 1488 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0058>

不同盐浓度下硅对高羊茅苗期生长及光合特征的影响

Effect of silicon supply on growth and photosynthetic characteristics of tall fescue seedlings under different salt concentrations conditions

草业科学. 2017, 11(7): 1442 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0411>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0537

林之林, 郝田, 于景金, 杨志民. 盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅生理指标的影响. 草业科学, 2022, 39(4): 720-730.

LIN Z L, HAO T, YU J J, YANG Z M. Effects of three exogenous substances on the physiological indexes of tall fescue under salt stress. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 720-730.

盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅生理指标的影响

林之林, 郝田, 于景金, 杨志民

(南京农业大学草业学院, 江苏南京 210095)

摘要: 为探讨如何提高高羊茅 (*Festuca arundinaceae*) 对盐胁迫的适应能力, 本研究以高羊茅为研究对象, 通过盆栽试验探究盐胁迫 (NaCl) 下叶面喷施硫酸钾 (K_2SO_4)、甜菜碱 (glycine betaine, GB) 和抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 对草坪质量 (turf quality, TQ)、叶片相对含水量 (relative water content, RWC)、渗透调节能力 (osmotic adjustment)、电解质渗漏率 (electrolyte leakage, EL)、丙二醛含量 (malonaldehyde content, MDA)、离子含量和抗氧化酶的影响。结果表明, 叶面喷施 K_2SO_4 、GB、AsA 均能在一定程度上提高高羊茅的耐盐能力, 其中以喷施 GB 效果最佳, AsA 次之。与其他处理相比, 喷施 GB 可以更有效地改善盐胁迫下高羊茅草坪质量, 并抑制叶片相对含水量的下降, 同时叶片具有较高的渗透势和较低的电解质渗漏率。此外, GB 处理可以明显抑制叶片中丙二醛和 H_2O_2 的积累, 同时在延缓过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活力下降方面效果显著。以上结果表明, 外源 GB 处理可以提高高羊茅的渗透调节能力和抗氧化酶活性, 进而提升其耐盐能力。

关键词: 高羊茅; 盐胁迫; 外源喷施; K_2SO_4 ; GB; AsA; 生理特性

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)04-0720-11

Effects of three exogenous substances on the physiological indexes of tall fescue under salt stress

LIN Zhilin, HAO Tian, YU Jingjin, YANG Zhimin

(College of Agro-grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

Abstract: To determine the adaptability to salt stress, tall fescue (*Festuca arundinaceae*) was taking as the material to examine the effects of three exogenous compounds such as potassium sulfate (K_2SO_4), glycine betaine (GB), and ascorbic acid (AsA) on salinity resistance. Turf quality (TQ), relative water content (RWC), osmotic adjustment, electrolyte leakage (EL), malonaldehyde content (MDA), ion content, and antioxidant enzymes were measured in tall fescue under non-stressed and salt stressed conditions. The results showed that spraying K_2SO_4 , GB, and AsA could improve salt resistance of tall fescue to some extent. Overall, spraying GB had the best performance, followed by AsA. Compared with other treatments, spraying GB improved the quality of tall fescue under salt stress more effectively and inhibited the decrease of relative water content of leaves; however, leaves had higher osmotic potential and lower electrolyte leakage rate. In addition, GB treatment had a significant effect in inhibiting the accumulation of malondialdehyde and H_2O_2 , and delaying the decrease of catalase and ascorbate peroxidase enzyme activities. Overall, this study confirms that exogenous GB treatment can improve the osmotic regulation ability and activity of antioxidant enzyme on tall fescue, consequently improving the resistance of salt tolerance.

Keywords: tall fescue (*Festuca arundinaceae*); salt stress; exogenous spraying; K_2SO_4 ; GB; AsA; physiological property

收稿日期: 2021-09-01 接受日期: 2021-12-10

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目 (LYKJ[2021]29); 科技部科技基础资源调查专项“南方草地牧草资源调查 (2017FY100603)”

第一作者: 林之林 (1990-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 主要从事草坪草耐盐性研究。E-mail: 174277031@qq.com

通信作者: 杨志民 (1966-), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 主要从事草种质资源与草坪管理。E-mail: nauzym@njau.edu.cn

Corresponding author: YANG Zhimin E-mail: nauzym@nau.edu.cn

盐胁迫作为非生物胁迫之一,是限制作物生长的一个重要的环境因素^[1-2],导致草类植物发育不良和秋季早衰^[3]。随着人类对土壤的不合理利用,土壤盐渍化已成为世界农业生产最大的环境威胁之一^[4]。预计到2050年,将有50%可耕地严重盐碱化^[5]。盐胁迫对植物的伤害主要体现在两个方面,分别为渗透胁迫和离子毒害。盐胁迫使植物细胞水势降低,限制根系对水分的吸收,同时因摄入过量的钠离子(Na^+)和氯离子(Cl^-)使膜的完整性和功能受到干扰^[6]。经过长期进化,植物可以通过形态的变化和生理机制的改变等途径,耐受一定程度的盐胁迫^[7]。比如通过调控小分子有机物(脯氨酸、甜菜碱以及一些多糖分子物质)^[8]和无机离子(Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 等)的浓度维持细胞内膨压,稳定酶分子活性,使盐离子在不直接伤害植物细胞的同时,还可形成相对稳定的吸水能力^[9-10]。然而,在重度盐胁迫条件下,单靠植物自身调节难以维持其正常的生命活力。

目前研究表明,可以通过改良土壤和改进灌溉技术控制土壤中盐分积累,或借助系统选育、辐射诱变、分子标记辅助育种等手段选育耐盐品种^[11],但利用外施化学物质对植物进行耐盐性调控的方法更加简便有效。前人研究发现外源施用钾盐可在一定程度上弥补盐胁迫下小麦(*Triticum aestivum*)体内 K^+ 亏缺引起的离子失衡,使小麦得以维持相对正常的生理活动^[12];外源甜菜碱可通过调节紫花苜蓿(*Medicago sativa*)体内抗氧化酶的活性保持细胞膜的稳定性,最终达到缓解盐胁迫的目的^[13];外源抗坏血酸使黄芩(*Scutellaria baicalensis*)体内脯氨酸和可溶性糖含量积累,从而增强黄芩的渗透调节能力,进一步缓解盐胁迫对其造成的伤害^[14]。

高羊茅(*Festuca arundinaceae*)是禾本科羊茅属的多年生草本植物,因适应性强、产量高、绿期长而被作为草坪草和饲草广泛应用^[15]。由于近年来土壤盐渍化的问题愈发严重,如何提高高羊茅在盐胁迫下的适应能力,对今后草坪的建植和管理具有重要的现实意义。因此,本研究以高羊茅为试验材料,探讨3种外源物质 K_2SO_4 、GB和AsA缓解高羊茅盐害的生理机制,以期高羊茅在盐碱地的应用和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在南京农业大学草业学院人工气候室进行,供试材料选用高羊茅(*F. arundinaceae* 'Arid 3')。选择均匀一致的种子按 $3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的播种量播于PVC管(深度50 cm,直径11 cm)中,基质为长江水洗沙。播种后每2 d浇灌去离子水1次,每次每盆500 mL,生长期间按照1/3原则定期修剪,修剪高度为5 cm。材料经3个月预培养,待健康状况良好、生长均匀一致后开始处理。

