

DOI:10.11686/cyxb2025138

http://cyxb.magtech.com.cn

童玉花, 王晓彤, 马永龙, 等. 壳聚糖浸种对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响. 草业学报, 2026, 35(3): 245—256.

TONG Yu-hua, WANG Xiao-tong, MA Yong-long, *et al.* Effects of a chitosan seed soaking treatment on seed germination and growth of alfalfa under saline alkali stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(3): 245—256.

壳聚糖浸种对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响

童玉花, 王晓彤, 马永龙, 杨金辉, 余冬雯, 李淑霞*

(宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:为探究外源壳聚糖(CS)对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响,以15份紫花苜蓿种质材料为研究对象,设定0、50、75和100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫浓度梯度,探究不同浓度盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发期耐盐碱性的影响,从而筛选出最适盐碱胁迫浓度以及不同耐盐碱性的种质材料。最终确定75 mmol·L⁻¹为后续试验的最佳胁迫浓度,并筛选出耐盐碱、中等耐盐碱和盐碱敏感的3份紫花苜蓿种质材料用于正式试验。在正式试验中,以蒸馏水作为对照(CK),将上述3份种质材料的紫花苜蓿种子分别用0、25、75、125、175、200 mg·L⁻¹这6个浓度梯度的壳聚糖溶液浸种12 h,随后置于75 mmol·L⁻¹盐碱胁迫环境下进行种子萌发试验。结果表明,经外源壳聚糖浸种处理后,3份紫花苜蓿种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜重等萌发指标,相较于单独盐碱胁迫处理均呈上升趋势。并且,随着壳聚糖浓度的增加,各萌发指标呈先升高后下降的变化规律,其中壳聚糖浓度为75 mg·L⁻¹时效果最优。此外,不同浓度的壳聚糖浸种处理对3份紫花苜蓿种子的各萌发指标影响均有所不同,表明壳聚糖在一定浓度范围内具有明显的浓度效应。综上所述,外源壳聚糖浸种处理能够有效缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的抑制作用,显著改善种子的萌发状况。本研究为改善紫花苜蓿在盐碱地的适应性及种植成功率提供了有效路径。

关键词:壳聚糖;盐碱胁迫;紫花苜蓿;种子萌发

Effects of a chitosan seed soaking treatment on seed germination and growth of alfalfa under saline alkali stress

TONG Yu-hua, WANG Xiao-tong, MA Yong-long, YANG Jin-hui, YU Dong-wen, LI Shu-xia*

College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The aim of this work was to investigate the effect of chitosan as a seed treatment for alfalfa (*Medicago sativa*) to improve seed germination and seedling growth in saline alkali conditions. Seeds of 15 alfalfa varieties were soaked in chitosan solution and their germination and growth under saline alkali conditions were monitored. First, the seeds of the 15 varieties were subjected to saline alkali stress (0, 50, 75 and 100 mmol·L⁻¹, NaCl:Na₂SO₄=9:4, pH=8.3) to determine their tolerance at the germination stage. This revealed the optimal stress concentration for further experiments, and identified the cultivars showing saline alkali tolerance at the germination stage. The 75 mmol·L⁻¹ treatment was identified as the optimal stress concentration, and three alfalfa germplasm lines with tolerant, moderately tolerant, and sensitive genotypes were selected for further experiments. Seeds of the sensitive, moderately tolerant, and tolerant genotypes were soaked in solutions containing chitosan at a range of concentrations (0, 25, 75, 125, 175, and 200 mg·L⁻¹) for 12 hours and then exposed to 75 mmol·L⁻¹ saline alkali stress during

收稿日期:2025-04-17;改回日期:2025-05-21

基金项目:国家自然科学基金(U24A20426)和宁夏重点研发项目(2023BSB03065)资助。

作者简介:童玉花(1999—),女,宁夏中卫人,在读硕士。E-mail: 2725383840@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lishuxia620@163.com

the seed germination stage, or distilled water as the control (CK). The results show that, for all three alfalfa materials, the seed germination indexes such as germination energy, germination percentage, germination index, vitality index, and seeding indexes such as root length, seedling length and fresh weight were higher after the chitosan-soaking treatment than after treatment with saline alkali stress alone. Across the chitosan concentration range tested, as concentration increased, each germination index first increased and then decreased. The optimal effect was achieved when seeds were soaked in chitosan at a concentration of $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Additionally, soaking the seeds in different concentrations of chitosan had different effects on the germination indexes of the three germplasm lines, with a significant concentration dependent effect within a certain range. In conclusion, a chitosan seed soaking treatment can effectively alleviate the inhibitory effect of saline alkali stress on the germination of alfalfa seeds and significantly improve seedling growth. The results of this study provide an effective methodology for improving the adaptability of alfalfa and enhancing its establishment in saline alkali land.

Key words: chitosan; saline-alkaline stress; alfalfa; seed germination

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是多年生优质豆科牧草, 具有产量高、适应性强、营养价值高和经济价值高等特点, 被誉为“牧草之王”, 是全球种植最广泛的豆科植物之一^[1], 也是我国西部干旱半干旱地区最重要的栽培牧草^[2], 其在生物固氮、改良土壤和保持水土等方面发挥着极大的作用^[3]。盐碱胁迫是影响植物生长和生产的主要非生物因子之一, 对农业生产的可持续发展造成了极大的影响^[4]。预计到2050年, 将有50%的可耕地发生盐渍化, 这对粮食供应造成巨大威胁^[5]。因此, 合理利用和开发盐碱地, 对改善生态环境、维持国家耕地面积和保障农业安全有重要的实践意义^[6]。盐碱浓度过高时会降低植物的光合速率并抑制其生长, 进而影响植物的整体发育^[7]。盐碱胁迫可导致植物产生离子胁迫、渗透胁迫和次级胁迫, 特别是氧化胁迫^[8], 这对紫花苜蓿的种植和生产造成了极大的影响。因此, 提升紫花苜蓿种子萌发期耐盐碱性, 既能保障畜牧业草料供应, 又能通过其固氮与土壤改良能力缓解土壤盐碱化、助力生态修复。

壳聚糖 (chitosan, CS) 是生物生长调节剂^[9], 作为来源于甲壳素的聚阳离子多糖, CS是已知的唯一天然碱性阳离子聚合物, 因具备优良的生物相容性、成膜性、保湿性和抗氧化性而得到广泛应用^[10-11]。毋悦悦等^[12]研究发现CS引发能在一定程度上缓解盐胁迫对藜麦 (*Chenopodium quinoa*) 种子造成的伤害, 李小玲等^[13]发现以0.15%CS作为引发剂显著提高了高山杜鹃 (*Rhododendron lapponicum*) 种子和幼苗的抗逆性, 王乙富^[14]通过物理方法制备得到壳聚糖改性生物炭, 研究发现其可提高盐胁迫下小麦 (*Triticum aestivum*) 种子萌发和幼苗生长的能力。Yao等^[15]用CS对水分胁迫下的白三叶 (*Trifolium repens*) 种子进行引发处理, 发现其对种子的耐受性可能与种子发芽过程中脱水反应途径的增强有关。Steven等^[16]研究发现 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 壳聚糖-GSNO-纳米颗粒能有效促进大豆 (*Glycine max*) 的发芽和幼苗生长。近年来, 国内外许多研究发现CS对植物种子萌发可产生直接或间接的影响。目前, 关于外源CS浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发影响的研究鲜有报道。

