

王锦, 胡笑玫, 张旭萍, 等. 混合盐胁迫对蒲公英种子萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1):80-89.

WANG J, HU X M, ZHANG X P, et al. Effects of mixed saline stress on seed germination of *Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1):80-89.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.09

## 混合盐胁迫对蒲公英种子萌发的影响

王 锦<sup>1</sup>, 胡笑玫<sup>1</sup>, 张旭萍<sup>1</sup>, 拉 本<sup>1,2</sup>, 龙主多杰<sup>1</sup>

(1. 青海师范大学 生命科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室, 青海 西宁 810008)

**摘 要:** 为了探讨不同混合盐胁迫对蒲公英种子萌发的影响, 以蒲公英种子为试验材料, 配制4种由不同浓度的NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>组成的混合盐, 其配比分别为1:1:0:0(YA, pH=7.20)、1:2:1:0(YB, pH=8.03)、1:9:9:1(YC, pH=8.90)、1:1:1:1(YD, pH=9.63), 每种混合盐设置5个浓度梯度(25、50、100、150、200 mmol/L), 以蒸馏水为对照(CK), 利用不同类型混合盐溶液模拟混合盐碱土壤条件对蒲公英种子进行盐碱胁迫处理, 分析蒲公英种子在碱性盐胁迫下的萌发情况和变化规律。结果显示, 在混合盐胁迫条件下, 多数种子萌发会受到一定程度的负面影响, 同一种混合盐时, 随着盐浓度不断升高, 种子发芽率明显降低; 4种混合盐均在浓度为25 mmol/L时, 种子复水后恢复萌发率较高, 最终发芽率与CK间差异不显著; 同一pH值下, 随着盐胁迫浓度升高, 恢复萌发率和最终发芽率均有不同程度降低; 高pH值的YC、YD处理, 盐浓度高于50 mmol/L时, 种子难以发芽; YD组对种子发芽的抑制作用相对较强, 盐浓度高于100 mmol/L后超过1/2的种子失活。混合盐溶液浓度、pH值以及二者的交互作用均对种子的各项萌发参数表现出极显著影响。湿地环境中的混合盐碱胁迫较单一盐胁迫对植物的毒害作用更强且不可避免, 从植物种子生长初期进行盐胁迫培养, 增强其对盐碱的耐受潜力, 可为人工修复盐碱地提供新的可行途径。

**关键词:** 蒲公英; 耐盐性; 盐碱胁迫; 种子萌发; 混合盐

中图分类号: S567.23<sup>+</sup>9 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2025)01-0080-10

## Effects of Mixed Saline Stress on Seed Germination of *Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz

WANG Jin<sup>1</sup>, HU Xiaomei<sup>1</sup>, ZHANG Xuping<sup>1</sup>, LA Ben<sup>1,2</sup>, LONGZHU Duojie<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China;

2. Key Laboratory of Medicinal Animal and Plant Resources in Qinghai Tibet Plateau, Xi'ning 810008, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different mixed salt stress on germination of dandelion (*Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz) seeds, in this study, dandelion seeds were used as experimental materials, and four mixed salts composed of different concentrations of NaCl (pH=7.20), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH=8.03), NaHCO<sub>3</sub> (pH=8.90), and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (pH=9.63) were prepared. The concentration ratios of the four salts in the mixed salt were 1:1:0:0 (YA), 1:2:1:0 (YB), 1:9:9:1 (YC), and 1:1:1:1 (YD), respectively. Five concentration gradients (25, 50, 100, 150, and 200 mmol/L) were set for each mixed salt, and distilled water was used as the control (CK). Different types of mixed salt solutions were used to simulate the mixed saline-alkali soil conditions for the saline-alkali stress treatment of dandelion seeds, and germination and variation of dandelion seeds under alkaline salt stress were analyzed. The results showed that germination of most seeds was negatively affected to a certain extent under mixed salt stress. Under the same mixed salt, the germination rate of seeds decreased significantly with the increase of salt concentration. When the concentration of the four mixed salts was 25 mmol/L, the seed recovery germination rate was higher after rehydration, and the final germination rate was not significantly different from that of CK. At the same pH value, both the recovery germination rate and the final germination rate decreased to varying degrees with the increase of salt stress concentration.

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 青海省应用基础研究项目 (2023-ZJ-720)

作者简介: 王 锦, 在读硕士, 研究方向: 生态学, E-mail: 19834544055@163.com

通信作者: 拉 本, 教授, 硕士生导师, 主要从事生态学研究, E-mail: qhlaben@126.com

Under the treatments of YC and YD with high pH values, when the salt concentration was higher than 50 mmol/L, seeds could not germinate. The YD group had a relatively strong inhibitory effect on seed germination, and more than half of the seeds were inactive when the salt concentration was higher than 100 mmol/L. The concentration of the mixed salt solution, pH value, and the interaction between the two, had a significant effect on various germination parameters of seeds. The mixed salt alkali stress in wetland environments had a stronger and inevitable toxic effect on plants than single salt stress. Cultivation of plant seeds under salt stress at the early growth stage could enhance the tolerance to salt alkali and provide a new feasible approach for artificial restoration of saline alkali land.

**Keywords:** dandelion(*Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz); salt tolerance; salt alkali stress; seed germination; mixed salt

土壤盐渍化是影响生态环境可持续发展和经济发展的全球性现象<sup>[1]</sup>,是影响植物生长的重要非生物胁迫之一,对全球生物多样性造成的威胁日趋严重<sup>[2-3]</sup>。我国西北干旱和半干旱地区土壤盐渍化可引起植物生长、生理的显著变化,盐分聚集表土变硬,加速土壤板结使其肥力下降,不利于植物根系伸展发育,阻碍其吸收养分。西北地区盐碱地分布面积大,范围广,土地利用率和产出低,不仅造成大量土地退化甚至荒芜,严重影响区域农牧业生产,而且使当地生态环境恶化,造成严重的生态问题和社会问题<sup>[4]</sup>;尤其在青海等地的土壤主要为荒漠盐渍土,土壤盐渍化使植物不能正常生长,是制约西北地区发展的重要瓶颈<sup>[2,5-6]</sup>。

蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz)广泛分布在世界各地,是菊科多年生宿根性草本植物,又名黄花地丁、蒲公英、婆婆丁等<sup>[7]</sup>。蒲公英遍及我国华北、西北、西南、东北等省区,适应性强,喜温、喜光、耐霜冻,还具有清热解毒、消肿散结和提高免疫力等多种用途和功效,2002年被卫生部归类为药食同源物质<sup>[8-9]</sup>。