1.2 试验设计

在材料处理期间,生长室环境条件为 $25 \text{ }^\circ\text{C}/18 \text{ }^\circ\text{C}$ (昼/夜),相对湿度为70%, $810 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 光照,处理期间不修剪。所有试验材料保持每日浇灌,每次每管浇灌250 mL去离子水或NaCl水溶液于基质中,避免溶液接触叶片。为避免盐激伤害,盐胁迫各处理的盐浓度从0开始,以每天 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度逐渐增加,直至达到预定浓度 $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验分别在非盐胁迫(CK)及盐胁迫处理下设置3个外源喷施处理: $3.27 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 、 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甜菜碱(glycine betaine, GB)^[16]和 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸(ascorbate, AsA)^[17],3种化学物质的浓度通过前期浓度梯度筛选试验确定。每7 d进行一次叶面喷施^[17],每次每管20 mL,并保证均匀喷施至药液呈水滴状自然落下。第一次叶面喷施为正式试验前3 d的17:00,之后每次均在取样后同一时间喷施。每个处理4个重复,分别在盐处理开始的0、7、14、21、28、35 d观测并随机选取完全展开叶用于后续测定。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 形态指标的测定

采用目测法评定草坪质量(turf quality, TQ),以全美草坪草评价体系(The National Turfgrass Evaluation Program, NTEP)为参考标准^[18]。

1.3.2 生理指标的测定

参考Barrs和Weatherley^[19]的方法测定叶片相对含水量(relative water content, RWC);采用Vapor Pressure Osmometer 5520渗透仪(Wescor, Inc., Logan, UT)测定渗透调节(osmotic adjustment, OA);电解质渗

漏率 (electronic leakage, EL) 通过电导率仪测定并计算^[20]; 利用巴比妥酸显色法测定叶片中丙二醛 (MDA) 含量^[20]; 叶片中过氧化氢 (H_2O_2) 含量通过二氨基联苯胺水溶液 (DAB, pH 5.8) 染色鉴定。

1.3.3 Na^+ 、 K^+ 含量及抗氧化酶的测定

剪取并称量大约 1.0 g 完全展开叶, 叶片用去离子水冲洗干净后装袋烘干。将干样磨碎并称取 0.1 g, 微波消解后用电感耦合等离子体发光光谱分析 (ICP) 测量对应离子含量。过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性的测定分别参考 Aebi^[21] 和 Nakano^[22] 的方法。

1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 程序分析软件对试验数据进行显著性检测, 平均数间采用 Fisher 最小显著差数法 (LSD) 检测差异, 显著水平 $P < 0.05$ 。用 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅草坪质量的影响

非盐胁迫下喷施 3 种外源物对高羊茅的草坪质量影响差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1、图 2)。在盐胁迫

下, 高羊茅的草坪质量总体上随着处理时间延长而下降, 叶片逐渐枯黄。盐胁迫处理 35 d 时, 喷施去离子水、 K_2SO_4 、GB、AsA 处理的草坪质量相较于 0 d 分别下降了 69.94%、57.41%、38.42%、47.85%, 叶面喷施 K_2SO_4 、GB 和 AsA 处理的草坪质量与去离子水处理相比分别显著升高了 19.72%、30.09% 和 24.14% ($P < 0.05$)。这表明喷施 3 种外源物质后, 均可以显著抑制盐胁迫下高羊茅草坪质量的下降。

2.2 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅叶片相对含水量的影响

盐胁迫下, 各处理叶片相对含水量均随着盐处理时间的增加而持续下降 (图 3)。0 和 7 d 的叶片相对含水量均无明显变化, 14 d 时叶面喷施 K_2SO_4 和 GB 处理比同时期去离子水处理分别升高了 4.91% 和 5.67% ($P < 0.05$)。35 d 时喷施 AsA、 K_2SO_4 和 GB 处理比同时期去离子水处理分别显著升高了 6.89%、2.61% 和 8.77%。未受盐胁迫时, 喷施 K_2SO_4 、GB、AsA 对其相对含水量的影响均没有显著差异。

2.3 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅渗透调节的影响

在盐胁迫下, 高羊茅叶片渗透压随时间增加呈

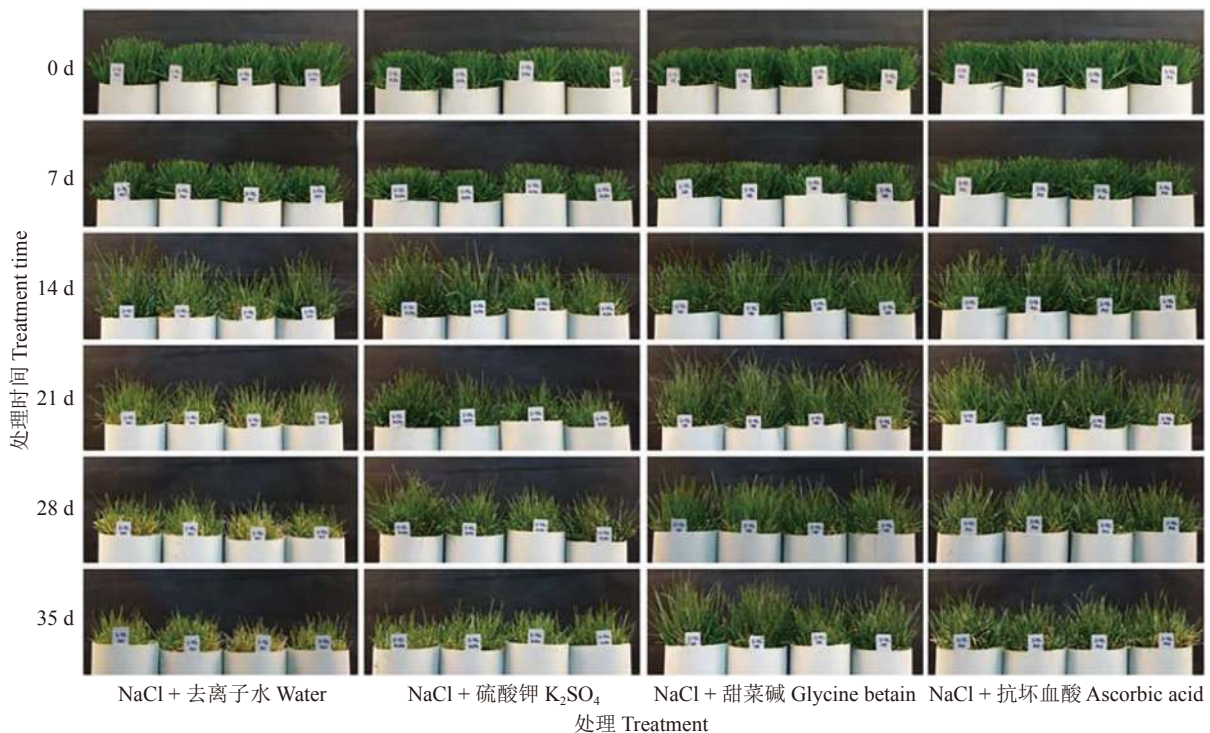


图 1 盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅表型的影响

Figure 1 Effect of three substances on phenotype of tall fescue under salt stress

