

水杨酸对盐胁迫下不同饲草种子萌发的影响

贾述林¹,张玉苗¹,王凤垚²,王陆鑫¹,盖梓译¹,李世超³,罗永开^{4*},刘智全^{5*}

1. 山东航空学院生物与环境工程学院, 山东 滨州 256603

2. 山东农业大学园艺学院, 山东 泰安 271018

3. 滨州市国土空间生态修复中心, 山东 滨州 256603

4. 山东航空学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603

5. 中国科学院植物研究所, 北京 100093

摘要: 盐胁迫严重影响植物的生长发育,尤其是在植物种子萌发阶段。水杨酸的施用能够有效缓解盐胁迫对植物的危害,但目前关于饲草的相关研究较为匮乏。本文以甜高粱(科甜2号)和苜蓿(中苜1号和中苜3号)为研究对象,探讨了150 mmol·L⁻¹盐溶液胁迫对三种饲草种子萌发的抑制效应,并设置了0 mmol·L⁻¹、0.3 mmol·L⁻¹、0.6 mmol·L⁻¹、0.9 mmol·L⁻¹ 4个浓度外施水杨酸处理,研究不同浓度外施水杨酸在盐胁迫条件下对种子萌发和幼苗生长的缓解作用。结果表明:盐胁迫显著抑制了3种饲草的种子萌发过程,150 mmol·L⁻¹的盐胁迫下,3种饲草的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长和苗长均受到不同程度的抑制;施用水杨酸能够有效缓解盐胁迫对饲草种子萌发的负面影响,不同饲草适宜外施水杨酸浓度不同,中苜1号和中苜3号在0.6 mmol·L⁻¹浓度下的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数等指标都有显著的促进作用,甜高粱则在0.9 mmol·L⁻¹浓度下表现出最有效的促进效果;隶属函数分析结果显示,科甜2号的耐盐性最强,总得分为0.516。本研究的结果有助于深入理解水杨酸提升饲草耐盐性的内在机制,并对盐碱地的开发和利用提供一定的理论指导。

关键词: 甜高粱; 苜蓿; 盐胁迫; 水杨酸添加; 种子萌发

中图法分类号: S544+.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0841-08

Salicylic Acid on Seed Germination of Different Forage Grasses under Salt Stress

JIA Shu-lin¹, ZHANG Yu-miao¹, WANG Feng-yao², WANG Lu-xin¹, GAI Zi-yi¹, LI Shi-chao³, LUO Yong-kai^{4*}, LIU Zhi-quan^{5*}

1. College of Biological and Environmental Engineering/Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China

2. College of Horticulture/Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, China

3. Binzhou City Land Space Ecological Restoration Center, Binzhou 256603, China

4. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China

5. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, No.20 Nanxincun, Xiangshan, Beijing 100093, China

Abstract: Salt stress severely affects plant growth and development, especially during the seed germination stage. The application of salicylic acid can effectively alleviate the damage caused by salt stress to plants, but relevant research on forage grasses is currently scarce. Using sweet sorghum (Ke Tian 2) and alfalfa (Zhong Mu 1 and Zhong Mu 3) as experimental materials, this study investigates the inhibitory effects of 150 mmol·L⁻¹ salt solution stress on seed germination of the three forage species. Moreover, it applies four concentrations of exogenous salicylic acid treatments (0 mmol·L⁻¹, 0.3 mmol·L⁻¹, 0.6 mmol·L⁻¹, and 0.9 mmol·L⁻¹) to examine their alleviating effects of different concentrations of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling growth under salt stress. The results show that salt stress significantly inhibits the seed germination process of the three forage grasses. Under 150 mmol·L⁻¹ salt stress, the germination rate, germination potential, germination index, vigor index, root length, and seedling length of the three forage species are inhibited to varying degrees. The application of salicylic acid can effectively alleviate the negative impact of salt stress on forage seed germination, and the suitable concentration of exogenous salicylic acid varies among different forage grasses. For Zhongmu 1 and Zhongmu 3, the 0.6 mmol·L⁻¹ concentration significantly promotes indicators such as germination rate,

收稿日期: 2024-12-18

修回日期: 2025-08-29

基金项目: 马铃薯-牧草作物轮间高产栽培技术集成与产业化示范项目(2022YFXM0004)

第1作者简介: 贾述林(2003-),男,本科生,研究方向:作物育种。E-mail:17753301143@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:yongkailuo@126.com;zhqliu@idcas.ac.cn

germination potential, germination index, and vigor index. Sweet sorghum, on the other hand, shows the most effective promotion at a concentration of $0.9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Membership function analysis reveals that Ke Tian 2 achieves the highest salt tolerance score of 0.516. The findings of this study contribute to a deeper understanding of the intrinsic mechanisms by which salicylic acid enhances the salt tolerance of forage, and provide theoretical guidance for the development and utilization of saline-alkali land.