目前,关于单一盐胁迫对植物种子萌发的影响已有诸多报道。徐芬芬等<sup>[10]</sup>研究发现,干旱胁迫抑制水稻种子萌发和幼苗的生长,50~150 mmol/L的NaCl预处理可通过降低水稻种子萌发过程的电导率,提高水稻在干旱胁迫下的萌发率,缓解干旱胁迫下幼苗生长受抑制程度。刘少华等<sup>[11]</sup>研究发现,用0.1%NaCl溶液预处理过的水稻种子萌发期的抗氧化能力升高,从而促进种子在盐胁迫下的萌发。徐思远等<sup>[12]</sup>将不同倍性的药用蒲公英在不同的温度和3种单一盐溶液环境下进行种子培养,发现其最适宜温度为15~20℃,在低温(5℃)和高温(35℃)条件下,种子均可萌发,但发芽率、发芽势明显下降,溶液浓度达200 mmol/L时种子完全不能萌发;张金龙等<sup>[13]</sup>选用4种单盐溶液对蒲公英种子进行抗逆培养,观察到随着处理浓度的

升高种子萌发起始时间逐渐推迟,发芽率及相对发芽率亦降低,相对盐害率升高,碳酸氢钠NaHCO<sub>3</sub>、NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>对种子萌发的抑制作用依次减弱。在我国的大部分盐碱地区,盐化与碱化现象往往并存,主要表现形式有高盐低碱、低盐高碱以及高盐高碱等。盐化与碱化以不同比例结合,形成了复杂的盐渍化土壤<sup>[14]</sup>。自然的混合盐碱环境对种子萌发的影响相较于单一盐胁迫更为复杂,碱性盐相较于中性盐对种子萌发的抑制与毒害作用也更为显著。从实际情况出发,研究混合盐碱胁迫对植物生长各阶段的影响至关重要。

本研究以蒲公英种子为试验材料,配置4种由不同浓度的NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>组成的混合盐,利用不同类型混合盐溶液模拟混合盐碱土壤条件对蒲公英种子进行盐碱胁迫处理,并分析蒲公英种子在碱性盐胁迫下的萌发情况和变化规律,旨在探索蒲公英种植对尕斯库勒湖湿地土壤恢复的影响,以及是否能够改善其土壤的理化性质,增强土壤健康状况和生态系统服务功能。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试野生蒲公英种子于2023年8月采自青海德令哈尕斯库勒国家湿地公园,选择颗粒饱满、大小均匀一致的种子,常温条件下干燥保存备用。NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>均购买自天津市凯通化学试剂有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 经采样测定青海德令哈尕斯库勒国家湿地公园的盐碱土主要盐分类型为氯盐、硫酸盐和碳酸盐,且距湖越近盐浓度越高,pH值为7.29~9.73。据土壤盐分组成并结合相关盐分配比<sup>[5,15-16]</sup>,将NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>按不同浓度比例配制成4种不同的混合盐,4种混合盐各盐分的浓度比例分别为1:1:0:0(YA)、1:2:1:

0(YB)、1:9:9:1(YC)、1:1:1:1(YD)(表1),每种混合盐再各设5种浓度梯度(25、50、100、150、200 mmol/L),以蒸馏水为对照(CK),3次重复。4种混合盐的pH值分别为7.20、8.03、8.90、9.63(表1)。

选取蒲公英种子进行混合盐溶液预处理,将种子分别浸泡在不同处理液中24 h,再用75%乙醇消毒15 min,最后用纯水冲洗5次备用。

表1 混合盐各组分浓度配比及pH值  
Tab.1 Concentration proportion and pH values of mixed salt components

| 处理<br>Treatment | NaCl:Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :NaHCO <sub>3</sub> :Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | pH   |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| CK              | 0:0:0:0                                                                                   | 7.00 |
| YA              | 1:1:0:0                                                                                   | 7.20 |
| YB              | 1:2:1:0                                                                                   | 8.03 |
| YC              | 1:9:9:1                                                                                   | 8.90 |
| YD              | 1:1:1:1                                                                                   | 9.63 |

1.2.2 萌发试验 铺设2层无菌滤纸于90 mm直径的培养皿内,加入不同混合盐处理液,将滤纸充分润湿但无积液时,再将上述混合盐溶液预处理后的种子均匀排布在培养皿中,各50粒,共设置21个处理组,每组均进行3次重复,以确保试验准确性。每日补加相应的盐溶液使滤纸始终湿润,隔2 d更换一次用饱和混合盐溶液浸润的滤纸。将处理好的培养皿放入人工气候培养箱内,设置光照12 h与黑暗12 h,光强 $\geq 3\ 000\text{ lx}$ ,昼夜温度为25℃/15℃,相对湿度为65%~70%。每24 h记录一次种子的发芽状况,以胚根达到种子长度的50%作为发芽标志,当3 d内不再有种子萌发视为发芽结束。

1.2.3 复水试验 对于在混合盐处理条件下无发芽迹象的蒲公英种子,在保持温度、光照等条件一致的情况下在第11天进行恢复萌发试验,即用纯水彻底冲洗5次后,转移至纯水中继续培养,以观察其生长恢复情况<sup>[15]</sup>。

### 1.3 测定项目及方法

种子萌发17 d完成,第5天进行发芽势测定,第17天进行发芽率测定。

$$\text{期间发芽率} = Nt/Ts \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{盐处理发芽率} = Ms/Ts \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{最终发芽率} = Fs/Ts \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{发芽势} = \text{发芽高峰期发芽种子数}/Ts \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{发芽指数} = \sum Gt/Dt \quad (5)$$

$$\text{恢复萌发率} = \frac{Fs - Ms}{Ts - Ms} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{相对盐害率} = (\text{对照发芽率} - \text{盐处理发芽率})/\text{对照发芽率} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $Nt$ 为试验期间第 $t$ 天累计发芽种子数, $Ts$ 为供试种子总数, $Ms$ 为混合盐溶液处理下的种子萌发数, $Fs$ 为最终萌发种子数, $Gt$ 为第 $t$ 天当天种子发芽数, $Dt$ 为相应的种子发芽天数。

### 1.4 耐盐性评价

参照《植物耐盐性鉴定及评价技术规程》,以不同盐胁迫浓度处理下种子萌发阶段的相对盐害率(Relative salt damage, RSD)指标来评价其在生长初期对于盐胁迫的耐受能力;强适宜盐分浓度( $RSD \leq 20\%$ )、较强适宜盐分浓度( $20\% < RSD \leq 40\%$ )、中度适宜盐分浓度( $40\% < RSD \leq 60\%$ )、弱适宜盐分浓度( $60\% < RSD \leq 80\%$ )、不适宜盐分浓度( $RSD > 80\%$ )<sup>[13]</sup>。

### 1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据处理,采用SPSS 24.0软件进行方差分析以及差异显著性分析,用Origin 2021软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对种子萌发动态的影响

经过不同混合盐溶液处理后,YA、YB、YC、YD处理的蒲公英种子的萌发动态大体相似(图1),部分种子发芽情况如图2所示。较低盐胁迫浓度下,种子萌发第3~5天发芽率迅速上升,表现出较强的萌发活力。低浓度盐分对种子内部生理代谢过程的适当刺激促进了萌发。随着试验时间的延长,期间发芽率增速逐渐放缓,至第11天对所有处理组进行复水处理后,观察到期间萌发率均出现明显拐点,此时,又有一定比例的种子开始萌发,种子受到不同程度的盐胁迫暂时处于休眠状态,但在复水条件下恢复活性并继续萌发。随着胁迫处理浓度的增加,同一种混合盐溶液的浓度对种子发芽的抑制作用愈加明显,种子萌发率显著下降,特别是YB、YD处理组200 mmol/L下的种子几乎不发芽,此浓度盐胁迫对蒲公英种子萌发产生了强烈的抑制作用,阻碍了种子的正常发芽过程。