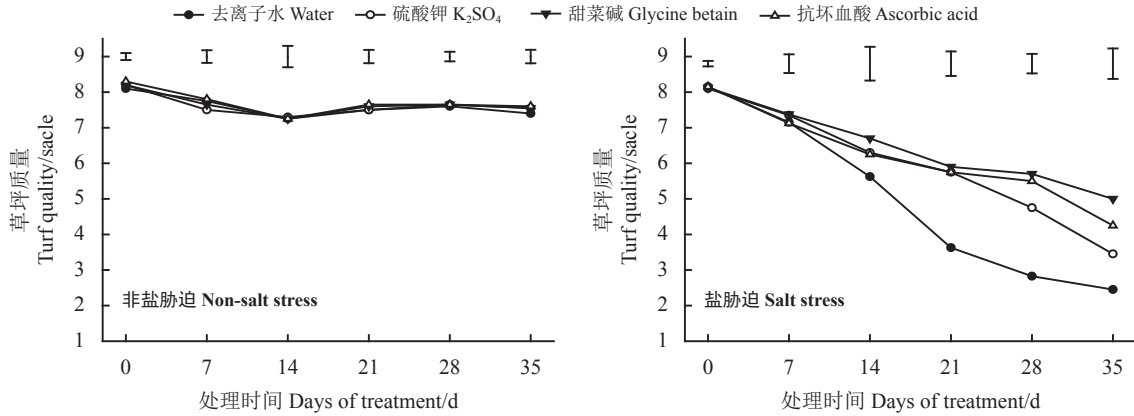


图 2 非盐胁迫和盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅草坪质量的影响

Figure 2 Effect of three substances on the turf quality of tall fescue under non-salt stress and salt stress

竖线代表 LSD 值 ($P < 0.05$), 表示同一时间点不同处理间差异显著; 下图同。

Bar represents difference among different treatments by least significant difference (LSD) test at the 0.05 level; this is applicable for the following figures.

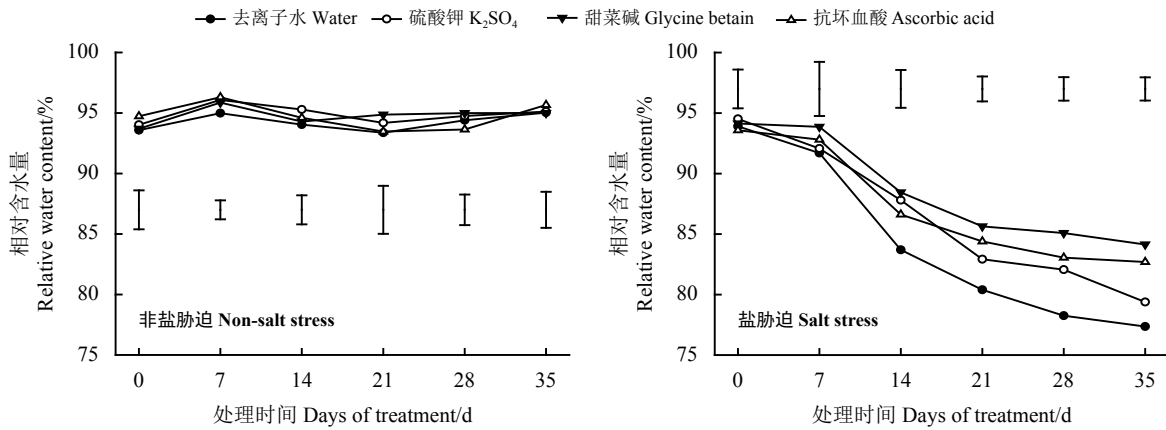


图 3 非盐胁迫和盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅相对含水量的影响

Figure 3 Effect of three substances on the relative water content of tall fescue under non-salt stress and salt stress

现上升的趋势 (图 4)。盐胁迫 7 d 时, 仅喷施 GB 的高羊茅叶片渗透压与去离子水处理呈显著差异 ($P < 0.05$); 35 d 时, 喷施 GB、 K_2SO_4 和 AsA 的高羊茅叶片渗透压分别比喷施去离子水处理显著高出 171.74%、89.13% 和 93.47%。

2.4 3 种外源物质对盐胁迫下高羊茅电解质渗漏率的影响

高羊茅在正常环境下, 各处理间电解质渗漏率均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 5)。在盐胁迫下, 各处理高羊茅叶片的电解质渗漏率均随盐处理时间增加而升高, 而喷施 K_2SO_4 、GB、ASA 后电解质渗漏率均有一定程度的下降。盐胁迫 14 d 时喷施 GB 和 AsA 处理比同时期的去离子水处理的电解质渗漏率分别下降了 19.89% 和 19.32%, 35 d 时则分别下降

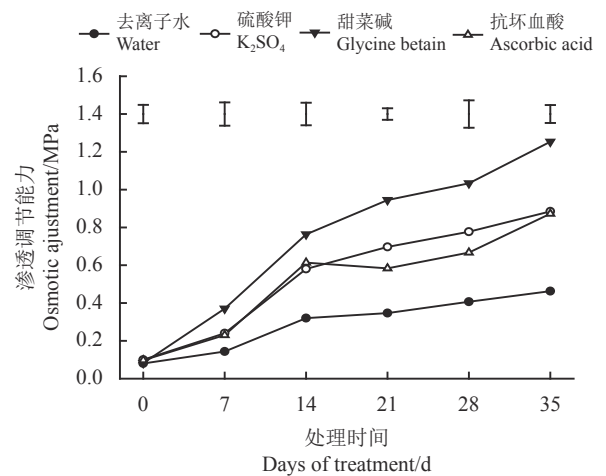


图 4 盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅渗透压的影响

Figure 4 Effect of three substances on the osmotic adjustment of tall fescue under salt stress

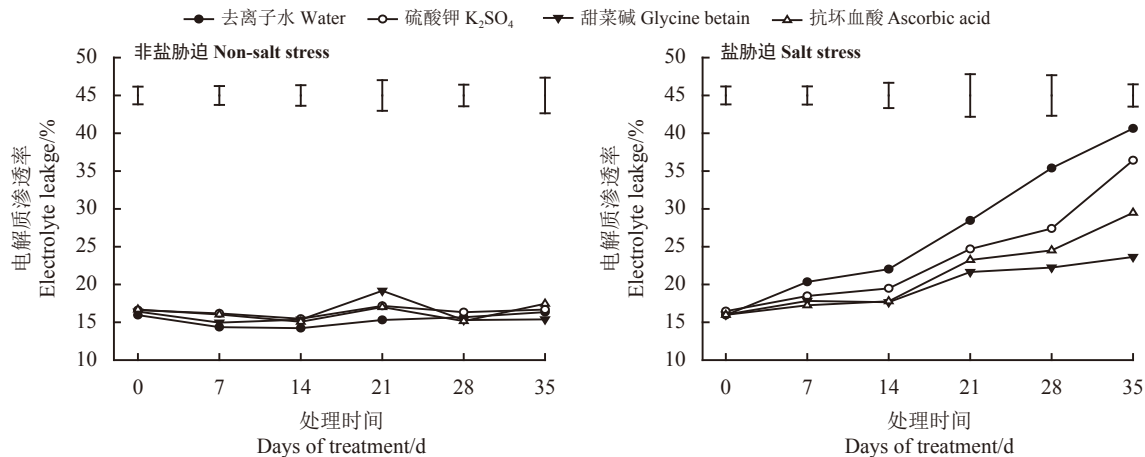


图5 非盐胁迫和盐胁迫下3种外源物对高羊茅电解质渗透率的影响

Figure 5 Effect of three substances on the electrolyte leakage of tall fescue under non-salt stress and salt stress