Keywords: Sweet sorghum; alfalfa; salt stress; salicylic acid addition; seed germination

土地盐碱化已经发展为全球严重的生态和环境问题之一^[1,2]。我国现有盐碱地面积达 $1\times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[3],并存在着逐年扩大的趋势^[4],其中约 4/5 没有得到合理的开发利用,因此盐碱地的治理和改良开发利用已成为农业生产亟需解决的问题^[5]。耐盐作物种植是改良利用盐碱地的有效措施之一。

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是一种多年生品质优良地豆科牧草植物,随着不断的推广种植,在我国广大地区已成为重要的饲料作物之一,被认为具有良好的抗旱^[6]、抗寒^[7]、抗盐碱^[8]、固氮^[9]等优点,但其耐盐性不高,且不同品种的耐盐能力存在显著差异。甜高粱 (*Sorghum bicolor var. dochna*) 作为普通粒用高粱的一个变异种,特点是抗逆性强、营养丰富和含糖量高,是一种优质的能源^[10]及饲料作物^[11]。甜高粱是一种 C4 植物,对比于 C3 植物,其具有更高的光合作用效率,因此其植株高大,生物产量高,被称为“高能作物”^[12]。与此同时,甜高粱茎秆富含汁液和糖分,可作为优质的青贮饲料使用^[13,14],甜高粱同样是牛羊等反刍动物青贮饲料的主要来源之一。不仅如此,甜高粱还具有较强的抗旱性^[15]和耐盐碱性^[16],可作为盐碱地等边际性土地开发利用的先锋植物。

水杨酸一种化学简单的酚类化合物 (salicylic acid, SA) 又称邻羟基苯甲酸,是植物体内的一种内源性激素^[17,18]。研究发现,SA 在植物抵抗干旱、寒冷等逆境环境中发挥着重要的作用^[19,20]。在植物耐盐方面,SA 对于提高植物适应盐胁迫能力方面也已有大量的研究,然而,目前这些研究多集中在蔬菜和粮食作物上,例如,施加 SA 能够有效缓解盐胁迫对于苦瓜^[21]、辣椒^[22]、蚕豆^[23]、棉花^[24]、黄瓜^[25]、小麦^[26]的负面影响。SA 主要作用机理是其作为植物体内重要的信号传导分子,可通过调节离子吸收与转运、提高光合作用、增强细胞膜稳定性、促进根系生长等生理过程,提高植物对逆境胁迫的耐受能力。

传统粮食和蔬菜作物固然重要,饲草在保障我国饲料粮食安全以及开发利用盐碱地方面也发挥着不可替代的作用^[27]。在盐碱地的开发利用上,饲草由于具有较强的耐逆性而占据优势,但饲草本身也有一定的耐受限度。原有耐逆性基础上,施加 SA 是否会进一步提高牧草的耐逆性尤其是对盐碱胁迫的耐受程度,对于不同牧草最适宜的外施水杨酸浓度又是多少目前尚缺乏系统报道。

为此,本文以甜高粱和苜蓿为研究对象,在植物耐盐性的关键时期种子萌发期,设置 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 4 个水杨酸浓度梯度,探讨盐胁迫条件下不同浓度水杨酸溶液处理对不同饲草种子萌发和幼苗生长的影响,为水杨酸调节不同饲草耐盐机制以及最适浓度提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

本试验选用的苜蓿、甜高粱品种分别为中苜 1 号、中苜 3 号和科甜 2 号。其中,科甜 2 号由中国科学院植物研究所提供(2023 年 9 月收获)。中苜 1 号和中苜 3 号两种实验材料均从北京克劳沃草业中心购买(2022 年 9 月收获)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验准备 试验于 2024 年 6 月份在山东航空学院生理生化实验室内进行。试验开始前,挑选三种饲草完整、无破损的种子先用蒸馏水清洗完毕,之后使用 0.3% 的次氯酸钠溶液处理 15 min。处理结束后,再次使用蒸馏水对种子进行清洗。

1.2.2 试验设计 本试验对 3 种饲草分别设置 5 种处理,CK、 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。CK 只加入蒸馏水,不加入盐溶液同时不使用水杨酸浸泡, $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 在使用对应浓度的水杨酸浸泡之后置于 $150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液中。本试验中 CK 和 $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 两处理

种子萌发表现之间的差异用来表示盐胁迫对种子萌发的抑制作用。

具体的试验过程如下:将消毒过的饲草种子放入不同处理溶液中浸泡12 h。浸泡完成后,使用吸水纸将种子表面的水分吸干。之后在内径10 cm的培养皿底部水平放置两层滤纸,在滤纸上均匀摆放30粒种子,在 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 四个处理加入10 ml $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaCl溶液,CK加入相同量的蒸馏水。定时补充盐溶液,以保持盐的浓度恒定。每2 d更新一次滤纸,以防止盐分累积和霉菌生长对饲草种子萌发产生不利影响。