因此, 本试验首先研究了15份紫花苜蓿种质材料在不同浓度(0、50、75和 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 盐碱胁迫下的种子萌发情况, 再以筛选出的3份具有耐盐碱差异的紫花苜蓿种质为试验材料, 探究不同浓度的CS浸种对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发特性的影响, 旨在筛选能够缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发产生抑制作用的最适CS浓度, 为紫花苜蓿在盐碱地区种植提供理论支持和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用的15份紫花苜蓿种质材料分别为Magna Graze 2、3010、4030、猎人河、标杆、牧歌401、牧歌301、沃苜一号、中苜一号、蕴能、飞跃、克山、雷达克之星、巨能401和皇冠, 由宁夏大学林业与草业学院提供, CS购自麦考林生物科技有限公司。

1.2 试验设计

1.2.1 盐碱处理浓度和紫花苜蓿耐盐碱性筛选试验 该试验于 2025 年 2 月在宁夏大学育种实验室开展。挑选大小均匀一致、饱满的 15 份紫花苜蓿种子,用 75% 的无水乙醇消毒 30 s,后用蒸馏水冲洗 5 次,再用 4% 的次氯酸钠消毒 5 min,用蒸馏水清洗。参考许耀照等^[17]的研究并结合宁夏盐碱地的盐渍化特征^[18],设置 0、50、75 和 100 mmol·L⁻¹ 盐碱溶液 (NaCl:Na₂SO₄=9:4, pH=8.3) 对种子进行盐碱胁迫,每个培养皿放入 30 粒种子并加入 5 mL 处理液,每个处理 3 次重复。将培养皿置于 HYR-500D-4 型人工气候箱(陕西华屹仪器有限公司),培养条件为昼/夜温度 25 °C/20 °C,湿度为 60%,光照/黑暗时间为 16 h/8 h,光照强度 5000 lx。在种子萌发过程中,以胚根突破种皮 2 mm、胚芽为种子长的 1/2 作为发芽标准,每天定时观察种子发芽情况,记录发芽种子数,第 7 天测定相关指标,筛选明显抑制紫花苜蓿种子萌发的盐碱浓度,统计分析并筛选不同耐盐碱种质。

1.2.2 盐碱胁迫下 CS 浸种处理对紫花苜蓿种子萌发的影响试验 用 1.2.1 筛选出的最佳盐碱处理浓度和耐盐碱、中等耐盐碱和盐碱敏感种质进行种子发芽试验。试验设置 6 个处理,分别以 0、25、75、125、175 和 200 mg·L⁻¹ 这 6 个浓度梯度的 CS 作为浸种溶液(用 T₀、T₂₅、T₇₅、T₁₂₅、T₁₇₅ 和 T₂₀₀ 表示),以蒸馏水作为浸种对照(CK),浸种时间为 12 h^[19],浸种溶液为 8 mL,每个处理 3 次重复。浸种结束后用蒸馏水冲洗种子 5 次,用吸水纸吸干种子表面水分,各处理选取 30 粒种子置于垫有 2 层滤纸的培养皿中,对照组加 5 mL 蒸馏水,处理组加 5 mL 盐碱溶液,其滤纸充分湿润但水不可浸出,培养条件同 1.2.1。

1.3 测定指标

本试验中涉及的紫花苜蓿种子萌发生长特性相关指标包括发芽率(germination percentage, GP)、发芽势(germination energy, GE)、发芽指数(germination index, GI)、活力指数(vigor index, VI)、根长(root length, RL)、苗长(seedling length, SL)和鲜重(fresh weight, FW)。计算公式如下所示:

$$\text{发芽率(GP)} = (\text{第 7 天发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势(GE)} = (\text{第 3 天发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum(G_i / D_i)$$

$$\text{活力指数(VI)} = \text{发芽指数} \times \text{根长}$$

根长(RL):从每个培养皿中随机选取 10 株生长正常的种苗并用电子数显卡尺(德力西电器,浙江)测量长度;

苗长(SL):从每个培养皿中随机选取 10 株生长正常的种苗并用电子数显卡尺测量长度(根基部到植株最高部位的长度为苗长,根基部到根尖的长度为根长),取其平均值^[20];

鲜重(FW):对每个处理组的 10 株种苗用吸水纸擦干表面水分后分别称重^[21]。

式中: G_i 为第 i 天的发芽种子数, D_i 表示对应的种子发芽天数^[22-24]。

1.4 数据分析

采用 Excel 统计试验数据,利用 SPSS 27.0 软件对数据进行隶属函数和聚类分析,使用 Origin 2024 软件作图。结果以“平均值±标准误差”表示, $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准,相关指标计算如下:

以公式(1)计算各供试紫花苜蓿种质耐盐碱性的综合指标值。

$$F(X_i) = a_1 X_{i1} + a_2 X_{i2} + \dots + a_n X_{in} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

利用隶属函数和聚类分析的方法评估 15 份紫花苜蓿种子在萌发阶段的抗盐碱能力,根据公式(2)计算每个指标的隶属函数平均值:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: $U(X)$ 为某一供试种质的某一抗盐碱指标的隶属函数值; X_i 为某一供试种质的某一抗盐碱指标平均值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为所有供试紫花苜蓿种质中该指标的最大值和最小值。

以公式(3)计算每个指标的权重。

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^m P_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中: W_i 为第 i 个指标的权重; P_i 为第 i 个指标的方差贡献率。

以公式(4)计算各材料的综合评价值,以评估它们的耐盐碱性。

$$D = [U(X) \times W_i] \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

式中: D 值表示在盐碱胁迫下各紫花苜蓿种质耐盐碱能力的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对15份紫花苜蓿种子萌发的影响

由表1可得,随着盐碱浓度的升高,15份紫花苜蓿种子的各项测定指标(发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜重)的平均值均有所下降,且达到显著水平($P < 0.05$)。与对照($0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)相比,50、75和 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度处理下紫花苜蓿种子的萌发指标(除 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 胁迫下的发芽指数)呈显著下降趋势($P < 0.05$)。与 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度相比, $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度处理下紫花苜蓿种子的发芽势、苗长和鲜重呈显著下降趋势($P < 0.05$); $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度处理下紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率、发芽指数、根长、苗长和鲜重呈显著下降趋势($P < 0.05$)。与 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度相比, $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱浓度处理下紫花苜蓿种子的苗长和鲜重具有显著差异($P < 0.05$)。当盐碱浓度为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照相比,发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜重分别下降62.7%、60.9%、46.0%、83.9%、71.4%、77.1%和68.4%。综上所述,高浓度的盐碱处理对紫花苜蓿种子萌发具有明显的抑制作用,说明此浓度已不适合进行紫花苜蓿的耐盐碱筛选。因此,选择浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫用于后续紫花苜蓿耐盐碱鉴定和CS浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿的影响试验。