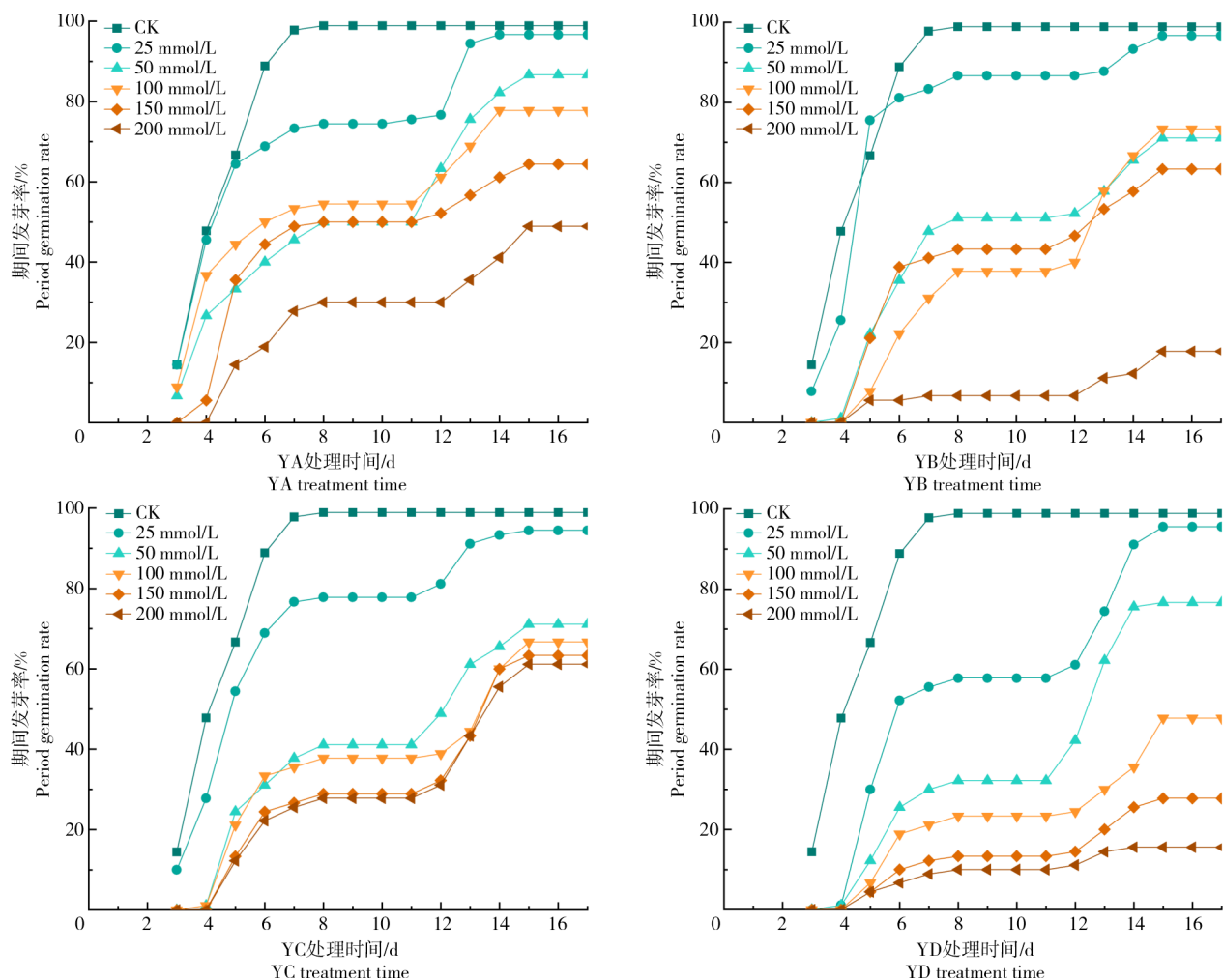


图1 混合盐胁迫对蒲公英种子萌发的影响

Fig.1 Effect of mixed salt stress on dandelion seed germination

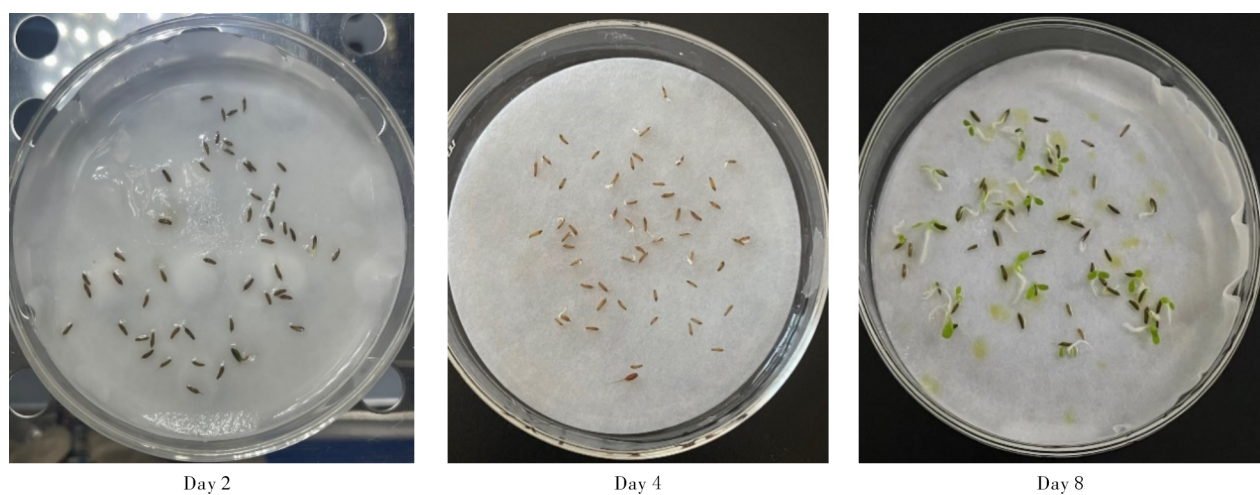


图2 不同时期种子萌发动态 (以YA组为例)

Fig.2 Seed germination dynamics in different periods (Take the YA group for example)

## 2.2 不同处理对种子萌发参数的影响

### 2.2.1 发芽率 从表2可以看出,经过10 d的混

合盐胁迫处理发芽试验,对照组(CK)的发芽率最高,达到了98.89%;所有混合盐胁迫处理组第

10 天的发芽率均显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。在混合盐胁迫处理浓度为 25 mmol/L, 不同盐碱比例的 4 个处理组最终发芽率与对照组相比, YA 处理组上升 1.11%, YB、YC、YD 处理组分别下降 2.22%、4.45%、3.33%, 但差异均不显著, 表明蒲公英种子在发芽期间对轻微盐碱有一定的耐受能力。随着盐处理浓度逐渐增大, 种子的盐处理发芽率及最终发芽率明显降低; YA 处理组 (pH 值 7.20, 浓度 200 mmol/L), 盐处理发芽率为 30.00%; YB 处理组 (pH 值 8.03, 浓度 100、150、