了41.84%和27.42% ($P < 0.05$), 喷施 K_2SO_4 处理仅在盐处理28 d时显著低于去离子水。

2.5 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅离子含量的影响

正常环境下叶面喷施去离子水、 K_2SO_4 、GB、AsA, 对其叶片 Na^+ 浓度均无显著影响 ($P > 0.05$) (图6)。而在盐胁迫下, 叶片 Na^+ 浓度随处理时间的增加而增加, 喷施3种外源物质可以明显抑制 Na^+ 浓度的上升。各处理间7 d时叶面喷施 K_2SO_4 、AsA 和 GB 处理相比同时期去离子水处理的 Na^+ 浓度分别显著降低了36.67%、55.85%和69.07% ($P < 0.05$), 35 d时分别显著降低了34.64%、43.49%和37.15%。

在正常环境下, 喷施去离子水、 K_2SO_4 、GB 和 AsA 对高羊茅叶片 K^+ 浓度影响均无明显差异 ($P > 0.05$) (图6)。在盐胁迫下, 只有叶片喷施 K_2SO_4 处理的高羊茅叶片 K^+ 浓度呈现明显上升趋势, 35 d时叶片中 K^+ 浓度比0 d上升102.55%, 其余3个处理的叶片 K^+ 浓度均未随处理时间延长而变化。

高羊茅叶片在正常环境下, 各处理高羊茅叶片 Na^+/K^+ 均无明显变化 ($P > 0.05$) (图6)。而在盐胁迫下, 随处理时间增加逐渐上升。其中叶面喷施去离子水处理的高羊茅叶片 Na^+/K^+ 上升最为明显, 35 d时, 叶面喷施 K_2SO_4 、GB 和 AsA 处理的叶片 Na^+/K^+ 较之去离子水处理分别显著降低了59.65%、51.54%和38.99% ($P < 0.05$), 但3个处理间无明显差异。

2.6 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅丙二醛含量的影响

在正常环境下, 叶面喷施去离子水、 K_2SO_4 、GB、

AsA 后高羊茅叶片丙二醛含量均无明显变化 ($P > 0.05$) (图7)。在盐胁迫下, 各处理高羊茅叶片的丙二醛含量均随盐处理时间的延长而逐渐增加, 喷施3种外源物质可以抑制丙二醛的积累。28 d时叶面喷施 K_2SO_4 、GB 和 AsA 处理相比同时期去离子水处理的MDA含量分别显著降低了32.54%、32.76%和36.84% ($P < 0.05$), 35 d时叶面喷施GB 和 AsA 处理相比去离子水处理的丙二醛含量显著降低了32.01%和28.67%, 而喷施 K_2SO_4 处理丙二醛含量无显著差异。

2.7 3种外源物质对盐胁迫下高羊茅抗氧化酶活性的影响

正常条件下, 高羊茅叶片经过DAB染色后, 颜色没有明显变化(图8)。而在盐胁迫下, 叶片喷施去离子水处理的叶片经DAB染色后, 处理7 d的叶片颜色开始明显加深, 这一趋势一直持续到35 d。喷施 K_2SO_4 和 AsA 处理7 d时叶片颜色没有明显变化, 二者均在14 d时颜色加深。相比之下, 喷施GB处理的叶片经DAB染色后, 直到21 d才开始出现颜色加深的现象。盐胁迫处理35 d时, 喷施去离子水处理叶片颜色最深, K_2SO_4 次之, 喷施GB处理的叶片颜色最浅。

正常条件下, 叶面喷施去离子水、 K_2SO_4 、GB、AsA 处理的高羊茅叶片CAT酶活性并无明显变化, 处理间也无显著差异 ($P > 0.05$) (图9)。在盐胁迫初期, 由于受到NaCl胁迫, 各处理高羊茅叶片CAT活性均明显上升, 而后随盐胁迫时间的延长而逐渐下