1.3 测定指标

我们将3种饲草种子的发芽期设定为7 d,在这个过程中,我们每天记录3种饲草种子的发芽数量,并通过以下公式来计算种子的发芽率、发芽势、发芽指数等相关参数^[28]。

发芽率(%) = 发芽种子数 / 种子总数 × 100%。

发芽势(%) = (第4天发芽种子数 / 种子总数) × 100%;

发芽指数 = \sum (发芽种子总数 / 种子总数) × 100%

活力指数 = 发芽率 × 种苗生长量

在发芽期的第5天,从每一个培养皿中挑选生长正常的10株饲草种子幼苗,测量它们的芽长、根长以及干重等指标。

芽长:使用卷尺直接测量发芽植株根部以上的长度。

根长:使用卷尺直接测量发芽植株从根和芽接点处到最长根尖的长度。

干重:挑选20株发芽幼苗,放入 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干24 h,使用万分之一天平测量随机10株幼苗的总干重,相同处理3次,取平均值。

饲草耐盐性综合评价:计算3种饲草种子发芽率、发芽势、根长、芽长、干重等5个指标的隶属函数值,取5个指标的平均值作为该品种耐盐性的综合得分。隶属函数计算公式如下^[29]:

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

式中, X_i 为参试种子某一指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为所有种子中该指标的最大值和最小值。

1.4 数据处理

图表的制作和数据的处理使用Microsoft Excel 2016软件完成,利用SPSS 22.0进行显著性分析,并应用Duncan的多重比较方法,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫条件下水杨酸添加对3种饲草种子萌发期发芽特性的影响

3种饲草种子CK处理的发芽率明显高于 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,表明高浓度盐溶液对饲草种子的萌发产生了一定的抑制作用。添加水杨酸的3个处理,饲草种子的发芽率总体上也高于 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,说明水杨酸对于盐胁迫有一定的缓解作用。随着水杨酸浓度的升高,中苜1号和中苜3号的发芽率呈现先下降,后上升,最后下降的变化趋势,而科甜2号则逐步升高。在盐胁迫条件下,科甜2号在 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下发芽率最高,为85.00%。中苜1号和中苜3号则是在 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下发芽率最高,分别为90.95%和91.43%(图1)。与发芽率表现趋势一致,3种饲草种子CK处理的发芽势要高于 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。添加水杨酸后,科甜2号在 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时发芽势存在值最高,为90.00%,而中苜1号和中苜3号在 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时发芽势存在最高值,均为88.30%(图2)。

3种饲草种子的发芽指数CK都要明显高于 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理。在水杨酸作用下,3种饲草种子的发芽指数有所提升。苜蓿的发芽指数随水杨酸浓度的增加出现前期下降,中期上升,后期下降的趋势,甜高粱的发芽指数则随水杨酸浓度的增加而逐渐上升。在 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下,科甜2号的发芽指数达到最大值,为63.10%,而中苜1号和中苜3号在 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下达到最大,分别为66.50%和67.50%(图3)。

2.2 盐胁迫条件下水杨酸添加对3种饲草种子平均发芽天数的影响

由图4所示,3种饲草CK处理平均发芽天数要高于 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理,但两者之间的差异不显著。一定浓度的外施水杨酸增加了盐胁迫下3种饲草种子平均发芽的天数。在盐胁迫条件

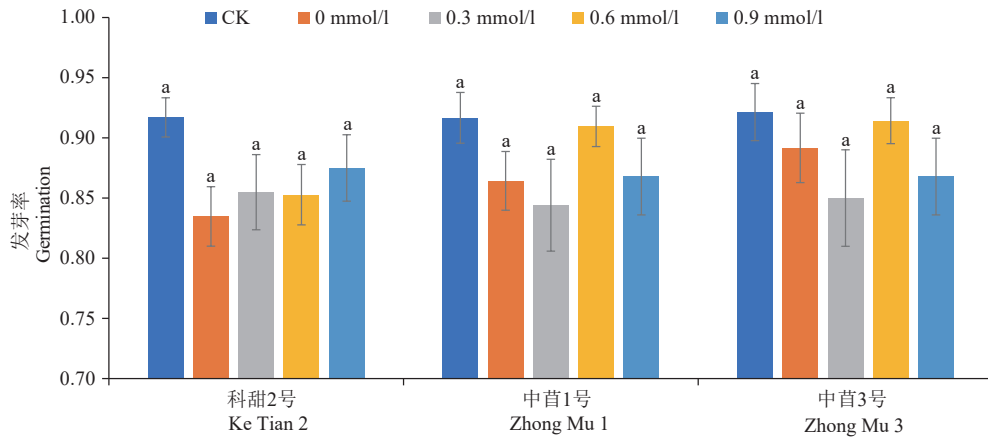


图 1 水杨酸对盐胁迫下 3 种饲草种子发芽率的影响

Fig. 1 Salicylic acid on the germination rate of three forage seeds under salt stress