200 mmol/L), 盐处理发芽率分别为 37.78%、43.33%、6.67%; YC 处理组 (pH 值 8.90, 浓度为 50、100、150、200 mmol/L), 盐处理发芽率分别为 41.11%、37.78%、28.89%、27.78%; YD 处理组 (pH 值 9.63, 浓度 50、100、150、200 mmol/L), 盐处理发芽率分别为 32.22%、23.34%、13.33%、10.00%, 均显著低于同一 pH 条件下的低浓度组和 CK 处理 ( $P<0.05$ ), 表明盐碱胁迫对种子发芽有较强的抑制作用<sup>[13,16]</sup>。

表 2 混合盐胁迫下种子的发芽率及复水后的恢复情况分析

Tab.2 Seed germination under mixed saline stress and recovery germination rate after rehydration

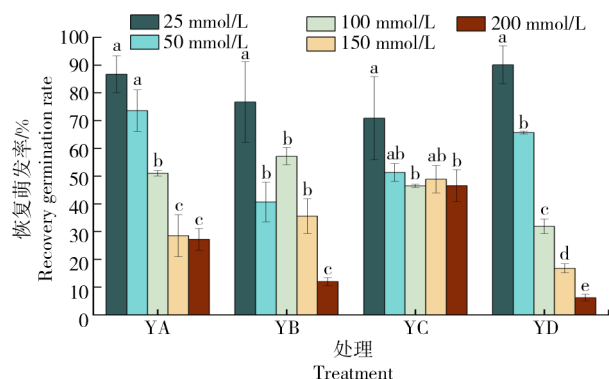
| 处理<br>Treatment | 浓度/(mmol/L)<br>Concentration | pH   | 盐处理发芽率/%<br>Germination rate in salt treatments | 恢复萌发率/%<br>Recovery germination rate | 最终发芽率/%<br>Final germination rate |
|-----------------|------------------------------|------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| YA              | 0                            | 7.00 | 98.89±1.11a                                     | 0.00±0.00d                           | 98.89±1.11a                       |
|                 | 25                           | 7.20 | 74.44±4.84b                                     | 86.67±6.67a                          | 100.00±0.00a                      |
|                 | 50                           | 7.20 | 50.00±1.92c                                     | 73.57±7.46a                          | 86.67±3.85b                       |
|                 | 100                          | 7.20 | 54.44±6.76c                                     | 50.98±0.98b                          | 77.78±2.94c                       |
|                 | 150                          | 7.20 | 50.00±1.92c                                     | 28.51±7.55c                          | 64.44±2.94d                       |
|                 | 200                          | 7.20 | 30.00±1.92d                                     | 27.18±3.92c                          | 48.89±4.01e                       |
| YB              | 0                            | 7.00 | 98.89±1.11a                                     | 0.00±0.00c                           | 98.89±1.11a                       |
|                 | 25                           | 8.03 | 86.67±1.93b                                     | 76.67±14.53a                         | 96.67±1.93a                       |
|                 | 50                           | 8.03 | 51.11±1.11c                                     | 40.63±7.15b                          | 71.11±2.94bc                      |
|                 | 100                          | 8.03 | 37.78±1.11d                                     | 57.12±3.14ab                         | 73.33±1.93b                       |
|                 | 150                          | 8.03 | 43.33±5.09d                                     | 35.56±6.26b                          | 63.33±5.09c                       |
|                 | 200                          | 8.03 | 6.67±1.93e                                      | 11.95±1.43c                          | 17.78±2.94d                       |
| YC              | 0                            | 7.00 | 98.89±1.11a                                     | 0.00±0.00c                           | 98.89±1.11a                       |
|                 | 25                           | 8.90 | 77.78±4.45b                                     | 70.83±15.02a                         | 94.44±2.94a                       |
|                 | 50                           | 8.90 | 41.11±4.84c                                     | 51.30±3.21ab                         | 71.11±4.01b                       |
|                 | 100                          | 8.90 | 37.78±6.76c                                     | 46.50±0.56b                          | 66.67±3.85b                       |
|                 | 150                          | 8.90 | 28.89±2.94c                                     | 48.84±4.91ab                         | 63.33±5.09b                       |
|                 | 200                          | 8.90 | 27.78±4.01c                                     | 46.55±5.72b                          | 61.11±5.88b                       |
| YD              | 0                            | 7.00 | 98.89±1.11a                                     | 0.00±0.00e                           | 98.89±1.11a                       |
|                 | 25                           | 9.63 | 57.78±4.84b                                     | 90.08±6.86a                          | 95.56±2.94a                       |
|                 | 50                           | 9.63 | 32.22±4.84c                                     | 65.63±0.52b                          | 76.67±1.93b                       |
|                 | 100                          | 9.63 | 23.34±3.33c                                     | 31.88±2.62c                          | 47.78±2.94c                       |
|                 | 150                          | 9.63 | 13.33±1.93d                                     | 16.73±1.64d                          | 27.78±2.94d                       |
|                 | 200                          | 9.63 | 10.00±0.00d                                     | 6.17±1.24e                           | 15.56±1.11e                       |

注: 同列数据后不同小写字母表示各处理组内不同浓度间在 0.05 水平上差异显著 ( $P<0.05$ )。表 3 同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated a significant difference among different treatments between different concentrations at the 0.05 level. The same as Tab.3.

从图 3 可以看出, 4 种混合盐处理对蒲公英种子发芽率影响不同, 复水后种子的恢复萌发率随盐浓度的升高而降低, 其中, YD 盐胁迫处理组在

高盐浓度下较其他处理组对种子萌发影响较大, 而且组内不同浓度处理的种子恢复萌发率差异显著 ( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示各处理组内不同浓度间在 0.05 水平上差异显著 ( $P < 0.05$ )。下图同

Different lowercase letters indicated significant difference among different concentrations within each treatment at the 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below

图3 复水后蒲公英种子的恢复萌发率分析  
Fig.3 Recovery germination rate of dandelion seeds after rehydration

2.2.2 发芽势和发芽指数 种子的发芽率可被视为出苗率的一个近似指标,而发芽势则更能揭示种子活力的强弱;高发芽势的种子活力高,出苗整齐茁壮。由表3可知,逐渐增强的盐胁迫使种子发芽指数和发芽势同步下降,相应的种子遭受盐害程度随之递增,最高达 93.26%,直观反映出混合盐胁迫对蒲公英种子发芽过程的抑制效应加剧。值得注意的是,YB 胁迫处理组(浓度 25 mmol/L)蒲公英种子的发芽势达 75.55%,显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ),在特定浓度下蒲公英种子尽管保持相对较高的发芽潜力和一定耐盐适应,但总体而言仍随着混合盐浓度的增加而下降,种子发芽性能呈现出不可逆的衰退趋势。对照组未受任何盐分影响的蒲公英种子发芽指数(42.78)显著高于其他盐胁迫处理组 ( $P < 0.05$ ),无胁迫条件下蒲公英种子发芽能最高。