表1 不同盐碱处理对15份紫花苜蓿种质材料发芽指标的影响

Table 1 Effects of different saline-alkaline treatments on germination indexes of 15 alfalfa germplasm materials

| 盐碱处理 Saline-alkaline treatment ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) | 发芽率 Germination percentage (GP, %) | 发芽势 Germination energy (GE, %) | 发芽指数 Germination index (GI) | 活力指数 Vigor index (VI) | 根长 Root length (RL, mm) | 苗长 Seedling length (SL, mm) | 鲜重 Fresh weight (FW, $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$) |
|---|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|
| 0 | 87±0.01a | 75±0.02a | 26.75±2.10a | 936.56±98.87a | 33.73±1.74a | 2.80±0.15a | 0.38±0.02a |
| 50 | 48±0.03b | 43±0.03b | 21.61±2.01ab | 299.43±32.85b | 13.51±0.53b | 1.90±0.15b | 0.24±0.02b |
| 75 | 41±0.03bc | 33±0.03c | 17.80±1.64bc | 205.33±25.99b | 11.00±0.60bc | 1.24±0.11c | 0.18±0.01c |
| 100 | 34±0.03c | 28±0.03c | 14.44±1.55c | 151.07±24.45b | 9.65±0.65c | 0.64±0.11d | 0.12±0.01d |

注:平均数和标准误差均来自3次平行试验,同列数据不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

Note: Means and standard errors are from 3 parallel trials; different lowercase letters for data in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

2.2 15份紫花苜蓿种质萌发期耐盐碱性评价

通过计算在 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫下不同紫花苜蓿种质的 $F(X_i)$ 值,并借助 $F(X_1)$ 、 $F(X_2)$ 和 $F(X_3)$ 来计算 $U(X_1)$ 、 $U(X_2)$ 和 $U(X_3)$ 。结果表明,对同一综合指标如 $F(X_1)$ 而言,经盐碱处理后,“牧歌401”的 $U(X_1)$ 最大,为1.000,隶属函数值越大表明在综合指标 $F(X_1)$ 上表现的耐盐碱性越强,而“4030”和“克山”的 $U(X_1)$ 较小,分别为0.059和0.000,隶属函数值越小表明它们在 $F(X_1)$ 上表现的耐盐碱性越弱(表2)。计算耐盐碱性综合评价 D 值,其中,“牧歌401”的 D 值最大,为0.860,而“克山”的 D 值最小,为0.026,表明这两个紫花苜蓿的耐盐碱性分别为最强和最弱(表2)。

2.3 15份紫花苜蓿种质耐盐碱性聚类分析

对15份紫花苜蓿种质进行耐盐碱性聚类分析,由图1可知,各紫花苜蓿萌发期耐盐碱性分成3类。第I类为耐盐碱型,包括牧歌401和皇冠两个种质。第II类为中等耐盐碱型,包括Magna Graze 2、猎人河、沃苜一号、中苜一号、蕴能、标杆、雷达克之星、飞跃、牧歌301和巨能401这10个种质。第III类为盐碱敏感型,包括3010、4030和

表 2 15 份紫花苜蓿种子萌发期耐盐碱性评价

Table 2 Evaluation of saline-alkaline tolerance during germination of 15 alfalfa seeds

| 种质材料 Germplasm materials | $F(X_1)$ | $F(X_2)$ | $F(X_3)$ | $U(X_1)$ | $U(X_2)$ | $U(X_3)$ | D 值 D value | 排序 Order |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|-------------|
| Magna Graze 2 | 1.168 | -0.079 | 1.702 | 0.821 | 0.448 | 1.000 | 0.781 | 2 |
| 3010 | -0.803 | -0.254 | 0.770 | 0.266 | 0.401 | 0.715 | 0.331 | 12 |
| 4030 | -1.537 | 1.953 | 1.218 | 0.059 | 1.000 | 0.852 | 0.283 | 14 |
| 猎人河 Hunter River | 0.505 | 0.445 | 0.473 | 0.634 | 0.590 | 0.624 | 0.627 | 5 |
| 标杆 Biaogan | -0.704 | 0.716 | -0.738 | 0.294 | 0.664 | 0.254 | 0.347 | 11 |
| 牧歌 401 Muge 401 | 1.803 | -0.118 | -0.051 | 1.000 | 0.437 | 0.464 | 0.860 | 1 |
| 克山 Keshan | -1.746 | -1.728 | -0.709 | 0.000 | 0.000 | 0.262 | 0.026 | 15 |
| 雷达克之星 Ladak Star | -0.369 | 1.154 | 0.440 | 0.388 | 0.783 | 0.614 | 0.472 | 8 |
| 巨能 401 Juneng 401 | -0.029 | 0.744 | -1.566 | 0.484 | 0.672 | 0.000 | 0.465 | 9 |
| 皇冠 Crown | 1.063 | 0.580 | -1.432 | 0.791 | 0.627 | 0.041 | 0.692 | 3 |
| 牧歌 301 Muge301 | -0.163 | -1.056 | -0.687 | 0.446 | 0.183 | 0.269 | 0.388 | 10 |
| 沃苜一号 Womo 1 | 0.475 | -1.389 | 1.216 | 0.626 | 0.092 | 0.851 | 0.565 | 6 |
| 中苜一号 Zhongmu 1 | 0.743 | -0.080 | 0.035 | 0.701 | 0.448 | 0.490 | 0.641 | 4 |
| 蕴能 Yunneng | 0.260 | 0.163 | -0.999 | 0.565 | 0.514 | 0.174 | 0.518 | 7 |
| 飞跃 Leap | -0.665 | -1.052 | 0.328 | 0.305 | 0.184 | 0.580 | 0.313 | 13 |

克山 3 个种质。综合分析 15 份紫花苜蓿种质在 75 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫下的萌发成苗特性, 选用牧歌 401(耐盐碱)、蕴能(中度耐盐碱)和克山(盐碱敏感)进一步研究 CS 浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响。

2.4 CS 浸种对盐碱胁迫下 3 份不同耐盐碱性紫花苜蓿种子发芽率和发芽势的影响

从图 2 可知, 75 mmol·L⁻¹ 盐碱胁迫显著抑制了 3 份紫花苜蓿种子的萌发 ($P < 0.05$)。不同浓度 CS 浸种处理后, 种子发芽率和发芽势均有所提升, 其数值随 CS 浓度升高呈先增后降趋势, 75 mg·L⁻¹ 时达到峰值。75~175 mg·L⁻¹ 区间内, 种子发芽势及中等耐盐碱型种质蕴能种子的发芽率表现较好且处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。75 与 200 mg·L⁻¹ 处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 75 mg·L⁻¹ 浓度下, 牧歌 401、蕴能和克山种子的发芽率较单独盐碱胁迫分别提升 25.4%、65.0% 和 65.5%, 发芽势提升 31.6%、57.5% 和 67.8%。

2.5 CS 浸种对盐碱胁迫下 3 份不同耐盐碱性紫花苜蓿种子发芽指数和活力指数的影响

图 3 显示, 盐碱胁迫显著降低了 3 份紫花苜蓿种子的发芽指数和活力指数 ($P < 0.05$)。不同浓度 CS 浸种处理后, 种子发芽指数和活力指数呈先升后降趋势。其中, CS 浸种浓度为 75 mg·L⁻¹ 时, 耐盐碱型种质牧歌 401 和中等耐盐碱型种质蕴能的发芽指数与活力指数、盐碱敏感型种质克山的活力指数, 均显著优于其他浓度处理 ($P < 0.05$)。与单独盐碱胁迫相比, 75 mg·L⁻¹ 浓度下耐盐碱、中等耐盐碱、盐碱敏感型种子的发芽指数分别提高 1.23、1.37 和 1.26 倍, 活力指数分别提高 3.23、4.68 和 5.66 倍。