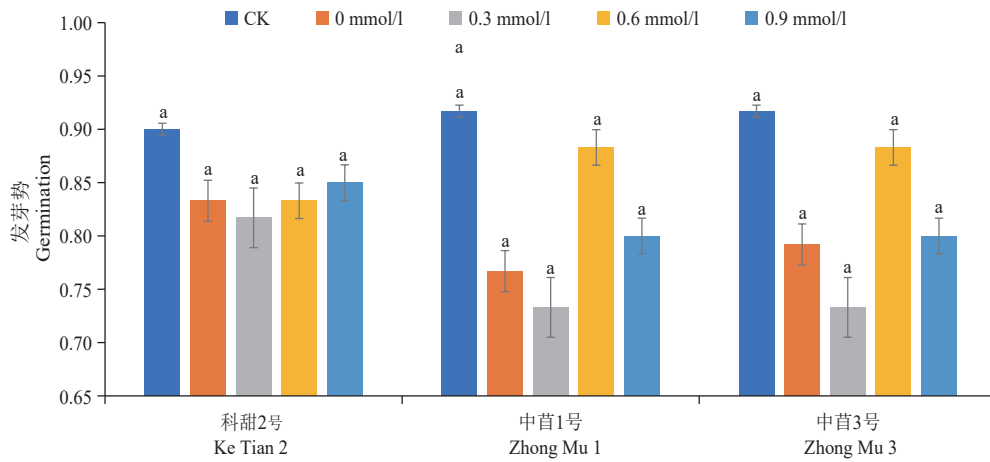


图 2 水杨酸对盐胁迫下 3 种饲草种子发芽势的影响

Fig. 2 Salicylic acid on the germination potential of three forage seeds under salt stress

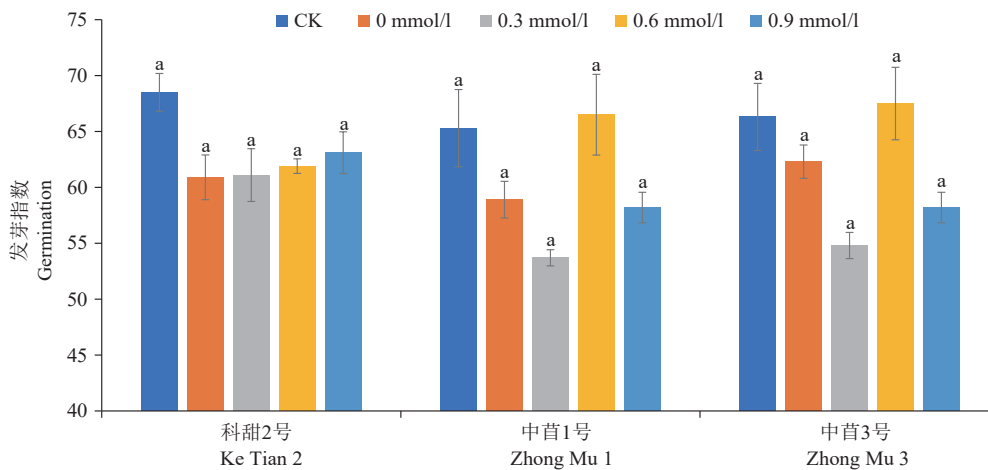


图 3 水杨酸对盐胁迫下 3 种饲草种子发芽指数的影响

Fig. 3 Salicylic acid on germination index of three forage seeds under salt stress

下,科甜 2 号在 0.6 mmol·L⁻¹时达最小值,为 4.13 d,中苜 3 号在 0.6 mmol·L⁻¹时达最小值,为 4.13 d,中苜 1 号在 mmol·L⁻¹时达最小值,为 4.11 d。