表3 混合盐胁迫下种子的萌发参数统计分析

Tab.3 Seed germination parameters under mixed salt stress

| 处理<br>Treatment | 浓度/(mmol/L)<br>Concentration | pH   | 发芽指数<br>Germination index | 发芽势/%<br>Germinating potential | 相对盐害率/%<br>Relative salt damage rate |
|-----------------|------------------------------|------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| YA              | 0                            | 7.00 | 42.78±0.27a               | 66.67±1.92a                    | 0.00±0.00d                           |
|                 | 25                           | 7.20 | 36.71±2.39b               | 64.44±8.01a                    | 24.72±4.90c                          |
|                 | 50                           | 7.20 | 25.00±1.06c               | 33.33±1.92b                    | 49.44±1.95b                          |
|                 | 100                          | 7.20 | 27.24±2.57cd              | 44.44±4.00b                    | 44.95±6.83b                          |
|                 | 150                          | 7.20 | 20.83±0.60d               | 35.56±2.22b                    | 49.44±1.95b                          |
|                 | 200                          | 7.20 | 12.05±0.86e               | 14.44±2.94c                    | 69.66±1.95a                          |
| YB              | 0                            | 7.00 | 42.78±0.27a               | 66.67±1.92b                    | 0.00±0.00e                           |
|                 | 25                           | 8.03 | 37.60±1.12b               | 75.55±4.00a                    | 12.36±1.95d                          |
|                 | 50                           | 8.03 | 19.84±0.25c               | 22.22±2.94c                    | 48.32±1.12c                          |
|                 | 100                          | 8.03 | 15.65±0.23d               | 7.78±1.11d                     | 61.80±1.12b                          |
|                 | 150                          | 8.03 | 17.73±1.64cd              | 21.11±2.22c                    | 56.18±5.15b                          |
|                 | 200                          | 8.03 | 3.44±0.77e                | 5.56±1.11d                     | 93.26±1.95a                          |
| YC              | 0                            | 7.00 | 42.78±0.27a               | 66.67±1.92a                    | 0.00±0.00c                           |
|                 | 25                           | 8.90 | 34.50±1.57b               | 54.44±8.89a                    | 21.35±4.49b                          |
|                 | 50                           | 8.90 | 18.04±1.96c               | 24.44±2.94b                    | 58.43±4.90a                          |
|                 | 100                          | 8.90 | 16.42±2.55cd              | 21.11±4.84b                    | 61.80±6.83a                          |
|                 | 150                          | 8.90 | 13.53±1.18cd              | 13.33±1.93b                    | 70.78±2.97a                          |
|                 | 200                          | 8.90 | 12.91±1.52d               | 12.22±1.11b                    | 71.91±4.05a                          |
| YD              | 0                            | 7.00 | 42.78±0.27a               | 66.67±1.92a                    | 0.00±0.00d                           |
|                 | 25                           | 9.63 | 24.96±1.52b               | 30.00±1.92b                    | 41.58±4.90c                          |
|                 | 50                           | 9.63 | 15.94±1.14c               | 12.22±2.94c                    | 67.41±4.90b                          |
|                 | 100                          | 9.63 | 10.00±1.03d               | 6.67±1.93cd                    | 76.40±3.37b                          |
|                 | 150                          | 9.63 | 5.94±0.71e                | 4.44±1.11d                     | 86.52±1.95a                          |
|                 | 200                          | 9.63 | 4.08±0.06e                | 4.44±1.11d                     | 89.89±0.00a                          |

2.2.3 相对盐害率 盐胁迫对种子萌发的影响可以通过相对盐害率来衡量,该指标能量化盐分在种子萌发阶段对其生理功能造成的损伤程度,有助于

筛选和鉴定具有较强耐盐性的种子品种。通过比较在不同盐浓度下的相对盐害率可以系统评判种子在萌芽阶段对盐胁迫的耐受能力<sup>[12]</sup>。由表3可知,

YA 处理组在浓度为 200 mmol/L 时,蒲公英种子发芽期间相对盐害率为 69.66%,接近弱适宜盐分浓度评价阈值,说明蒲公英种子萌发时 YA 类混合盐浓度不超过 200 mmol/L 即可,种子对 YA 类盐胁迫耐受性较强;YB 处理组在浓度为 25、50 mmol/L 时,蒲公英种子发芽期间相对盐害率分别为 12.36%、48.32%,接近强适宜盐分浓度与中度适宜盐分浓度评价阈值,蒲公英种子萌发时 YB 类混合盐浓度需小于 50 mmol/L,种子对 YB 类盐胁迫耐受性适中;YC 处理组在浓度 25、50 mmol/L 时,蒲公英种子发芽期间相对盐害率分别为 21.35%、58.43%,接近较强适宜盐分浓度与中度适宜盐分浓度评价阈值,在蒲公英种子萌发阶段 YC 类混合盐胁迫浓度需在 50 mmol/L 以下,种子对 YC 类盐胁迫耐受性较弱;YD 处理组在浓度 25 mmol/L 时,蒲公英种子发芽期间相对盐害率为 41.58%,接近中度适宜盐分浓度评价阈值,说明蒲公英种子萌发阶段 YD 类混合盐胁迫浓度不能超过 25 mmol/L,种子对 YD 类盐胁迫耐受性最弱<sup>[13]</sup>。

由图 4 可知,各处理组内,混合盐胁迫使蒲公英种子萌发受到不同程度的影响,随着各组处理盐碱浓度的逐渐升高相对盐害率也不断增强。在 YA 处理组中,25 mmol/L 浓度下种子相对盐害率显著低于其他处理( $P<0.05$ ),200 mmol/L 浓度下种子相对盐害率显著高于其他浓度处理( $P<0.05$ );YB 处理组中,25、50、200 mmol/L 浓度下与其他 2 个处理间的种子损伤程度差异显著( $P<0.05$ ),200 mmol/L 浓度损伤严重,25 mmol/L 浓度相对较轻,随浓度和 pH 值的升高差异幅度增大;YC 处

理组中,在浓度 25 mmol/L 下的种子相对盐害率显著低于其他浓度处理( $P<0.05$ );YD 处理对种子的伤害程度相对较大,对种子发芽的抑制作用较强,而且高 pH 值会进一步破坏种子活力,降低发芽率和发芽势,蒲公英较不适宜在此类混合盐碱土中生长。