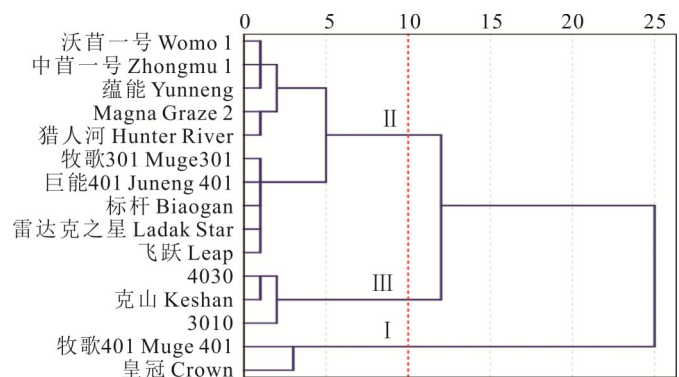


图 1 15 份紫花苜蓿种质耐盐碱性系统聚类分析

Fig. 1 Systematic clustering analysis of 15 alfalfa germplasm accessions for saline-alkaline tolerance

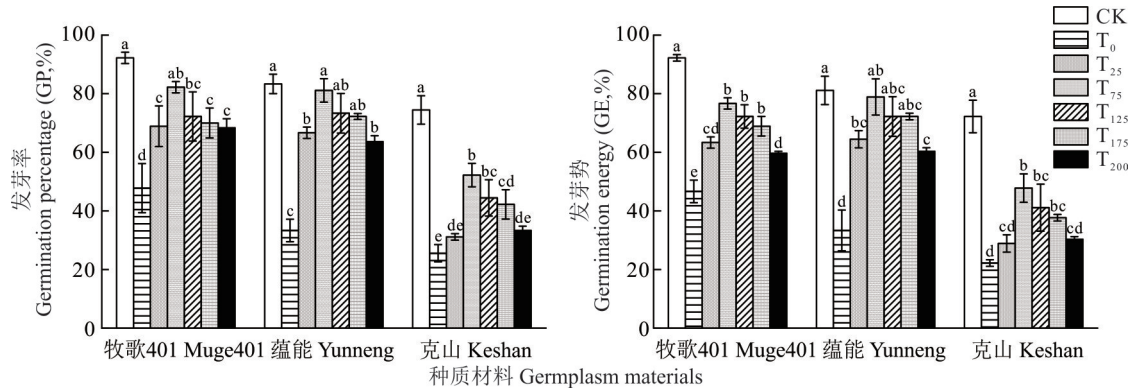


图2 壳聚糖浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子发芽率和发芽势的影响

Fig. 2 Effect of chitosan seed soaking treatment on germination percentage and germination energy of alfalfa seeds under saline-alkaline stress

CK、T₀、T₂₅、T₇₅、T₁₂₅、T₁₇₅和T₂₀₀分别代表7个处理水平,分别为蒸馏水处理、盐碱胁迫下0、25、75、125、175和200 mg·L⁻¹壳聚糖浸种处理;不同小写字母表示同一种质材料不同处理水平间差异显著($P < 0.05$),下同。CK, T₀, T₂₅, T₇₅, T₁₂₅, T₁₇₅ and T₂₀₀ represent 7 treatment levels respectively, which are distilled water treatment 0, 25, 75, 125, 175 and 200 mg·L⁻¹ chitosan soaking treatment under saline-alkaline stress. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatment levels for the same germplasm material ($P < 0.05$), the same below.

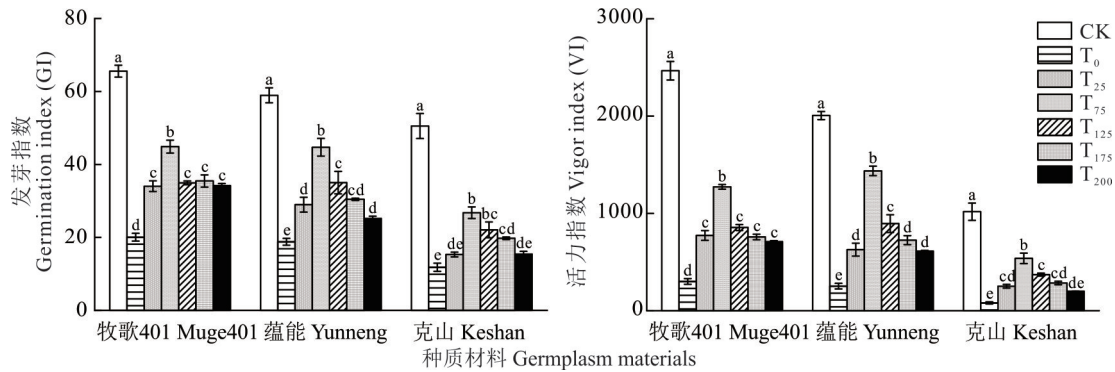


图3 壳聚糖浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子发芽指数和活力指数的影响

Fig. 3 Effect of chitosan seed soaking treatments on germination index and vigor index of alfalfa seeds under saline-alkaline stress

2.6 CS浸种对盐碱胁迫下3份不同耐盐碱紫花苜蓿种子的根长、苗长和鲜重的影响

图4显示,盐碱胁迫显著降低了3份紫花苜蓿(耐盐碱、中等耐盐碱、盐碱敏感)的根长、苗长和鲜重($P < 0.05$)。CS浸种浓度为75 mg·L⁻¹时,3份材料的根长和鲜重显著优于其他浓度($P < 0.05$)。苗长方面,牧歌401(耐盐碱)在25~175 mg·L⁻¹、蕴能(中等耐盐碱)在75~200 mg·L⁻¹、克山(盐碱敏感)在75与125 mg·L⁻¹的CS浓度区间内均无显著差异($P > 0.05$)。

2.7 不同浓度的CS浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子各萌发指标之间相关性的影响

对不同浓度CS浸种处理的盐碱胁迫下紫花苜蓿种子各萌发指标相关系数进行分析,结果如表3所示,发芽率与发芽势、根长与活力指数之间的相关系数均高于0.900,表明它们之间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)。发芽指数与发芽势、发芽率之间的相关系数分别为0.870、0.866,活力指数与发芽势、发芽率、发芽指数之间的相关系数介于0.858~0.887,根长与发芽势、发芽率、发芽指数之间的相关系数介于0.788~0.854,苗长与发芽势、发芽率、根长之间的相关系数介于0.753~0.835,鲜重与发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长之间的相关系数介于0.767~0.882,均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$)。此外,苗长与发芽指数、活力指数、鲜重之间的相关系数介于0.502~0.689,呈极显著的正相关关系($P < 0.01$)。总体而言,盐碱胁迫下不同浓度的CS浸种处理使得紫花苜蓿各萌发指标之间总体上呈现出相互促进、正相关的关系,共同反映了紫花苜蓿在不同浓度的CS浸种处理下对盐碱胁迫的耐受能力和生长状况的改善。