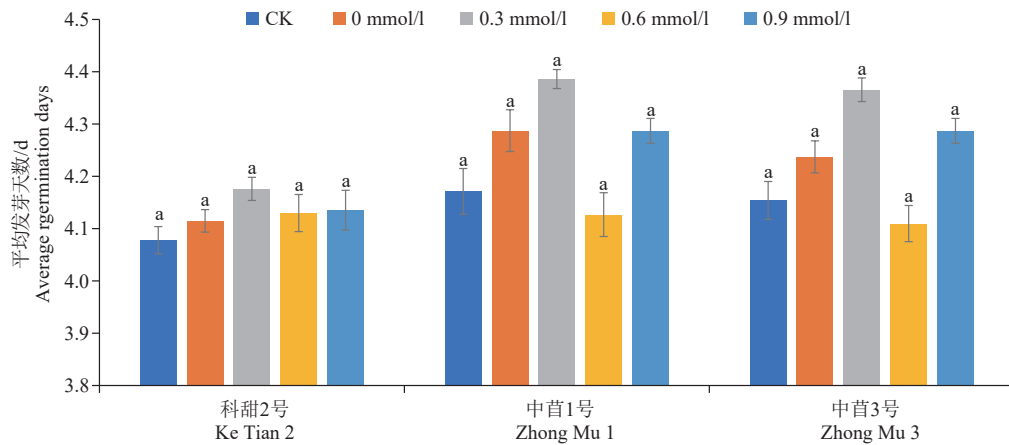


图4 水杨酸对盐胁迫下3种饲草种子平均发芽天数的影响

Fig. 4 Salicylic acid on the average germination days of three forage seeds under salt stress

2.3 盐胁迫条件下水杨酸添加对3种饲草种子幼苗根长、芽长的影响

相对于CK处理,0 mmol·L⁻¹处理下的3种饲草种子幼苗根长显著降低($P < 0.05$)。盐胁迫对中苜1号造成的影响最大,0 mmol·L⁻¹处理下根长为2.04 cm,相对于CK处理下降了70.0%。在四个

外施水杨酸处理中,科甜2号根长在0.9 mmol·L⁻¹处理下根长最大为4.41 cm,但与其他3个水杨酸处理差异不显著。随着水杨酸浓度的升高,中苜1号根长先增大后减小,中苜3号逐渐减小。中苜1号、中苜3号分别在0.6 mmol·L⁻¹、0 mmol·L⁻¹根长达到最大,分别为2.22 cm、2.44 cm(图5)。

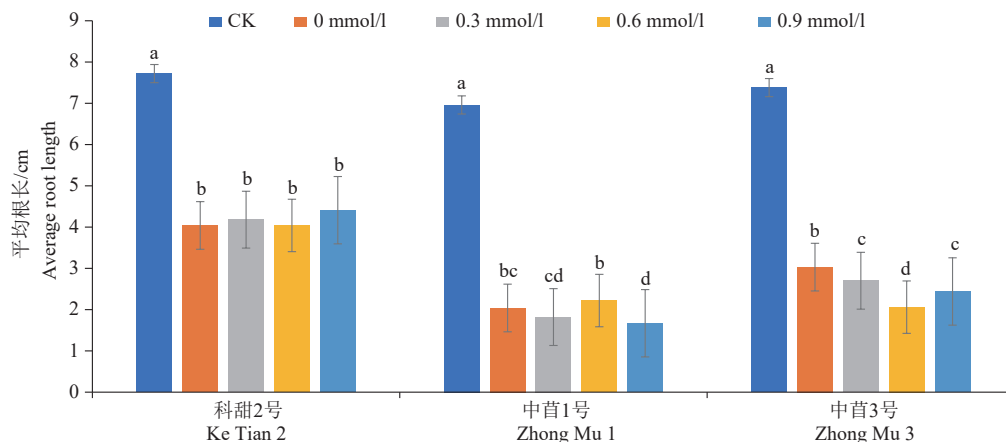


图5 水杨酸对盐胁迫下3种饲草种子萌发期平均根长的影响

Fig. 5 Salicylic acid on the average root length during the germination period of three forage seeds under salt stress

相对于CK处理,0 mmol·L⁻¹处理下的甜高粱、苜蓿种子幼苗苗长显著降低,说明盐胁迫抑制了饲草种子幼苗地上部分的生长。在不同浓度的水杨酸处理中,科甜2号种子苗长在0.3 mmol·L⁻¹时最小,在0.9 mmol·L⁻¹最大为2.04 cm,不同处理之间差异不显著。中苜1号种子苗长随水杨酸浓度的增加呈现出逐渐减小的趋势。中苜3号种子苗长随水杨酸浓度的增加呈现出先升高后下降的趋势。中苜1号、中苜3号分别在0 mmol·L⁻¹、0.3 mmol·L⁻¹苗长达到最

大,分别为、0.59 cm、1.00 cm(图6)。

2.4 耐盐性综合评价

饲草耐盐性是饲草体内复杂能量代谢反应以及各种生理生化过程综合作用的结果,隶属函数法可以对饲草多种指标进行综合评价,从而很好的表征饲草耐盐性的高低。由表1可知,根据综合5项指标的平均值计算得出的总得分进行排名,耐盐性由高到低分别为:科甜2号>中苜1号>中苜3号(表1)。