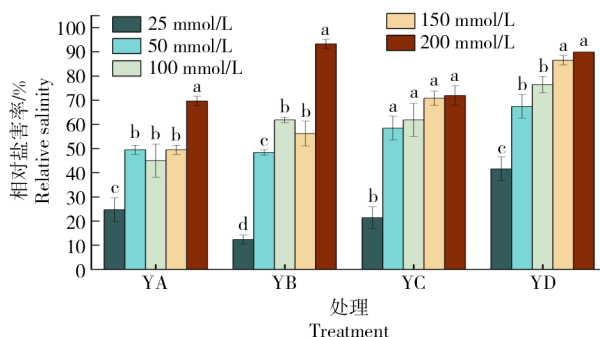


图 4 混合盐胁迫处理下蒲公英种子的相对盐害率分析

Fig.4 Relative salt damage rate of dandelion seeds under mixed salt stress treatments

2.2.4 交互作用 经过对混合盐溶液浓度、pH 值以及它们之间交互作用的分析发现,这些因素在盐处理过程中表现出差异化响应(表 4);另外,混合盐溶液浓度以及 pH 值与盐浓度的二者交互作用对种子的所有萌发参数均表现出极显著的影响( $P<0.01$ ),pH 值对种子的恢复萌发率有显著影响( $P<0.05$ )、对其余参数影响均极显著( $P<0.01$ )。盐碱环境对种子萌发的影响相较于单一盐胁迫更为复杂,在混合盐的情境中,多种因素相互交织共同作用于种子的生长过程,碱性盐相较于中性盐对种子有更为显著的抑制与毒害作用。

表 4 混合盐浓度、pH 值及其交互作用对蒲公英种子萌发参数的影响

Tab.4 Effect of mixed salt concentration, pH value, and their interaction on the germination parameters of dandelion seeds

| 项目<br>Item             | 盐处理发芽率/%<br>Germination rate in<br>salt treatments | 恢复萌发率/%<br>Recovery germina-<br>tion rate | 最终发芽率/%<br>Final germina-<br>tion | 发芽指数<br>Germination<br>index | 发芽势/%<br>Germinating<br>potential | 相对盐害率/%<br>Relative salt<br>damage rate |
|------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| 浓度 Concentration       | 119.36**                                           | 51.61**                                   | 182.19**                          | 189.66**                     | 100.92**                          | 119.90**                                |
| pH                     | 38.33**                                            | 4.17*                                     | 42.90**                           | 67.76**                      | 47.43**                           | 38.51**                                 |
| 浓度×pH Concentration×pH | 4.67**                                             | 4.69**                                    | 13.18**                           | 5.95**                       | 6.94**                            | 4.69**                                  |

注:\*,\*\*分别表示混合盐溶液浓度、pH 值及混合盐溶液浓度与 pH 值交互作用对萌发参数的影响效应显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。

Note: \* and \*\* indicated significant( $P<0.05$ ) and extremely significant( $P<0.01$ ) effects of mixed salt solution concentration, pH, and mixed salt solution concentration and pH interactions on germination parameters, respectively.

### 3 结论与讨论

蒲公英抗逆性强,在盐碱地修复中的机制主

要体现在 2 个方面:一方面是优化土壤物理特性,蒲公英根系强健,能深扎土壤,有效提升土壤的通气与透水性,进而改善土壤的物理性质;另一方面

是降低土壤盐分,蒲公英能够吸收土壤中的盐分,并转运至叶片或地上部分,显著降低土壤盐分浓度。除此之外,蒲公英还能通过调整土壤pH值,促进土壤中微生物的生长与繁殖,从而进一步改善土壤的理化特性,加速土壤修复进程<sup>[17]</sup>。

本研究发现,混合盐碱胁迫条件与pH值高低对蒲公英种子萌发均会产生抑制作用,随着胁迫盐浓度与pH值的增加,蒲公英种子的发芽率、发芽指数、发芽势等指标与对照相比均出现不同程度的下降,这与张晓晖<sup>[15]</sup>研究结果一致。通过对各处理组萌发参数的分析发现,不同盐渍环境对种子萌发特性的影响也存在差异,这种抑制影响与盐类型、盐浓度、pH值及蒲公英本身的盐碱耐受能力相关<sup>[16-20]</sup>。本研究综合前人的研究结果探讨在预处理基础上继续进行相同混合盐溶液培养,更准确地模拟自然情况,低胁迫浓度对种子萌发的影响较小,在YA处理盐浓度25 mmol/L时还表现出正面作用,与纪振东等<sup>[16]</sup>的研究观点相吻合,即较低盐浓度对植物的发芽、生长有一定的促进作用。种子发芽率的高低是评价植物品种耐盐能力的重要指标,在YA处理组中,pH值趋近于中性,随着处理浓度的增加相对盐害率同步升高,蒲公英种子盐处理发芽率、发芽势等指标值逐渐下降,高浓度的盐胁迫使外界处理溶液的渗透势显著增加,种子有缓慢失水倾向,也就阻碍了种子对水分的有效吸收,可能是其背后的生理机制,但种子尚未失活,这与孟元发<sup>[21]</sup>的研究结果一致;当pH值大于8.90且盐浓度大于50 mmol/L时,蒲公英种子萌发过程被严重抑制,发芽率降低,部分种子因此失活。相较于中性盐或者单一盐胁迫,混合碱性盐对种子的抑制效果更为明显,尽管蒲公英种子在一定程度上对盐碱胁迫具有耐受性,但混合碱性盐引发的渗透胁迫对种子萌发过程的水分吸收造成显著阻碍,强烈的渗透压远高于种子细胞内的渗透压,导致水分从细胞内流出,进而降低组织的自由水含量。渗透胁迫不仅剥夺了种子萌发所需水分,还导致细胞结构受损,新陈代谢活动受阻,使得种子无法正常进行物质转运和能量交换,萌发过程延迟。高pH值环境对细胞内酶的活性具有显著的抑制作用,这同样会阻碍种子的萌发,甚至可能导致种子的失活,混合碱性盐对种子的生长发育构成了严重的威胁,较高浓度的盐碱环境仍然对其生长造成了不小的挑战<sup>[22-23]</sup>。

在盐碱胁迫环境中,种子萌发期的耐盐性对

植物能否在盐碱土壤中成功生根发芽、出苗起到了决定性的作用,这不仅是植物能否存活并继续繁衍的关键阶段,也是其能否适应不同环境并成功建立种群的重要时期。盐碱胁迫是沿海地区植物建植过程的一大障碍,本研究经过种子萌发恢复试验发现,复水能够有效地减轻盐胁迫对蒲公英种子造成的损伤,胁迫解除后恢复萌发率的差异在YD处理组表现最显著,当种子处于低浓度盐胁迫条件下依然保持着较高的萌发潜力,这与庄华蓉等<sup>[24]</sup>、曹满航等<sup>[25]</sup>、高暝等<sup>[26]</sup>、马彦军等<sup>[27]</sup>、刘有军等<sup>[28]</sup>的研究结果相似<sup>[24-28]</sup>,可能是因为适当地干扰打破了种子的休眠状态,从而促使种子的萌发。