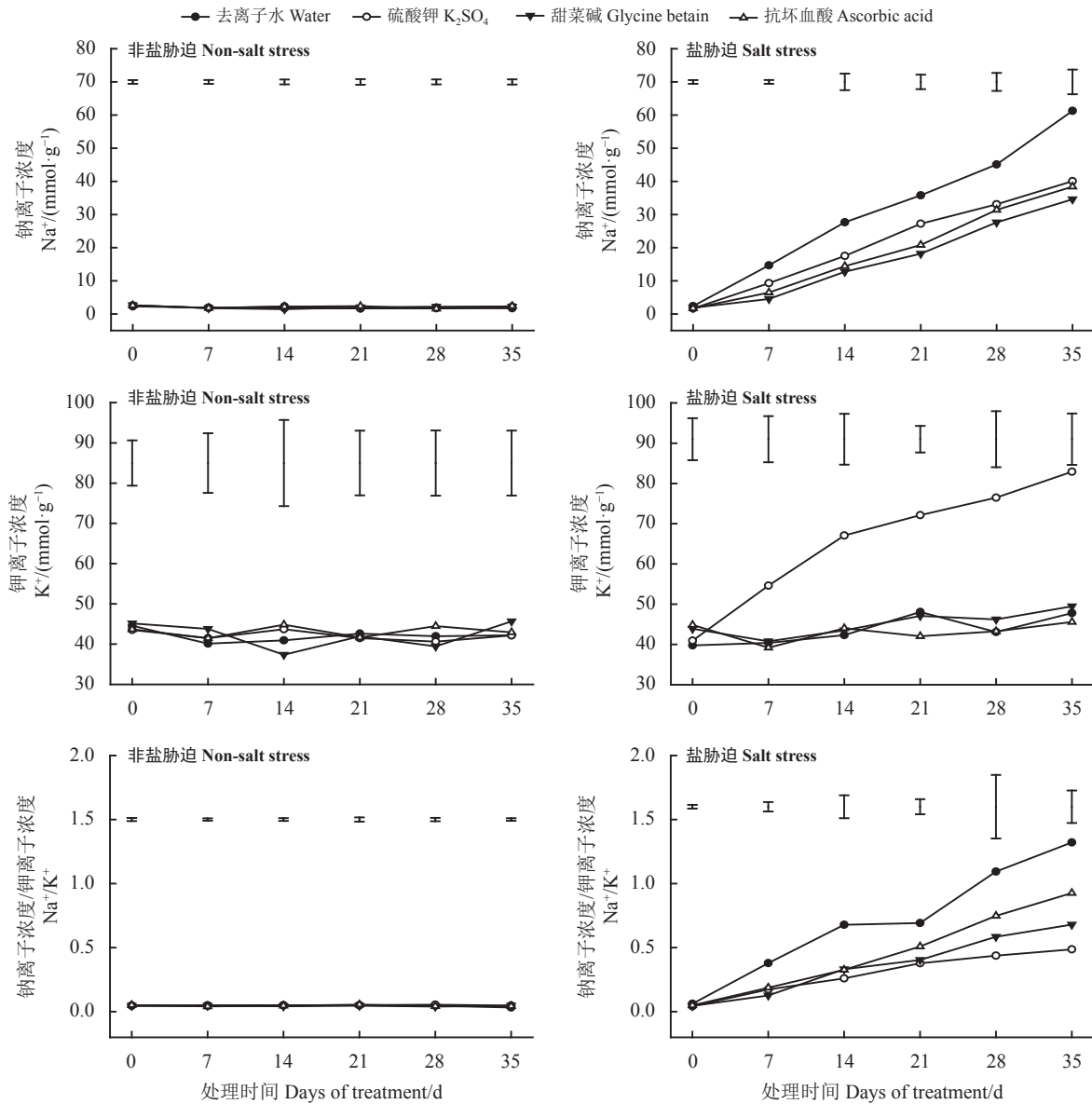


图 6 非盐胁迫和盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅离子含量的影响

Figure 6 Effect of three substances on the ion content of tall fescue under non-salt stress and salt stress

降。其中喷施 K₂SO₄、GB、AsA 处理后叶片 CAT 含量均在 14 d 时达到峰值, 相较于 0 d 分别上升了 55.45%、61.81% 和 51.92%, 而后明显下降; 喷施去离子水处理的叶片 CAT 含量在 21 d 达到峰值, 相较于 0 d 上升了 53.09%, 后随之下降。盐胁迫处理 35 d 时, 叶面喷施去离子水或 K₂SO₄ 的高羊茅叶片 CAT 活性相较于 28 d 分别骤降 40.93% 和 34.09%, 而 GB、AsA 处理分别下降了 7.92% 和 7.44%。

正常条件下各处理高羊茅叶片 APX 酶活性均在 1.21~1.23 nmol·(mg·min)⁻¹, 且处理间无显著差异 ($P > 0.05$) (图 10)。在盐胁迫初期, APX 活性受

到 NaCl 诱导上升, 而后随着盐胁迫时间的延长逐渐下降。其中叶面喷施去离子水、K₂SO₄ 和 AsA 处理均在 14 d 达到峰值, 相较于 0 d 分别上升了 52.81%、57.09% 和 62.53%, 但 4 个处理间并无显著差异。叶面喷施 GB 处理在 21 d 达到峰值, 相较于 0 d 上升了 63.00%。自 21 d 开始直至处理结束, 喷施去离子水处理与其他 3 种处理相比均表现为差异显著 ($P < 0.05$)。盐胁迫下, 35 d 时各处理之间 APX 活性较之峰值均明显下降。值得注意的是, 盐胁迫下喷施去离子水和 K₂SO₄ 处理的高羊茅在 35 d 时 APX 活性均低于 0 d, 而喷施 GB、AsA 处理则明显高于 0 d。

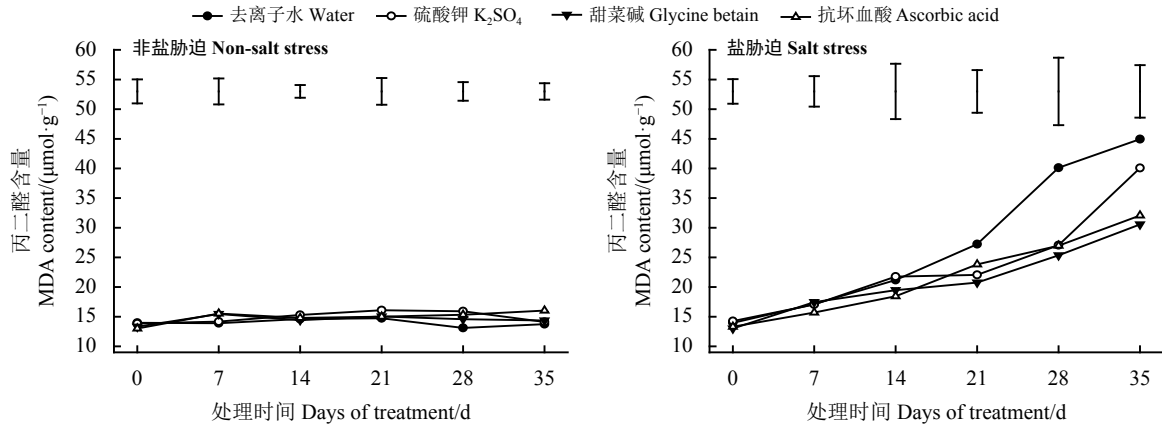


图7 非盐胁迫和盐胁迫下3种外源物对高羊茅丙二醛含量的影响

Figure 7 Effect of three substances on the MDA content of tall fescue under non-salt stress and salt stress

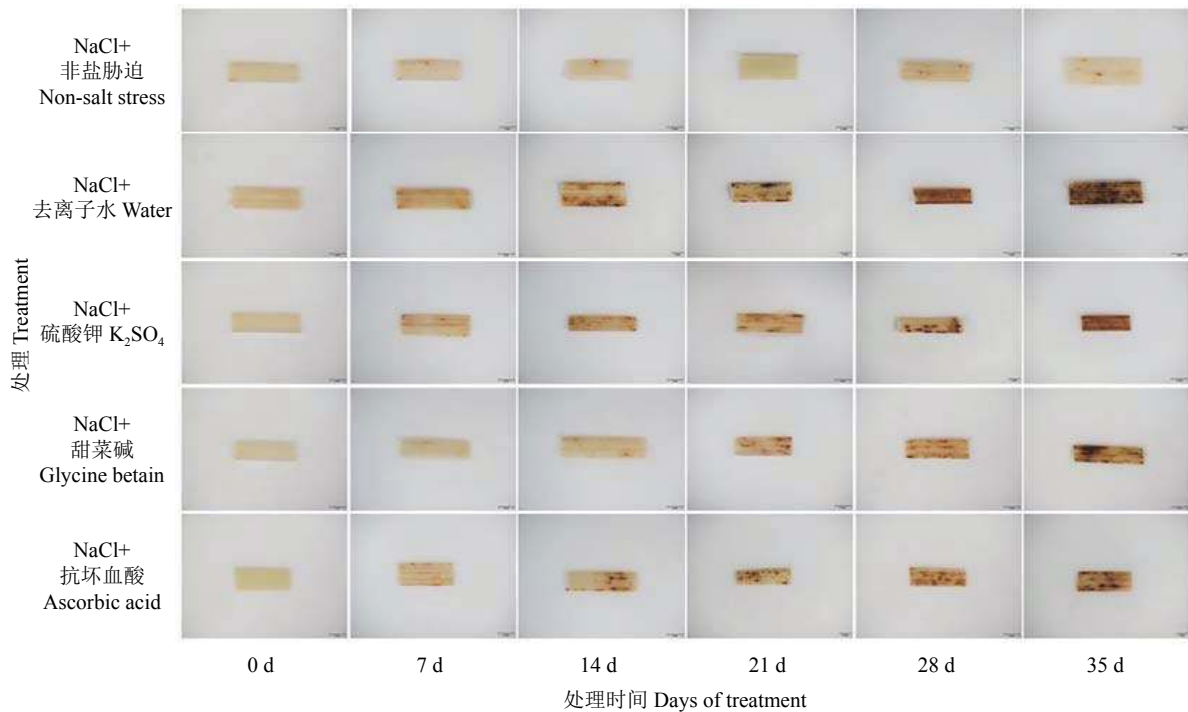


图8 非盐胁迫和盐胁迫下3种外源物对高羊茅叶片DAB染色观察

Figure 8 Effect of three substances on the DAB staining observed in tall fescue under non-salt stress and salt stress