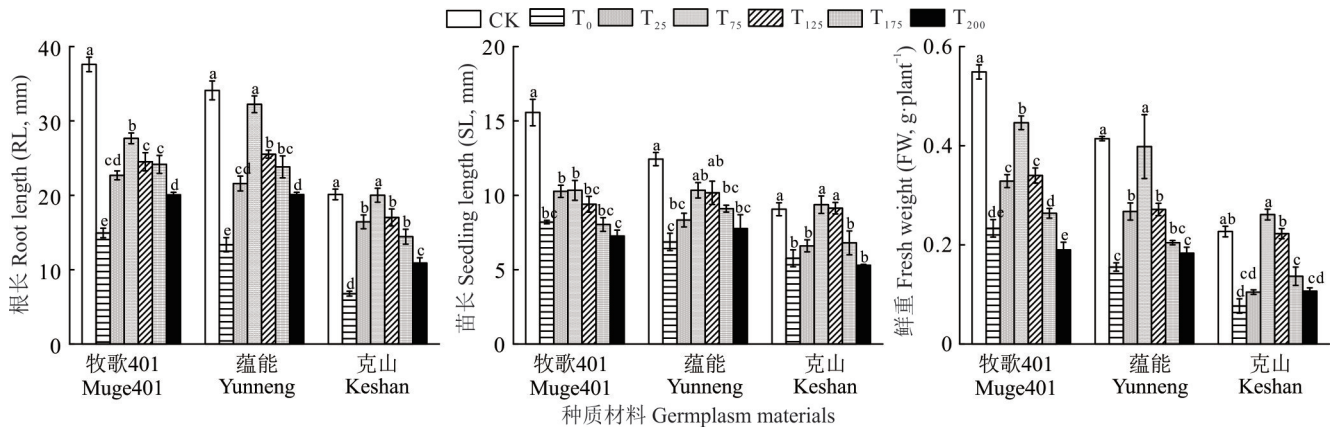


图 4 壳聚糖浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿根长、苗长和鲜重的影响

Fig. 4 Effect of chitosan seed soaking treatments on root length, seedling length and fresh weight of alfalfa under saline-alkaline stress

表 3 不同浓度的壳聚糖浸种处理对紫花苜蓿种子各萌发指标之间的相关性

Table 3 Correlation between various germination indexes of alfalfa seeds by different concentrations of chitosan soaking treatments

| 指标 Index | 发芽率 Germination percentage (GP) | 发芽势 Germination energy (GE) | 发芽指数 Germination index (GI) | 活力指数 Vigor index (VI) | 根长 Root length (RL) | 苗长 Seedling length (SL) |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 发芽势 Germination energy (GE) | 0.993** | | | | | |
| 发芽指数 Germination index (GI) | 0.866** | 0.870** | | | | |
| 活力指数 Vigor index (VI) | 0.858** | 0.875** | 0.887** | | | |
| 根长 Root length (RL) | 0.852** | 0.854** | 0.788** | 0.927** | | |
| 苗长 Seedling length (SL) | 0.781** | 0.753** | 0.502** | 0.689** | 0.835** | |
| 鲜重 Fresh weight (FW) | 0.790** | 0.767** | 0.828** | 0.882** | 0.836** | 0.670** |

注：“**”表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: “**” indicates extremely significant correlation at the 0.01 level.

3 讨论

紫花苜蓿作为高质量多年生牲畜饲料作物,在全球畜牧业和生态系统中至关重要,但盐碱等非生物胁迫显著抑制其生长与生产^[25]。种子萌发期是植物生命进程的起点,易受外界因素影响,开展耐盐碱种质筛选可为盐碱地生态修复提供植被选择^[26]。种子浸种处理可在一定程度上减轻盐碱胁迫对种子萌发的抑制^[27]。其中,CS 因独特性能在农业生产中应用广泛,对作物增产和品质提升有促进作用^[28]。本试验采用 CS 浸种预处理紫花苜蓿种子,既因 CS 诱导抗性需一定时间,又鉴于浸种法简单实用、成本低且能促进快速发芽^[29]。

3.1 盐碱胁迫对 15 份紫花苜蓿种子萌发的影响

盐胁迫会影响植物对水分的吸收,降低细胞膨胀,抑制叶片/根伸长率。此外,细胞内较大量的 Na⁺和 Cl⁻会阻碍细胞分裂和代谢,并导致种子死亡^[30]。同时,高浓度的 Na⁺易对土壤中其他离子(如 K⁺和 Ca²⁺)产生拮抗作用,影响植物对其他营养物质的吸收,从而影响植物的正常生长发育^[31]。石嘉琦等^[32]研究发现盐溶液离子浓度过高会产生渗透胁迫,导致土壤水势下降,种子吸水困难甚至脱水,进而抑制种子萌发进程。关秀玲等^[33]发现植物在遭受盐碱胁迫后,植物的组织、器官发育与分化受到阻碍,生长速度缓慢,幼苗根系生长受阻,植株出现矮化。在种子萌发期间,评定种子的发芽情况常用发芽率、发芽势以及活力指数等指标,发芽势能反映种子出苗整齐度以及出苗速度,发芽指数代表了种子的活力大小^[34]。本研究采用 0、50、75、100 mmol·L⁻¹盐碱胁迫处理以探究 15 份紫花苜蓿种子的萌发状况,发现紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜重与对照

相比均呈下降趋势,随着盐碱浓度的增加,盐碱胁迫对紫花苜蓿种子的伤害越大,本试验结果与陈雪梅等^[35]研究盐碱胁迫对4份紫花苜蓿种子萌发的影响结果相似,表明盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发具有抑制作用。

已有研究表明,植物的抗盐碱性是一个综合生理生化过程,同一植物各项指标的变化不同,因此单一指标不能全面和准确地反映植物抗盐碱性的强弱^[36]。本试验利用隶属函数法对浓度为 $75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫下紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜重进行综合评价,从而提高了抗盐碱胁迫评价及鉴定的可靠性。对15份紫花苜蓿种质进行隶属函数分析 D 值为 $0.026\sim 0.860$,最大的是牧歌401,最小的是克山。隶属函数值越大,说明紫花苜蓿种子萌发能力越强,数值越小,紫花苜蓿种子萌发抑制作用越强^[37]。通过聚类分析,将15份紫花苜蓿种质划分为3个等级,分别为耐盐碱、中等耐盐碱和盐碱敏感型,第Ⅰ类包括牧歌401和皇冠;第Ⅱ类包括Magna Graze 2、猎人河、沃苜一号、中苜一号、蕴能、标杆、雷达克之星、飞跃、牧歌301和巨能401;第Ⅲ类包括3010、4030和克山。综上,本研究选取 $75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐碱浓度进行胁迫处理,并选择耐盐碱牧歌401、中等耐盐碱蕴能和盐碱敏感克山作为后续研究的种质材料。

3.2 CS浸种处理对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响

CS具备附着性、吸湿性和成膜性,CS处理种子时,能在种子表面构建一层紧密的薄膜,这层薄膜可以有效调节种子的代谢平衡,进而提升种子的发芽率^[38]。同时,CS能够通过次级信使的转导途径增强不同作物对不同非生物胁迫的抵抗力^[39]。潘丽芹等^[40]研究发现,浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CS浸种处理可有效地促进 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下白三叶种子萌发及幼苗生长。王玉萍等^[41]研究发现,浓度为0.3%的CS浸种处理可促进 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下偃展08231和小偃986两个小麦的种子萌发和幼苗生长且效果最佳。Saadat等^[42]研究发现经0.75%CS处理的种子在盐碱胁迫条件下的表现优于0.25%和0.50%CS处理的种子,能够更有效地缓解盐胁迫带来的不利影响。Hidangmayum等^[43]研究表明,通过CS种子引发处理可对绿豆(*Vigna radiata*)基因进行改良,进而减轻干旱胁迫对绿豆植株的不利影响。本试验结果表明:不同浓度的CS浸种处理可以有效地提高盐碱胁迫下3份紫花苜蓿种子的萌发能力,这与叶利民等^[44]用CS浸种处理水稻(*Oryza sativa*)的研究结果相似。但当CS浓度过高时,反而会降低3份紫花苜蓿种子的各项发芽指标,抑制紫花苜蓿种子的萌发,这与何昊等^[45]、张成冉等^[46]和Lyalina等^[47]的研究结果相符。同时,本研究还发现不同浓度的CS浸种处理对不同紫花苜蓿的种子萌发影响具有差异性。CS浸种处理能促进非生物胁迫下种子萌发,这与来自CS的营养(氮)有关,CS浸种还能够提高酚类物质含量和防御相关酶活性等重要抗性指标,从而提高植物抗逆性。然而,较高浓度的CS浸种则对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发没有明显的促进作用,这可能是由于过度刺激下的胁迫反应或毒性所致,也可能是盐碱胁迫下紫花苜蓿的根系本身就处于缺水状态,外源CS浸种处理后,随着根系总浓度的升高,植物根系脱水情况加剧,从而影响紫花苜蓿种子的正常生理活性。