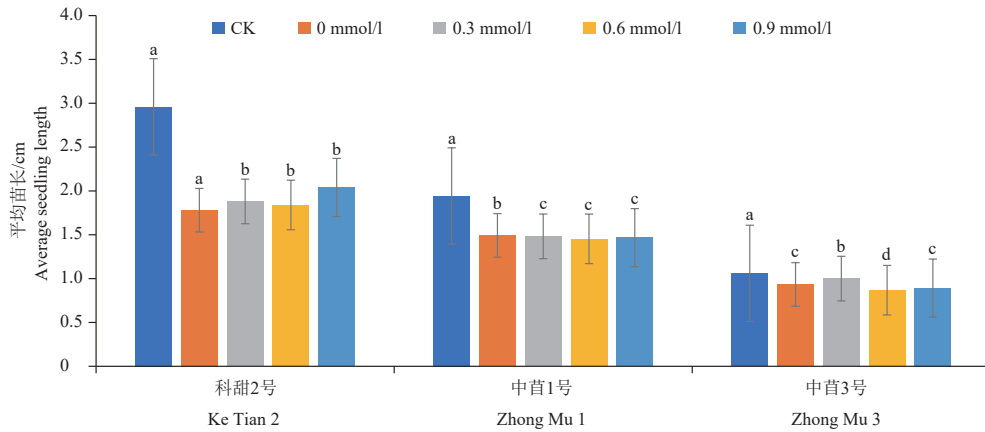


图 6 水杨酸对盐胁迫下 3 种饲草种子萌发期平均苗长的影响

Fig. 6 Salicylic acid on the average seedling length during the germination period of three forage seeds under salt stress

表 1 不同饲草种子隶属函数评价

Table 1 Evaluation of different grass seed membership functions

| 品种名称 Variety name | 各指标得分 Score of each index | | | | | 总得分 Total score | 排名 Rank |
|----------------------|------------------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|---|--------------------|------------|
| | 相对发芽率 Relative germination rate | 相对发芽势 Relative germination potential | 相对根长 Relative root length | 相对苗长 Relative seedling length | 相对平均发芽天数 Relative average germination days | | |
| 科甜 2 号 Ke Tian 2 | 0.69 | 0.45 | 0.45 | 0.54 | 0.45 | 0.516 | 1 |
| 中苜 1 号 Zhong Mu 1 | 0.80 | 0.66 | 0.29 | 0.25 | 0.49 | 0.498 | 2 |
| 中苜 3 号 Zhong Mu 3 | 0.74 | 0.50 | 0.14 | 0.14 | 0.50 | 0.404 | 3 |

3 讨论

种子萌发是植物生命的开始,种子萌发的好坏对植物后续的生长有着重要的影响。盐胁迫会抑制植物种子的萌发和幼苗的正常生长^[30,31],通常来说,盐胁迫越重,种子的发芽情况就会越差^[32]。种子萌发期是植物对盐胁迫较为敏感的阶段,提高该时期的耐盐性对于植物适应高盐土壤环境至关重要^[33,34]。种子发芽势、发芽指数、平均发芽天数和活力指数是研究饲草种子在高盐环境下萌发常采用的关键指标^[35],也是衡量种子发芽潜力及种子质量水平的重要依据^[36]。

本研究中 CK 和 0 mmol·L⁻¹ 两处理之间的对比可反映出 150 mmol·L⁻¹ 盐胁迫对不同饲草种子萌发的影响以及饲草对盐胁迫的适应能力。从试验结果可以看出 3 种饲草种子 CK 处理的发

芽率以及发芽势明显高于 0 mmol·L⁻¹。发芽指数和平均发芽时间是两项反映植物整体发芽表现的重要指标,这两项指标中同样表明 CK 处理要明显高于 0 mmol·L⁻¹ 处理。除此之外,3 种饲草幼苗的根长和芽长 CK 处理也显著高于 0 mmol·L⁻¹ 处理。以上结果都表明一定浓度的氯化钠溶液对饲草种子的萌发产生了明显的抑制作用。这可能是由于高盐浓度条件抑制了种子中相关代谢酶的活性,从而导致种子萌发活力降低。上述结果也与徐楠等^[37]对苜蓿的耐盐性研究结果一致。

水杨酸能促进细胞的生长和分裂膨大,提高种子内部酶的活性并促进生理代谢从而提高植物的耐逆性^[38-41],本研究同样证实了水杨酸对饲草种子耐盐性的提升作用,一定浓度的外施水杨酸有效提高了 3 种饲草种子的发芽率、发芽势和