植物自然生长环境中的各种条件均会对其产生不同的胁迫,盐碱胁迫对植物生长各阶段造成的影响非同小可;尽管盐分对植物的正常生长至关重要,但高浓度的盐会对种子的吸水、能量代谢、酶活性等萌发相关过程产生抑制作用。同时pH值的调控则关联到种子萌发环境中离子的可利用性、膜稳定性以及某些关键酶的活性状态。碱性盐则通过降低渗透势导致渗透胁迫或是高浓度的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 等离子相互偶联引发离子毒害<sup>[29-30]</sup>。单纯考虑盐浓度或pH值对种子萌发的影响往往不足以全面揭示其复杂响应机制,只有将二者及其交互作用纳入综合分析,才能更准确地理解和预测蒲公英种子在面对不同盐碱环境时的萌发特性与适应策略。本研究结果显示,混合盐浓度、pH值及二者的交互作用均与蒲公英种子萌发参数显著相关,其协同作用与植物在盐渍化土壤中能否正常生长紧密联系,直接影响了植物对土壤的利用效率、限制了作物的品质产量,对农业生产造成了不可忽视的负面影响<sup>[31]</sup>。在种子发芽和幼苗生长时期,植物对盐碱胁迫的反应最敏感,这2个阶段的表现直接决定了植物的生长速率、光合产量、生物量的积累等<sup>[14,32-34]</sup>。

植物种子在盐碱环境中的成功萌发是其在这样的条件下生长发育的先决条件<sup>[35-36]</sup>。目前,生物改良盐碱地已成为广泛应用的措施之一,通过种植耐盐碱植物能够有效降低土壤盐渍化程度,改良土壤结构、提高土壤肥力和生产潜力,为生态环境的改善作出积极贡献<sup>[37-39]</sup>。关于如何提高植物耐盐性已经是国内外学者共同关注的重点研究领域,蒲公英是一种耐盐碱性强的植物,其种子可以在高盐土壤中萌发,幼苗和成株也能较好地适应盐碱胁迫,被广泛认为是盐碱地生态恢复和改良的理想植物<sup>[40-41]</sup>。本试验仅通过有限的几种碱性

盐对蒲公英种子进行胁迫处理,但对蒲公英种子的耐盐能力及其在盐碱胁迫下各阶段的生长状况仍缺乏系统研究。将进一步探讨其对盐胁迫的响应机制及各种环境因子之间的协同作用对于盐碱地的生态恢复和改良具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 李孝良,陈效民,徐克琴,等.肥料与石膏配施对滨海盐土油菜生长及养分吸收的影响[J].土壤通报,2012,43(5):1221-1226.  
LI X L, CHEN X M, XU K Q, et al. Effects of fertilizer with gypsum application on growing development and nutrient uptake of potting rape in coastal saline soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1221-1226.
- [2] 严小功,张金旭,杨占云,等.柴达木盆地盐碱地现状及改良措施[J].农业与技术,2020,40(7):18-20.  
YAN X G, ZHANG J X, YANG Z Y, et al. Status of saline-alkaline land in the Qaidam Basin and improvement measures [J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(7): 18-20.
- [3] RUAN C J, DA SILVA J A T, MOPPER S, et al. Halophyte improvement for a salinized world[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2010, 29(6): 329-359.
- [4] YANG Z, WANG Y, WEI X C, et al. Transcription profiles of genes related to hormonal regulations under salt stress in sweet *Sorghum*[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2017, 35(6): 586-599.
- [5] 胡娟.柴达木盆地3种优势植物耐盐特征及土壤可溶性盐离子吸收研究[D].西宁:青海师范大学,2023.  
HU J. Salt tolerance characteristics and soil soluble salt ion uptake of three dominant plant species in the Qaidam basin[D]. Xi'ning: Qinghai Normal University, 2023.
- [6] 王健,李傲瑞.我国盐碱地改良技术综述[J].现代农业科技,2019(21):182-183.  
WANG J, LI A R. A summary of improvement techniques of saline-alkali land[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(21): 182-183.
- [7] 刘燕,彭章明,栗珊,等. HPLC同时测定宜宾产蒲公英中的咖啡酸和绿原酸[J]. 华西药理学杂志, 2010, 25(2): 198-199.  
LIU Y, PENG Z M, SU S, et al. Determination of caffeic acid and chlorogenic acid in *Herba taraxaci* from Yibin by HPLC [J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2010, 25(2): 198-199.
- [8] 孟然,薛志忠,鲁雪林,等.蒲公英的功效成分与药理作用研究进展[J].江苏农业科学,2021,49(9):36-43.  
MENG R, XUE Z Z, LU X L, et al. Research progress on active components and pharmacological effects of *Taraxacum mongolicum* Hand. Mazz[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(9): 36-43.
- [9] 付晨青,何立威,王秀萍,等.药食同源蒲公英的开发应用研究现状与展望[J].陕西农业科学,2021,67(5):86-88.  
FU C Q, HE L W, WANG X P, et al. Research status and prospect of development and application of medicinal and edible dandelion[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2021, 67(5): 86-88.
- [10] 徐芬芬,郭定生,彦有娟,等. NaCl浸种预处理对水稻种子萌发期抗旱性的影响[J]. 杂交水稻, 2018, 33(2): 49-51.  
XU F F, GUO D S, YAN Y J, et al. Effects of seed soaking pretreatment of NaCl on drought resistance in seed germination stage of rice[J]. Hybrid Rice, 2018, 33(2): 49-51.
- [11] 刘少华,朱学伸,王晗,等. NaCl预处理对盐胁迫下水稻种子萌发特性的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(5): 12-16.  
LIU S H, ZHU X S, WANG H, et al. Effects of NaCl pretreatments on the characteristics of seed germination of hybrid rice under salt stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(5): 12-16.
- [12] 徐思远,张建,郑茜. 温度和盐碱度对药用蒲公英种子萌发的影响[J]. 种子, 2016, 35(1): 87-89.  
XU S Y, ZHANG J, ZHENG Q. The influence of temperature and salinity-alkalinity stress on seed germination of *taraxacum. officinale*[J]. Seed, 2016, 35(1): 87-89.
- [13] 张金龙,陈宏亮,王鹏山,等. 不同盐胁迫对华蒲公英种子萌发的影响[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(2): 10-14.  
ZHANG J L, CHEN H L, WANG P S, et al. Effects of different salt stress on seed germination of *Taraxacum borealisinense* kitam[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2021, 40(2): 10-14.
- [14] 潘多锋,申忠宝,王建丽,等. 碱性盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2015(14): 67-70.  
PAN D F, SHEN Z B, WANG J L, et al. Effect of alkaloid-saline stress on the seed germination and seedling growth of *Trifolium repens*[J]. Northern Horticulture, 2015(14): 67-70.
- [15] 张晓晖. 盐碱胁迫对蒲公英种子萌发及幼苗生长影响的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.  
ZHANG X H. Study on the effect of salt stress on seedling germination and growth of *T. mongolicum*[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.
- [16] 纪振冬,周培禄,丁小飞,等. 混合盐胁迫对油菜种子萌发的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(3): 1-7.  
JI Z D, ZHOU P L, DING X F, et al. Effects of complex saline-alkali stress on seed germination of rapeseed (*Brassica napus*) [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2023, 29(3): 1-7.
- [17] 高璿濛. 松嫩盐碱草地蒲公英根围丛枝菌根真菌多样性与功能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.  
GAO X M. Research on diversity and function of arbuscular mycorrhizal fungi from *Taraxacum mongolicum* rhizosphere in Songnen saline-alkali grassland[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [18] 尹娟,朱庆松,赵晶晶,等. 超声波对盐胁迫下紫松果菊种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(8): 117-127.  
YIN J, ZHU Q S, ZHAO J J, et al. Effects of ultrasound on seed germination and seedling physiological characteristics of *Echinacea purpurea* under salt stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(8): 117-127.
- [19] 戈珍梅,刘治国,赵露,等. 盐胁迫对膜荚黄芪种子萌发的影响[J]. 作物杂志, 2019(6): 187-194.  
GE Z M, LIU Z G, ZHAO L, et al. Effects of salt stress on seeds germination of *Astragalus membranaceus*[J]. Crops, 2019(6): 187-194.
- [20] 姜昕禹,候伟峰,温丽,等. 不同盐胁迫对斜茎黄芪种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(6): 95-99.  
JIANG X Y, HOU W F, WEN L, et al. Effects of different