发芽率和发芽势是衡量种子质量和活力的重要指标。本试验发现浓度为 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CS浸种处理可显著提高盐碱胁迫下紫花苜蓿种子的发芽势和发芽率,促进紫花苜蓿种子的萌发,耐盐碱型种质牧歌401、中等耐盐碱型种质蕴能和盐碱敏感型种质克山的发芽势与单独盐碱胁迫相比分别增加了31.6%、57.5%和67.8%,发芽率分别增加了25.4%、65.0%和65.5%。李小玲等^[48]发现用浓度为0.15%(最适浓度)的CS浸种处理时,发芽势和发芽率分别比单独干旱胁迫处理高出22.6和24.1个百分点,本试验结果与其一致。发芽指数能准确地反映种子发芽的速度和整齐程度,活力指数能全面地反映种子的活力水平,更能反映种子的发芽势。CS浓度为 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,紫花苜蓿种子的发芽指数和活力指数最高,耐盐碱型种质牧歌401、中等耐盐碱型种质蕴能和盐碱敏感型种质克山的发芽指数与单独盐碱胁迫相比分别提高了1.23、1.37和1.26倍,活力指数分别提高了3.23、4.68和5.66倍。张俊风等^[49]研究发现浓度为0.1%的CS浸种处理时,酸枣(*Ziziphus acidojuba*)种子的活力指数最高,是单独清水浸种处理的2.5倍。可见,CS能提高紫花苜蓿种子活力,促进紫花苜蓿种子萌发。

在种子萌芽至幼苗阶段,非生物胁迫危害最先体现在根系,其会同步启动代谢调节机制抵御胁迫^[50]。本研究表明,盐碱胁迫下3份紫花苜蓿的根长与对照相比均出现显著下降,且随着盐碱浓度的增加,抑制作用更加显著。采用不同浓度的CS浸种处理后,根长呈现先上升后下降的趋势,说明适宜浓度的CS浸种处理可在一定程度上

缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的抑制作用。这与朱云林等^[51]研究发现 CS 浸种处理使小麦的根长相比盐碱胁迫处理增加 1.1 cm 以上的观点一致。鲜重的变化可以直观地反映植物在一定时期内的生长情况。有研究表明,高盐碱胁迫下紫花苜蓿的地上部鲜重和根鲜重均降低近 50%,说明盐碱胁迫对紫花苜蓿的生长具有明显的抑制作用^[52]。本研究发现,盐碱胁迫下 3 份紫花苜蓿的鲜重与对照相比均出现显著下降,但在最适浓度 75 mg·L⁻¹的 CS 浸种处理下,耐盐碱型种质牧歌 401 种子的鲜重与盐碱胁迫相比提高了 91.3%,中等耐盐碱型种质蕴能提高了 70.0%,盐碱敏感型种质克山提高了 30.0%,说明适宜浓度的 CS 浸种处理能有效增加紫花苜蓿种子的鲜重,进而缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的伤害。这与常青山等^[53]用浓度为 50 mg·L⁻¹的 CS 浸种处理紫花苜蓿种子时,干旱胁迫下紫花苜蓿种子的鲜重与单独干旱胁迫相比提高了 1.31 倍的观点一致。综上,适宜浓度的 CS 浸种处理能显著促进盐碱胁迫下紫花苜蓿种子的萌发生长,这为 CS 在农业上的有效应用和苜蓿在盐碱地的栽培种植提供了重要思路。

4 结论

综上所述,在浓度为 75 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,不同浓度的 CS 浸种处理能减轻盐碱胁迫对 3 份紫花苜蓿种子萌发的抑制作用,其中,浓度为 75 mg·L⁻¹ CS 浸种处理对耐盐碱、中等耐盐碱和盐碱敏感型紫花苜蓿种子萌发的促进效果最佳。由此可见,外源 CS 浸种处理能够有效缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的抑制作用。本研究为盐碱地紫花苜蓿种植提供了新思路,但相关技术在大田应用中的适应性及效果仍需进一步研究。

参考文献 References:

- [1] Liu J X, Li S Y, Qu S M. Effects of plant growth regulators on growth and physiology of alfalfa under saline-alkali stress. *Feed Research*, 2025, 48(1): 113–118.
刘佳欣,李思宇,曲善民.植物生长调节剂对盐碱胁迫下苜蓿生长及生理的影响.饲料研究,2025,48(1):113–118.
- [2] Yuan Y T, Wu L, Wei X X, *et al.* Production performance and quality evaluation of 12 alfalfa varieties in the semiarid region of Hexi Corridor. *Acta Agrestia Sinica*, (2025-05-14) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250514.0927.002>.
袁玉涛,吴莉,魏小星,等.河西走廊半干旱区 12 个紫花苜蓿品种生产性能及品质评价.草地学报,(2025-05-14)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250514.0927.002>.
- [3] Han Y L, Kang W J, Shi S L, *et al.* Studies on the difference of symbiotic effect between *Sinorhizobium meliloti* QL2 and different alfalfa varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, (2525-03-18) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20250317.1723.038>.
韩宜霖,康文娟,师尚礼,等.中华根瘤菌株 QL2 与不同紫花苜蓿品种共生效应的差异.草业学报,(2525-03-18)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20250317.1723.038>.
- [4] Tian G, Nan L L, Wang L Q, *et al.* Effects of exogenous ABA on growth and physiological characteristics of sainfoin seedlings under NaCl stress. *Acta Prataculturae Sinica*, (2025-03-21) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1105.s.20250320.1405.002>.
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,(2025-03-21)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1105.s.20250320.1405.002>.
- [5] Jiang Y T, Li Y M, Liu M C, *et al.* Effects of exogenous SA on seed germination of *Oenothera biennis* L. under salt stress. *Molecular Plant Breeding*, (2025-03-20)[2025-03-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250320.0918.004>.
姜云天,李玉梅,刘洛畅,等.外源水杨酸对盐胁迫下长白山区月见草种子萌发的影响.分子植物育种,(2025-03-20)[2025-03-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250320.0918.004>.
- [6] Wang X G, Gao L Y, Deng Y S, *et al.* Identification and evaluation of cotton salt tolerance during germination and seedling stages. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57(2): 29–37.
王晓歌,高利英,邓永胜,等.棉花萌发出苗期耐盐性鉴定和评价.山东农业科学,2025,57(2):29–37.
- [7] Liu Y, He C, Jin M, *et al.* Study on the physiological adaptation mechanism of *Atraphaxis bracteata* seedlings under different salinity stress. *Pratacultural Science*, (2025-03-18) [2025-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250318.0941.002.html>.