发芽指数。但不同饲草品种,其最适宜的水杨酸处理浓度有所区别,对于甜高粱来说,在水杨酸浓度为 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其发芽率、发芽势和发芽指数达到最高,由于本试验时间有限,水杨酸最高浓度只设置到 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,更高浓度外施水杨酸是否会更有利于科甜2号种子的萌发,还需要未来进一步深入探讨。对于两个苜蓿品种来说,都是在水杨酸浓度为 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其上述指标表现最好。不同品种适应添加的水杨酸浓度不同可能受植物本身生长特性的影响,相关牧草和树木的研究也同样证实了这一点。例如,舒欣等^[42]对水杨酸缓解老芒麦种子的盐胁迫研究发现,在 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 胁迫下,外源添加水杨酸能减缓盐胁迫对老芒麦造成的抑制作用,其中水杨酸浓度为在 $0.25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 缓解效果最为明显。张泽龙等^[43]发现表明外施水杨酸降低了红豆草膜脂过氧化水平,维持了膜系统的完整性,在水杨酸浓度为 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时缓解盐害效果最佳。罗春燕等^[44]发现 NaCl 胁迫能抑制银杏的生长和光合作用, NaCl 胁迫下添加浓度为 $0.10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸达到最佳缓解效果, $0.02\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 效果略次, $0.50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水杨酸的缓解作用则较为局限。

由于甜高粱种子要比苜蓿种子大,可用于幼芽和幼根生长的营养物质多,因此在较短的培养时间内其幼芽和幼根生长速度快,因此更高浓度的水杨酸处理下促进了科甜2号根长和芽长的生长。与此相反,苜蓿种子生长速度慢,在较短的培养时间内水杨酸对其根长和芽长的影响可能还未完全表现出来,因此不同浓度外施水杨酸对其根长和芽长的影响并未表现出明显的趋势。

4 结论

在 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 的高盐胁迫环境下,苜蓿种子和甜高粱种子的萌发和幼苗生长相关指标均受到抑制,其中对根长和苗长影响显著,发芽率、发芽势、发芽指数、平均发芽天数也受到了较为明显的抑制。外施水杨酸对盐胁迫下3种饲草种子所有测量指标都有一定的缓解作用,对于中苜1号和中苜3号来说,水杨酸浓度在 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的对种子萌发的促进效果最为明显,对于科甜2号来说在 $0.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对种子

萌发的促进效果较为明显。根据隶属函数分析科甜2号的总评分为0.516,为3个饲草品种中最优,耐盐性最好。本研究结果对饲草在盐胁迫下的种植及土壤改良具有参考意义。

参考文献

- [1] 赵可夫,李法曾,樊守金,等. 中国的盐生植物[J]. 植物学报,1999(03):201-207.
- [2] 孙德智,韩晓日,彭靖,等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下番茄幼苗PSII光化学效率及光能分配利用的影响[J]. 园艺学报,2016,43(08):1482-1492.
- [3] 孙健,赵宏伟,王敬国. 水稻孕穗期剑叶形态和蒸腾特性与耐盐性的关系[J]. 华北农学报,2012,27(06):84-91.
- [4] 徐明岗,李菊梅,李志杰. 利用耐盐植物改善盐土区农业环境[J]. 中国土壤与肥料,2006(03):6-10.
- [5] 柴华,杨翌,李红,等. 干旱胁迫下紫花苜蓿抗旱性评价及代谢组学分析[J]. 黑龙江畜牧兽医,2023(07):94-105+135-137.
- [6] 李玉帅,赵晓登,陈腾达. 紫花苜蓿抗逆性最新研究进展[J]. 农村科学实验,2020(05):73-74.
- [7] 王丹. 紫花苜蓿NAC47基因抗盐碱功能研究[D]. 哈尔滨师范大学,2023.
- [8] 刘雨涵. 施氮量对不同品种苜蓿固氮及产量品质的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [9] 朱元芳,韩永胜,张建胜,等. 甜高粱青贮饲料的优势及其在牛羊生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志,2024,60(07):73-78.
- [10] 陈先荣. 北疆地区能源植物甜高粱及其栽培技术[J]. 农村经济与科技,2017,28(08):32+34.
- [11] 解芳. 干旱胁迫对不同发育时期高粱抗旱生理特性的影响[D]. 金华:浙江师范大学,2012.
- [12] 谢锐佳,张典标,陈琰泽. 基因技术精准培育"耐碱斗士"[N]. 新华每日电讯,2023-10-30(008).
- [13] 朱元芳,韩永胜,张建胜,等. 甜高粱青贮饲料的优势及其在牛羊生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志,2024,60(07):73-78.
- [14] 吴雷明. OsMYBs调控水稻次生细胞壁合成与木质纤维高效酶解产糖机理的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
- [15] 何增国,唐峻岭,杨珍,等. 不同甜高粱和青贮玉米品种生产性能及饲用品质评价分析[J]. 中国饲料,2024(17):136-142.
- [16] 王艳朋,杨二波,祝学刚,等. 水杨酸与植物耐性研究进展[J]. 安徽农业科学,2021,49(23):22-24+28.
- [17] 侯瑞星,欧阳竹,刘振,等. 环渤海"滨海草带"建设与生态草牧业发展路径[J]. 中国科学院院,2021,36