3 讨论

3.1 3种外源物质可以改善盐胁迫下高羊茅的生长状态

在自然环境中,干旱、高温和盐害等非生物胁迫对植物生长造成不利的影响^[23],而草坪质量能够直观反映草坪受盐胁迫的程度。本研究中,高羊茅在 $250\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl的胁迫下生长缓慢,叶片逐渐枯黄、老化,外源喷施GB、AsA和 K_2SO_4 均可延缓盐胁迫下叶片枯黄,从而维持较好的草坪质量。其

中以喷施GB效果最佳,AsA次之, K_2SO_4 最差,说明相对于其他两个处理,喷施GB对盐胁迫下高羊茅的生长发育的促进作用更明显。

植物体内进行正常的生理生化反应均需水的参与,水分亏缺势必会影响植物的正常生长。因而,叶片相对含水量通常可以用来衡量植物在逆境中的生长情况,在盐胁迫条件下提高植物的持水能力尤为重要^[24]。本研究中,随着盐胁迫时间的增加,高羊茅叶片含水量持续下降,而喷施GB、AsA和 K_2SO_4 均可有效延缓盐胁迫中相对含水量的下降,且喷施

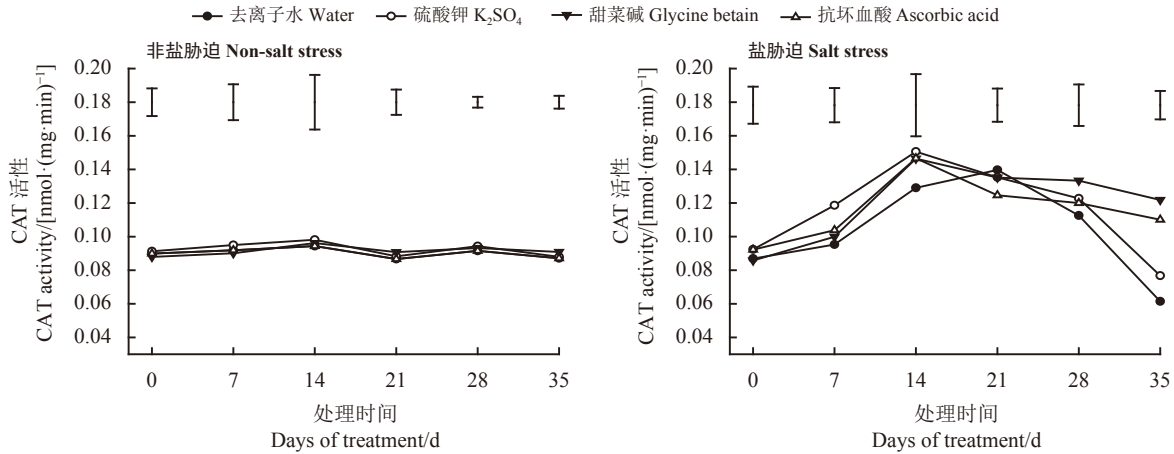


图 9 非盐胁迫和盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅 CAT 活性的影响

Figure 9 Effect of three substances on the CAT activity of tall fescue under non-salt stress and salt stress

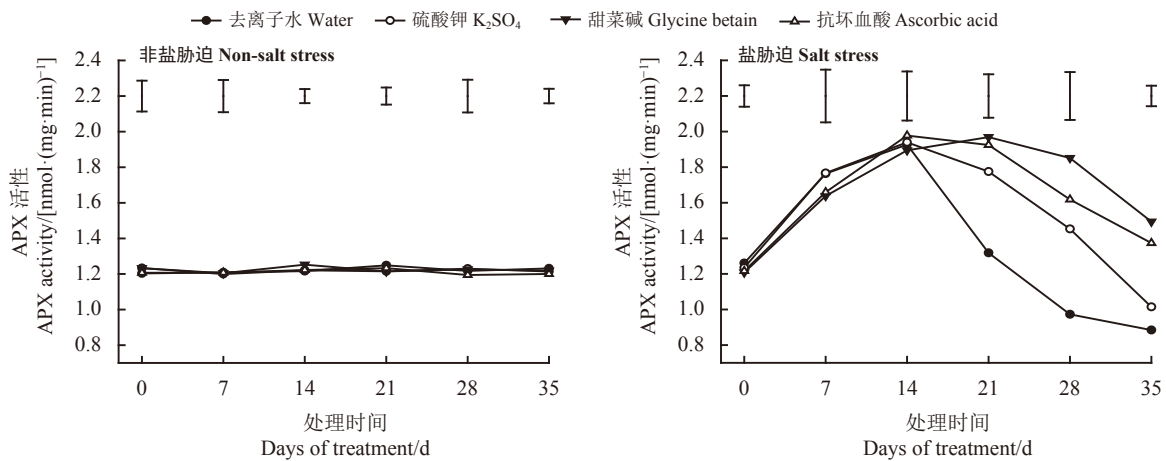


图 10 非盐胁迫和盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅 APX 活性的影响

Figure 10 Effect of three substances on the APX activity of tall fescue under non-salt stress and salt stress

GB 后叶片相对含水量下降速度慢于其他两个处理, 与草坪质量表现一致, 这表明 GB 处理在缓解植物由于水分缺失引起的生理代谢失调效果更好, 此结果在弯叶画眉草 (*Eragrostis curvula*)^[25] 和小麦^[26] 等植物中也得到了证实。

3.2 3 种外源物质可以促进盐胁迫下高羊茅的渗透调节能力和离子平衡

渗透调节是植物应对逆境时重要的生理调节机制之一^[27]。根据本研究结果, 叶面喷施 GB、K₂SO₄、AsA 均可以显著提高盐胁迫下高羊茅的渗透势, 其中喷施 GB 效果最佳, 可能由于甜菜碱本身是一种渗透调节物质, 同时可以诱导可溶性糖、脯氨酸等物质积累, 从而提高渗透调节作用^[26]。细胞质膜是隔开细胞与外界环境的一道屏障。盐胁迫下, 由于

细胞质膜透性增大而导致大量电解质外排, 故电解质渗漏率通常可以反映细胞膜的完整性和植物受胁迫的程度^[28]。本研究中, 高羊茅的电解质渗漏率随着盐处理时间的增加而显著上升, 这与江生泉等^[29] 对高羊茅耐盐性的研究结果相似, 说明盐胁迫下高羊茅细胞质膜的完整性和稳定性受到严重破坏。喷施 GB 后叶片电解质渗漏率增加程度低于喷施 AsA 和 K₂SO₄, 说明甜菜碱对盐胁迫下植物叶片的细胞膜有较强的保护作用, 在棉苗 (*Gossypium hirsutum*) 上也有类似的结果^[30]。