- 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. 草业科学, (2025-03-18)[2025-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250318.0941.002.html>.
- [8] Yang Y Q, Guo Y. Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2018, 60(9): 796–804.
- [9] Yu J D, Zhou C J, Gao Z K, *et al.* Effects of plant growth regulators on yield and related traits of continuous cropping soybean. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2025, 47(2): 471–477.
于吉东, 周长军, 高忠奎, 等. 植物生长调节剂对连作大豆产量及其相关性状的影响. *中国油料作物学报*, 2025, 47(2): 471–477.
- [10] Cao Y X, Liu H H, Zhang Y P, *et al.* Effects of chitosan on physiological metabolism and fruit quality of melon. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2024, 47(4): 57–64.
曹艳霞, 刘海河, 张彦萍, 等. 壳聚糖对甜瓜生理代谢及果实品质的影响. *河北农业大学学报*, 2024, 47(4): 57–64.
- [11] Liu S C, Tan J X, Pan J F, *et al.* Effect of exogenous substances on seed germination and seedlings growth of *Amaranthus tricolor*. *Seed*, 2018, 37(4): 66–70.
刘生财, 谭吉祥, 潘君飞, 等. 外源物质对苋菜种子萌发及幼苗生长的影响. *种子*, 2018, 37(4): 66–70.
- [12] Wu Y Y, Pang C H, Zhang Y Q, *et al.* Influences of chitosan initiation on seed germination and seedling growth of quinoa under salt stress. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(4): 114–121.
毋悦悦, 庞春花, 张永清, 等. 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响. *江苏农业科学*, 2024, 52(4): 114–121.
- [13] Li X L, Yang Z Y, Hua Z R. Effect of chitosan on seed germination and growth of *Rhododendron lapponicum*. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(1): 64–69.
李小红, 杨紫逸, 华智锐. 壳聚糖浸种对高山杜鹃种子萌发及生长的影响研究. *江西农业学报*, 2023, 35(1): 64–69.
- [14] Wang Y F. Chitosan-modified biochar promotes seed germination and seedling growth of wheat under salt stress. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(19): 6493–6499.
王乙富. 壳聚糖改性生物炭促进盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长. *分子植物育种*, 2023, 21(19): 6493–6499.
- [15] Yao L, Zhao Y, Cheng B Z, *et al.* Seed priming with chitosan improves germination characteristics associated with alterations in antioxidant defense and dehydration-responsive pathway in white clover under water stress. *Plants*, 2022, 11(15): 13.
- [16] Steven S, Islam M S, Ghimire A, *et al.* Chitosan-GSNO nanoparticles and silicon priming enhance the germination and seedling growth of soybean (*Glycine max* L.). *Plants*, 2024, 13(10): 1290.
- [17] Xu Y Z, Zeng X C, Fang Y, *et al.* Effects of salt and alkali stress on seed germination and mitosis of root apical cells of *Brassica campestris* L. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 14–19.
许耀照, 曾秀存, 方彦, 等. 盐碱胁迫对油菜种子萌发和根尖细胞有丝分裂的影响. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 14–19.
- [18] Guo J C, Wang M G, Geng R, *et al.* Salinity characteristics analysis of saline alkali soil in Yinbei irrigation district of Ningxia. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(5): 38–42.
郭军成, 王明国, 耿荣, 等. 宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析. *中国农学通报*, 2021, 37(5): 38–42.
- [19] Zuo J F, Lin Y C, Liu W W, *et al.* Effects of simulated drought stress with PEG-6000 on seed germination and seedling growth of three species of forage grasses. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(13): 1–13.
作建芬, 林益超, 刘维维, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响. *生态学报*, 2025, 45(13): 1–13.
- [20] Ma F Q, Wang Y, Zheng X L, *et al.* Effects of exogenous abscisic acid on seed germination and seedling physiological characteristics of *Astragalus cicer* seedlings under salt stress. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, (2025-05-14)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20250512.2102.004>.
马福钦, 王彦, 郑晓琳, 等. 盐胁迫下外源脱落酸对鹰嘴紫云英种子萌发及幼苗生理特性的影响. *核农学报*, (2025-05-14)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20250512.2102.004>.
- [21] Zhu X H, Ji S, Yang H H, *et al.* Effects of biochar combined with nitrogen application on ‘*Paulownia 1201*’ seed germination under Cd stress. *Journal of Northwest Forestry University*, (2025-04-14)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1202.S.20250411.1721.010>.
朱秀红, 纪爽, 杨会焕, 等. 生物炭配施氮素对Cd胁迫‘泡桐1201’种子萌发的影响. *西北林学院学报*, (2025-04-14)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1202.S.20250411.1721.010>.
- [22] Wang R, Yu M Y, Cao Z J, *et al.* Effects of salt stress on seed germination characteristics of *Poa pratensis* L. *Seed*, 2024, 43(9):

86—93.

王蓉, 于铭玥, 曹志坚, 等. 盐处理对草地早熟禾种子萌发特性的影响. 种子, 2024, 43(9): 86—93.