- (06):652-659.
- [18] Raskin I. Role of salicylic acid in plants[J]. Annual Review of Plant Biology,2003,43(43):439-463
- [19] Fragniere C, Serrano M, Abou-Mansour E, et al. Salicylic acid and its location in response to biotic and abiotic stress[J]. Febs Letters,2011,585(12):1847-1852.
- [20] Ayyub CM, Ali M, Shaheen MR, et al. Enhancing the salt tolerance potential of watermelon (*Citrullus lanatus*) by exogenous application of salicylic acid [I]. American Journal of Plant Sciences,2015,6(19):3267-3271.
- [21] 马广民. 水杨酸对盐胁迫下苦瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜,2024,37(02):100-105.
- [22] 梁琰,马静,闫征南,等. 盐胁迫下不同浓度水杨酸对辣椒生长抑制的缓解作用[J]. 辽宁农业科学,2024(03):18-22.
- [23] 刘伟,龙子轩,张兴民,等. 外源水杨酸影响蚕豆幼苗耐盐性的生理机制[J]. 甘肃农业大学学报,2024,59(02):36-44+53.
- [24] 徐雪雯,王兴鹏,王洪博,等. 水杨酸对盐胁迫下棉苗生长及生理的调控作用[J]. 作物杂志,2023(03):188-194.
- [25] 樊苗,宋佳,张婷. 水杨酸对盐胁迫下黄瓜幼苗生长的影响[J]. 上海蔬菜,2024(05):45-47.
- [26] Doulatabadian A, Modares S, Etemadi F. Effect of pretreatment of salicylic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination under salt stress[J]. Iranian Journal of Biology,2008,21(4):692-702.
- [27] Agarwal S, Sairam RK, Srivastava GC, et al. Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat genotypes [J]. Biologia Plantarum,2005,49(4):541-550.
- [28] 刘璇,梅昌伟,汪新宇,等. 低温对水稻种子发芽率的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程,2024,36(03):60-64.
- [29] 李雪颖,高志昊,兰剑,等. NaCl胁迫下25份饲用型小黑麦种子的萌发特性及耐盐性评价[J]. 草原与草坪,2023,43(04):65-71+80.
- [30] 火旭堂,贾昊,曹兵. NaCl处理对4种牧草植物种子萌发的影响[J]. 草地学报,2019,27(04):1096-1101.
- [31] 马红媛,梁正伟,孔祥军,等. 盐分、温度及其互作对羊草发芽率和幼苗生长的影响[J]. 生态学报,2008,28(10):4710-4717.
- [32] 李保珠,赵翔,安国勇. 水杨酸的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(01):1-5.
- [33] 杜晨曦,王金丽,周华坤,等. 水杨酸对植物种子萌发及幼苗生长影响的研究进展[J]. 湖北农业科学,2019,58(22):9-14.
- [34] 罗冬,王明玖,李元恒,等. 四种豆科牧草种子萌发和幼苗生长对干旱的响应及抗旱性评价[J]. 生态环境学报,2015,24(01):224-230.
- [35] 季波,时龙,徐金鹏,等. 10种禾本科牧草种质资源萌发期抗旱性评价[J]. 种子,2015,24(01):224-230.
- [36] 郭小龙,赵珮珮,杨建军. 模拟干旱胁迫下3种牧草种子萌发期抗旱性评价[J]. 种子,2020,39(06):19-23.
- [37] 徐楠. 水杨酸对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [38] 程晓晴,方婷玉,李凤杰,等. 喷施水杨酸对铝胁迫紫花苜蓿幼苗光合作用和光化学系统的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(04):42-49.
- [39] 郭瑞,田秀平,杜锦,等. 水杨酸对盐胁迫下糯玉米幼苗生理和光合特性的影响[J]. 玉米科学,2024,32(02):77-83.
- [40] 雷新慧,万晨茜,陶金才,等. 褪黑素与2,4-表油菜素内酯浸种对盐胁迫下荞麦发芽与幼苗生长的促进效应[J]. 作物学报,2022,48(05):1210-1221.
- [41] 山雨思,代欢欢,何潇,等. 外源茉莉酸甲酯和水杨酸对盐胁迫下颠茄生理特性和次生代谢的影响[J]. 植物生理学报,2019,55(09):1335-1346.
- [42] 舒欣,苏晓丽,闫利军,等. 外源水杨酸对NaCl胁迫下老芒麦种子萌发和幼苗的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(01):87-96.
- [43] 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[J]. 中国草地学报,2024,46(02):92-100.
- [44] 罗春燕,耿红凯,王秀军,等. NaCl胁迫下外源水杨酸对银杏生长和光合作用的影响[J]. 南京林业大学学报,2024,48(06):91-101.