离子毒害也是 NaCl 伤害植物的一种主要形式^[31], 盐胁迫下, Na⁺等离子在植物体内大量积累, K⁺浓度降低, 破坏植物体内的水分和离子平衡, 最终对植株造成伤害^[32], 因此在盐胁迫条件下重建离子稳态

是提高植物耐受盐胁迫的策略之一。本研究在盐处理期间,叶面喷施 K_2SO_4 、GB 和 AsA 后,叶片中 Na^+ 积累速度变缓,这和盐胁迫下杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum*) 的试验结果一致^[33]。本研究中仅喷施 K_2SO_4 处理叶片 K^+ 浓度显著上升,在蒋乔峰等^[34] 对沟叶结缕草 (*Zoysia matrella*) 的研究中,盐胁迫导致叶片中 K^+ 浓度明显降低。这可能由于喷施 K_2SO_4 提供大量的 K^+ , 促进植物叶片对 K^+ 的吸收。以上结果说明在一定浓度的盐胁迫中,叶面喷施 GB 在抑制高羊茅叶片 Na^+ 浓度的增加引起的离子毒害作用以及维持叶片中离子平衡方面效果更佳。

3.3 3种外源物质可以提高盐胁迫下高羊茅的抗氧化能力

H_2O_2 是叶绿体中光电子传递与酶反应的产物,与自由基结合形成的 $\cdot OH$ 可以直接引发脂质过氧化,进而破坏植物细胞的结构和功能。同时, H_2O_2 在植物体中累积导致 AsA 含量降低,严重影响植物体内正常代谢^[35-36], 因此 H_2O_2 的含量可以直接反映植物体受胁迫的程度。研究结果表明叶面喷施 3 种物质均可以显著抑制盐处理下叶片中 H_2O_2 的积累,证明喷施 K_2SO_4 、GB 和 AsA 可以缓解盐胁迫对高羊茅叶片造成的氧化损伤。另外,喷施 GB 叶片颜色浅于喷施 K_2SO_4 和 AsA 的叶片,由此可知,高羊茅在盐胁迫条件下,叶面喷施 GB 缓解盐胁迫的效果优于 K_2SO_4 和 AsA。

植物受到胁迫时,体内活性氧的过量积累会造成细胞结构和功能的紊乱甚至导致其死亡,其自身

形成的保护酶体系可以使植物体内活性氧的产生和清除处于动态平衡^[37]。因此,逆境下植物体内的抗氧化酶活性被视为评价植物抗逆性的重要指标之一^[38]。CAT 可以催化 H_2O_2 分解,APX 可以利用抗坏血酸作为电子供体清除 H_2O_2 ^[39-40], 因此, CAT 和 APX 活性的增强可以显著提高植物体的抗逆性^[41]。本研究中, CAT 和 APX 活性均随着盐胁迫时间的增加表现出先增强后下降的趋势。这是由于在盐胁迫初期,植物体内产生了较多的 H_2O_2 , 诱导高羊茅 CAT 和 APX 活性增强,但随着盐胁迫时间的增加,当盐胁迫超过了植物所能忍受的“阈值”后,这两种酶活性均显著降低。叶面喷施 GB 和 AsA 均显著提升了 CAT 和 APX 酶活性,这个结果在紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、油菜 (*Brassica napus*) 种子中得到了证实^[13,42], 说明 GB 和 AsA 可以增强盐胁迫下高羊茅的抗氧化酶活性,进而提升高羊茅的耐盐性,且喷施 GB 效果更佳。然而叶面喷施 K_2SO_4 的研究结果与郑延海等^[12] 对小麦的研究结果不符,究其原因可能是 K_2SO_4 对盐胁迫的缓解并非通过抗氧化途径实现,而是通过提高 K^+ 浓度达到离子平衡实现的。

4 结论

综合高羊茅在试验过程中的生理生态指标发现,外源喷施 GB 可以提升高羊茅在盐胁迫下的草坪质量、叶片相对含水量,降低电解质渗漏率,并通过提高渗透调节能力和抗氧化酶活性在一定程度上缓解盐胁迫的伤害,效果优于喷施 K_2SO_4 和 AsA。

参考文献 References:

- [1] SAIRAM R K, RAO K V, SRIVASTAVA G. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science*, 2002, 163(5): 1037-1046.
- [2] 陈兰, 黄广远. 多效唑对盐胁迫下高羊茅耐盐性的应用. *草业科学*, 2009, 26(8): 177-180.
CHEN L, HUANG G Y. Effect of paclobutrazol on the salt tolerance of *Festuca arundinacea*. *Pratacultural Science*, 2009, 26(8): 177-180.
- [3] ARZANI A. Improving salinity tolerance in crop plants: A biotechnological view. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 2008, 44(5): 373-383.
- [4] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3): 324-349.
- [5] WANG X W, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 2003, 218(1): 1-14.
- [6] XIE Y, HAN S, LI X, AMOMBO E, FU J. Amelioration of salt stress on bermudagrass by the fungus *Aspergillus aculeatus*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2017, 30(3): 245-254.