- [23] Yao X J, Sun Q Y, Zhang Z, *et al.* Comprehensive evaluation on salt tolerance of 61 alfalfa cultivars during seed germination. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 33(4): 1—13.
姚兴洁, 孙庆赢, 张昭, 等. 61 个品种紫花苜蓿种子萌发期耐盐性综合评价. 草地学报, 2024, 33(4): 1—13.
- [24] Wang N N, Luo X M, Chen M Y, *et al.* Effects of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth of *Cyperus esculentus* L. under salt and drought stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(2): 51—61.
王宁宁, 罗雪梅, 陈明媛, 等. 外源褪黑素对盐旱复合胁迫下油莎豆种子萌发和幼苗生长的影响. 中国农业科技导报, 2025, 27(2): 51—61.
- [25] Peng W X, Cai W Q, Pan J Y, *et al.* Molecular mechanisms of alfalfa response to abiotic stresses. *Plants*, 2025, 14(3): 14.
- [26] Zhou C F, Wei Y Q, Yang C Q, *et al.* Comprehensive evaluation of drought and saline-alkali tolerance of 15 oat varieties during germination period. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(1): 1—11.
周超凡, 魏玉清, 杨崇庆, 等. 15 个燕麦品种萌发期耐旱、耐盐、耐碱性综合评价. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 1—11.
- [27] Cui C, Wang M Q, Zhao W L, *et al.* The effect on seed germination and seedling growth of soaking seeds with diethyl aminoethyl hexanoate in alfalfa under NaCl stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 1—13.
崔灿, 王梦琦, 赵琬璐, 等. 胺鲜酯浸种对 NaCl 胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 1—13.
- [28] Luo X, Wang X L, Luo Y, *et al.* Effect of chitosan on loquat fruit quality. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(9): 1—9.
罗弦, 王晓莉, 罗娅, 等. 壳聚糖对枇杷果实品质的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(9): 1—9.
- [29] Wu F X. Effects of spermidine and nano titanium dioxide on growth and cadmium accumulation of *Zea mays* seedlings. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
吴风雪. 亚精胺与纳米二氧化钛浸种对玉米幼苗生长及镉积累的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [30] Ali A, Ferdosi F H, Sarwar M, *et al.* Inducing salt stress tolerance in bitter melon (*Momordica charantia*) through seed treatment with chitosan. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 15(2): 1—14.
- [31] Shu X, Su X L, Yan L J, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling of *Elymus sibiricus* under NaCl stress. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(1): 87—96.
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. 中国草地学报, 2024, 46(1): 87—96.
- [32] Shi J Q, Xie N, Cui S Q, *et al.* Evaluation of salt tolerance of 16 alfalfa varieties under different salt concentration stress at germination stage. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 472—480.
石嘉琦, 谢楠, 崔素倩, 等. 不同盐浓度胁迫下 16 个紫花苜蓿品种萌发期耐盐性评价. 草地学报, 2025, 33(2): 472—480.
- [33] Guan X L, Shen J. Research progress on physiological and molecular mechanisms of plant in response to salt alkali stress. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(21): 10—16.
关秀玲, 申健. 植物响应盐碱胁迫的生理和分子机制研究进展. 江苏农业科学, 2024, 52(21): 10—16.
- [34] Yuan J M, Li C J, Zeng Y, *et al.* Evaluation of salt tolerance of 19 germplasm of *Bromus inermis* at germination stage. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 524—534.
袁嘉苗, 李陈建, 曾怡, 等. 19 份无芒雀麦种质萌发期的耐盐性评价. 草地学报, 2025, 33(2): 524—534.
- [35] Chen X M, Liu H J, Yang Z, *et al.* Effects of salt-alkali stress on seed germination traits of alfalfa and its salt tolerance evaluation. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2024(3): 64—70.
陈雪梅, 刘骅峻, 杨翌, 等. 盐碱胁迫对苜蓿种子萌发性状的影响及耐盐碱性评价. 黑龙江农业科学, 2024(3): 64—70.
- [36] Zhang Z Y, Hou W J, Lyu W D, *et al.* Physiological response of Zhongmu No. 1 alfalfa to mixed salt and alkaline stress. *Grassland and Turf*, 2023, 43(2): 126—132.
张志莹, 侯文静, 吕卫东, 等. 中苜一号紫花苜蓿对混合盐和碱胁迫的生理响应. 草原与草坪, 2023, 43(2): 126—132.
- [37] Wu X Y, Chen S Y, Zhu C L, *et al.* Influences of acid stress on osmotic regulatory substances and enzyme activities of *Pinus massoniana* seeds at different germination stages. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(19): 156—163.
武欣怡, 陈顺钰, 朱晨璐, 等. 酸胁迫对马尾松种子萌发不同时期体内渗透调节物质和酶活性的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 156—163.
- [38] Sun B. Exogenous additives on the seed germination and seedling growth of *Puccinellia distans* and *Nitraria tangutorum* Bobr

- under salt-stress. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.
- 孙彬. 盐胁迫下几种外源添加剂对碱茅和白刺萌发生长的影响. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [39] Alenazi M M, El-Ebidy A M, El-Shehaby O A, *et al.* Chitosan and chitosan nanoparticles differentially alleviate salinity stress in *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Plants*, 2024, 13(3): 398.
- [40] Pan L Q, Wei H Z, Zhang H, *et al.* Effects of chitosan on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens* under salt stress. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(11): 3740–3744.
- 潘丽芹, 韦海忠, 张浩, 等. 壳聚糖对盐胁迫下白三叶种子萌发及幼苗生长的缓解作用. *分子植物育种*, 2018, 16(11): 3740–3744.
- [41] Wang Y P, Yu D, Li C, *et al.* Effect of chitosan on seed germination and seedling physiological characters of wheat under salt stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1): 180–185.
- 王玉萍, 于丹, 李成, 等. 壳聚糖对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1): 180–185.
- [42] Saadat H, Sedghi M. The effect of seed priming with chitosan on the improvement of physiological and biochemical traits of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] under salinity stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2024, 71(6): 1–11.
- [43] Hidangmayum A, Dwivedi P, Kumar P, *et al.* Seed priming and foliar application of chitosan ameliorate drought stress responses in mungbean genotypes through modulation of morpho-physiological attributes and increased antioxidative defense mechanism. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(10): 6137–6154.
- [44] Ye L M, Xia J H, Xu F F, *et al.* Effects of chitosan soaking on seed germination and seedling growth of rice. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(6): 21–22.
- 叶利民, 夏瑾华, 徐芬芬, 等. 壳聚糖浸种对水稻种子萌发及幼苗生长的影响. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 21–22.
- [45] He H, Li D D, Pan F F, *et al.* Effects of chitosan priming on seed germination and seedling growth of rice under salt stress. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(5): 1066–1074.
- 何昊, 李丹丹, 潘非凡, 等. 壳聚糖引发对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响. *江西农业大学学报*, 2022, 44(5): 1066–1074.
- [46] Zhang C R, Xu G H, Song Z Y, *et al.* Effects of sugar immersion on seed germination and seedling growth of maize under salt stress. *Seed*, 2021, 40(8): 51–56.
- 张成冉, 徐广海, 宋朝玉, 等. 糖浸种对盐胁迫玉米种子萌发和幼苗生长的影响. *种子*, 2021, 40(8): 51–56.
- [47] Lyalina T, Shagdarova B, Zhuikova Y, *et al.* Effect of seed priming with chitosan hydrolysate on lettuce (*Lactuca sativa*) growth parameters. *Molecules*, 2023, 28(4): 1915.
- [48] Li X L, Liu R, Hua Z R. Effects of chitosan on seed germination and seedling drought resistance of *Scutellaria baicalensis*. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(3): 75–81.
- 李小红, 刘荣, 华智锐. 壳聚糖对黄芩种子萌发及幼苗抗旱性的影响研究. *江西农业学报*, 2020, 32(3): 75–81.
- [49] Zhang J F, Li Q M, Duan X F, *et al.* Effects of chitosan on seed germination and seedling growth of *Ziziphus acidojuba*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(6): 146–150.
- 张俊风, 李庆梅, 段新芳, 等. 壳聚糖对酸枣种子萌发及幼苗生长的影响. *北京林业大学学报*, 2010, 32(6): 146–150.
- [50] Zhang Z H, Xu J Y, Song M N, *et al.* Effects of NaCl stress on seed germination of *Halogeton glomeratus* in different regions of Gansu Province. *Grassland and Turf*, 2022, 42(5): 132–141.
- 张泽华, 许静玉, 宋美妮, 等. NaCl胁迫对甘肃省不同地区盐生草种子萌发特性的影响. *草原与草坪*, 2022, 42(5): 132–141.
- [51] Zhu Y L, Gu D L, Wang W Z, *et al.* Effects of seed soaking by chitosan on emergence and active substances of wheat. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(17): 85–88.
- 朱云林, 顾大路, 王伟中, 等. 壳聚糖浸种对小麦出苗及活性物质的影响. *江苏农业科学*, 2019, 47(17): 85–88.
- [52] Feng Y X, Zhao C, Chen L Y, *et al.* Comprehensive evaluation of physio-morphological traits of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties under salt stress. *Physiologia Plantarum*, 2025, 177(1): e70044.
- [53] Chang Q S, Zhang L X, Zhang Q M, *et al.* Effects of chitosan on germination characteristics of the seeds of *Medicago sativa* L. under drought stress. *Seed*, 2015, 34(3): 39–43.
- 常青山, 张利霞, 张巧明, 等. 壳聚糖浸种对干旱胁迫下苜蓿种子发芽的缓解作用. *种子*, 2015, 34(3): 39–43.