- salt stresses on seed germination and seedling growth of *As-tragalus laxmannii*[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2022, 43(6):95-99.
- [21] 孟元发. 外源硅对苜蓿盐胁迫的缓解效应及调控机理[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2020.
- MENG Y F. Alleviation effects and mechanisms of exogenous silicon on salt stress-induced damage in alfalfa[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020.
- [22] 杨春武, 贾娜尔·阿汗, 石德成, 等. 复杂盐碱条件对星星草种子萌发的影响[J]. 草业学报, 2006, 15(5):45-51.
- YANG C W, JIANAER A, SHI D C, et al. Effects of complex salt and alkali conditions on the germination of seeds of *Puccinellia tenuiflora*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(5):45-51.
- [23] MOHAMMAD M, SHIBLI R, AJLOUNI M, et al. Tomato root and shoot responses to salt stress under different levels of phosphorus nutrition[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(8):1667-1680.
- [24] 庄华蓉. 单盐和混合盐胁迫对沙冬青种子萌发的影响[J]. 节水灌溉, 2015(2):15-20.
- ZHUANG H R. Effects of single and compound salt stress on seed germination of *Ammopiptanthus mongolicus*[J]. Water Saving Irrigation, 2015(2):15-20.
- [25] 曹满航, 李进, 张婷, 等. 温度和水分及盐分胁迫对银沙槐种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(4):746-753.
- CAO M H, LI J, ZHANG T, et al. Seed germination of *Ammodendron argenteum* under temperature, drought and salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(4):746-753.
- [26] 高暝, 李毅, 种培芳, 等. 渗透胁迫下不同地理种源白刺的生理响应[J]. 草业学报, 2011, 20(3):99-107.
- GAO M, LI Y, CHONG P F, et al. Physiological responses of *Nitraria tangutorum* from different geographic provenances under osmotic stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3):99-107.
- [27] 马彦军, 祝小娟, 何瑞雪. 盐爪爪种子萌发期抗盐性研究[J]. 草地学报, 2019, 27(5):1237-1242.
- MA Y J, ZHU X J, HE R X. Study on salt resistance of *Kalidium foliatum* seeds at germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5):1237-1242.
- [28] 刘有军, 刘世增, 康才周, 等. 青海云杉种子萌发特性[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5):877-881.
- LIU Y J, LIU S Z, KANG C Z, et al. Seed germination of *Picea crassifolia* kom[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(5):877-881.
- [29] 徐猛, 马巧荣, 张继涛, 等. 盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应[J]. 生态学报, 2011, 31(3):784-792.
- XU M, MA Q R, ZHANG J T, et al. Osmotic and ionic stress effects of high NaCl concentration on seedlings of four wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3):784-792.
- [30] 杨小菊, 赵昕, 石勇, 等. 盐胁迫对砂蓝刺头不同器官中离子分布的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4):116-122.
- YANG X J, ZHAO X, SHI Y, et al. Effects of salt stress on ion distribution in different *Echinops gmelini* organs[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4):116-122.
- [31] 吕婷, 刘涛, 梁瑞芳, 等. 不同处理对青藏高原油菜种子萌发特性的影响[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2020, 36(4):38-43.
- LV T, LIU T, LIANG R F, et al. Effects of different treatments on seed germination characteristics of *Brassica napus* from the Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Qinghai Normal University(Natural Science Edition), 2020, 36(4):38-43.
- [32] 韩萌, 张月学, 潘多锋, 等. 混合盐碱胁迫对3种无芒雀麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2012(7):119-122.
- HAN M, ZHANG Y X, PAN D F, et al. Effects of saline-alkaloid stress on the seed germination and seedling growth of three smooth brome varieties[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(7):119-122.
- [33] XU X Y, FAN R, ZHENG R, et al. Proteomic analysis of seed germination under salt stress in soybeans[J]. Journal of Zhejiang University. Science.B, 2011, 12(7):507-517.
- [34] 卢艳敏, 苏长青, 李会芬. 不同盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4):123-129.
- LU Y M, SU C Q, LI H F. Effects of different salts stress on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4):123-129.
- [35] 申忠宝, 潘多锋, 王建丽, 等. 混合盐碱胁迫对5种禾草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5):914-920.
- SHEN Z B, PAN D F, WANG J L, et al. Effects of saline-alkaloid stress on seed germination and seedling growth of grasses[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(5):914-920.
- [36] 刘杰, 张美丽, 张义, 等. 人工模拟盐、碱环境对向日葵种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(10):1818-1825.
- LIU J, ZHANG M L, ZHANG Y, et al. Effects of simulated salt and alkali conditions on seed germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. Acta Agonomica Sinica, 2008, 34(10):1818-1825.
- [37] 杜文娟. 探讨干旱区盐碱地生态治理关键技术[J]. 农家参谋, 2019(18):174.
- DU W J. Exploring key technologies for ecological management of saline-alkaline land in arid zones[J]. The Farmers Consultant, 2019(18):174.
- [38] 边荣荣, 孙兆军, 李向辉, 等. 西北盐碱地改良利用技术研究现状及展望[J]. 宁夏工程技术, 2016, 15(4):404-408.
- BIAN R R, SUN Z J, LI X H, et al. Present situation and prospect of improvement and utilization of saline-alkali land in northwest[J]. Ningxia Engineering Technology, 2016, 15(4):404-408.
- [39] 郭圣浩. 盐碱地改良技术研究现状与新发展[J]. 山西水土保持科技, 2019(4):4-6.
- GUO S H. Research status and new development of the improvement technology of saline-alkali land[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2019(4):4-6.
- [40] 贾美美. 盐碱胁迫对蒲公英生长和品质的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2023.
- JIA M M. Effects of saline-alkali stress on growth and quality of *Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [41] 鲁雪林, 吴哲, 王秀萍, 等. 盐碱地蒲公英种植技术的研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(1):57-59.
- LU X L, WU Z, WANG X P, et al. Research on the cultivation technology for the dandelion in saline-alkali land[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(1):57-59.