- [7] ACOSTA M J R, ORTUNO M F, BERNAL V A, DIAZ V P, SANCHEZ B M J, HERNANDEZ J A. Plant responses to salt stress: *Adaptive mechanisms*. *Agronomy*, 2017, 7(1): 18-55.
- [8] KINNERSLEY A M, TURANO F J. Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2000, 19(6): 479-509.
- [9] 董丽华, 姚爱兴, 王宁. 盐分对草坪草影响研究概述. *西北林学院学报*, 2006(1): 64-67.
DONG L H, YAO A N, WANG N. A review on salinity tolerance of turfgrass. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006(1): 64-67.
- [10] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 206-216.
- [11] ARAANI A, ASHRAF M. Smart engineering of genetic resources for enhanced salinity tolerance in crop plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2016, 35(3): 1-44.
- [12] 郑延海, 宁堂原, 贾爱君, 李增嘉, 韩宾, 江晓东, 李卫东. 钾营养对不同基因型小麦幼苗 NaCl 胁迫的缓解作用. *植物营养与肥料学报*, 2007(3): 381-386.
ZHENG Y H, NING T Y, JIA A J, LI Z J, HAN B, JIANG X D, LI W D. Amortizing functions of potassium nutrition on different genotypes wheat seedling under NaCl stress. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007(3): 381-386.
- [13] 马婷燕, 李彦忠. 外源甜菜碱对 NaCl 胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗抗性的影响. *草业科学*, 2019, 36(12): 3100-3110.
MA T Y, LI Y Z. Effects of exogenous betaine on alfalfa seed germination and seedling resistance under NaCl stress. *Pratacultural Science*, 2019, 36(12): 3100-3110.
- [14] 江绪文, 李贺勤, 王建华. 盐胁迫下黄芩种子萌发及幼苗对外源抗坏血酸的生理响应. *植物生理学报*, 2015, 51(2): 166-170.
JIANG X W, LI H Q, WANG J H. Physiological response of *Scutellaria baicalensis* seed germination and seedling to exogenous ascorbic acid under salt stress. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(2): 166-170.
- [15] XIE Y, SUN X Y, FENG Q J, LUO H J, WASSIE M, AMEE M, AMOMBO E, CHEN L. Comparative physiological and metabolomic analyses reveal mechanisms of *Aspergillus aculeatus*-mediated abiotic stress tolerance in tall fescue. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 142: 342-350.
- [16] YANG M, YU J, MEREWITZ E, HUANG B R. Differential effects of abscisic acid and glycine betaine on physiological responses to drought and salinity stress for two perennial grass species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2012, 137(2): 96-106.
- [17] 樊瑞苹. 外源抗坏血酸对盐胁迫下高羊茅生长的影响及调控机理. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2010.
FAN R P. Study on the effect of ascorbic acid on growth and regulation mechanism of tall fescue under salt stress. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [18] TURGEON A J. Turfgrass Management. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [19] BARRS H, WEATHERLEY P. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1962, 15(3): 13-28.
- [20] ZHU G L, ZHONG H W, ZHANG A Q. *Plant Physiology Experiment*. Beijing: Peking University Press, 1990.
- [21] AEBI H. Catalase in Vitro. *Methods Enzymology*. America: Academic Press, 1984, 105: 121-126.
- [22] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [23] VALLIYODAN B, NGUYEN H T. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9(2): 189-195.
- [24] CATHEY E, KRUSE J K, SINCLAIR T R, DUKES M D. Tolerance of three warm-season turfgrasses to increasing and prolonged soil water deficit. *HortScience*, 2011, 46(11): 1550-1555.
- [25] 陈兰, 胡南, 费永俊. 不同盐度对弯叶画眉草生长的影响. *安徽农学通报*, 2006(8): 44-45.
CHEN L, HU N, FEI Y J. Effect of different salinity on the growth of eyebrow grass in bent leaves. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2006(8): 44-45.
- [26] 梁超. 过量积累甜菜碱改善小麦耐盐性的生理机制研究. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2007.
LIANG C. Physiological mechanism of excessive accumulation of betaine to improve salt tolerance in wheat. Master Thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.

- [27] MUNNS R, GILLIHAM M. Salinity tolerance of crops-what is the cost. *New Phytologist*, 2005, 208: 668-673.
- [28] 王玉凤. 玉米苗期对NaCl胁迫的响应与耐盐性调控机理的研究. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2008.
WANG Y F. Responses of maize seedling under NaCl stress and the regulatory mechanism of salt tolerance. PhD Thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008.
- [29] 江生泉, 薛正帅, 李晨, 汤士勇, 杨志民. 外源乙硫氨酸对盐胁迫下高羊茅的缓解效应. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 179-186.
JIANG S Q, XUE Z S, LI C, TANG S Y, YANG Z M. Alleviation effect of exogenous ethionine on tall fescue under salt stress. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 42(1): 179-186.
- [30] 李玉静, 宋宪亮, 杨兴洪, 刘娟, 李学刚, 朱玉庆, 孙学振, 王振林. 甜菜碱浸种对棉苗耐盐性的影响. *作物学报*, 2008(2): 305-310.
LI Y J, SONG X L, YANG X H, LIU J, LI X G, ZHU Y Q, SUN X Z, WANG Z L. Effects of seed soaking with Glycinebetaine on the salt tolerance of cotton seedlings. *Acta Agronomica Sinica*, 2008(2): 305-310.
- [31] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.
- [32] TESTER M, DAVENPORT R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany*, 2003, 91(5): 503-527.
- [33] 康爱平, 刘艳, 王殿, 王宝山, 陈敏. 钾对能源植物杂交狼尾草耐盐性的影响. *生态学报*, 2014, 34(20): 5793-5801.
KANG A P, LIU Y, WANG D, WANG B S, CHEN M. The effect of K on the salt tolerance of the bioenergy plant hybrid *Pennisetum*. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5793-5801.
- [34] 蒋乔峰, 陈静波, 宗俊勤, 李珊, 褚晓晴, 郭海林, 刘建秀. 盐胁迫下磷素对沟叶结缕草生长及Na⁺和K⁺含量的影响. *草业学报*, 2013, 22(3): 162-168.
JIANG Q F, CHEN J B, ZONG J F, LI S, CHU X J, GUO H L, LIU J X. Effect of phosphorus on Na⁺ and K⁺ concentrations and the growth of *Zoysia matrella* under salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 162-168.
- [35] YAMASAKI H, SAKIHAMA Y, IKEHARA N. Flavonoid-peroxidase reaction as a detoxification mechanism of plant cells against H₂O₂. *Plant Physiology*, 1997, 115(4): 5-12.
- [36] THORDAL H, ZHANG Z G, WEI Y D, COLLINGE D B. Subcellular localization of H₂O₂ in plants. H₂O₂ accumulation in papillae and hypersensitive response during the barley-powdery mildew interaction. *The Plant Journal*, 1997, 11(6): 87-94.
- [37] BIAN S, JIANG Y. Reactive oxygen species, antioxidant enzyme activities and gene expression patterns in leaves and roots of kentucky bluegrass in response to drought stress and recovery. *Scientia Horticulturae*, 2009, 120(2): 264-270.
- [38] 邓苕明, 熊格生, 袁小玲, 刘志. 棉花不同耐高温品系的SOD、POD、CAT活性和MDA含量差异及其对盛花期高温胁迫的响应. *棉花学报*, 2010(3): 242-247.
DEN J M, XIONG G S, YUAN X L, LIU Z. Differences in SOD, POD, CAT activities and MDA content and their responses to high temperature stress at peak flowering stage in cotton lines with different tolerance to high temperature. *Cotton Science*, 2010(3): 242-247.
- [39] 孙卫红, 王伟青, 孟庆伟. 植物抗坏血酸过氧化物酶的作用机制、酶学及分子特性. *植物生理学通讯*, 2005(2): 143-147.
SUN W H, WANG W Q, MENG Q W. Functional mechanism and enzymatic and molecular characteristic of ascorbate peroxidase in plants. *Plant Physiology Journal*, 2005(2): 143-147.
- [40] SHAN J, HAN L, LIANG S. Responses to drought stress of the biosynthetic and recycling metabolism of glutathione and ascorbate in *Agropyron cristatum* leaves on the loess plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(6): 53-62.
- [41] PAYTON P, WEBB R, KORNYEYEV D, ALLEN R, HOLADAY A S. Protecting cotton photosynthesis during moderate chilling at high light intensity by increasing chloroplastic antioxidant enzyme activity. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(365): 2345-2354.
- [42] 范美华, 张义鑫, 石戈, 崔大练, 李鹏. 外源抗坏血酸对油菜种子在海水胁迫下萌发生长的影响. *中国油料作物学报*, 2009, 31(1): 34-38.
FAN M H, ZHANG Y X, SHI G, CUI D L, LI P. Effects of exogenous ascorbic acid on seed germination and growth of *Brassica napus* under seawater stress. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(1): 34-38.

(责任编辑 张瑾)