

沙蒿种子萌发对 NaCl 及聚乙二醇胁迫的响应

陈东凯¹, 骆汉¹, 马瑞², 谢永生¹, 段洁³

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 陕西省渭南市临渭区林业工作站, 陕西 渭南 714000)

摘要: [目的] 研究在盐分以及干旱胁迫条件下沙蒿种子的萌发能力, 为沙蒿的人工培育和栽种提供参考依据。[方法] 以沙蒿种子为试验材料, 使用不同浓度的 NaCl 溶液(0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, 1.6%, 1.8%)和聚乙二醇(PEG)溶液(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)模拟盐分以及干旱对种子的胁迫条件, 测定种子萌发初期的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数。[结果] 当 NaCl 浓度 $\leq 0.6\%$ 时, 上述指标与对照组相比未发生显著变化; 但当溶液浓度高于这一范围时, 各项指标则随浓度升高而显著降低; 说明 NaCl 溶液浓度为 0.6% 是种子正常萌发的适宜浓度界限。当 PEG 浓度 $\leq 15\%$ 时, 沙蒿种子的上述指标与对照组相比未发生显著变化; 但当 PEG 浓度高于 15% 时, 种子各项指标与对照组相比则显著降低; 说明 PEG 浓度为 15% 是种子正常萌发的适宜浓度界限。[结论] 沙蒿种子对轻、中度的盐分及干旱胁迫表现出耐受性, 在含盐量较低的土壤以及轻、中度的干旱环境中仍可正常萌发。

关键词: 沙蒿; 种子; 盐胁迫; 干旱胁迫; 萌发

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0161-06

中图分类号: Q945

文献参数: 陈东凯, 骆汉, 马瑞, 等. 沙蒿种子萌发对 NaCl 及聚乙二醇胁迫的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 161-166. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbetb. 2021. 01. 023; Chen Dongkai, Luo Han, Ma Rui, et al. Response of seed germination of *Artemisia desertorum* to NaCl and polyethylene glycol stress [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 161-166.

Response of Seed Germination of *Artemisia Desertorum* to NaCl and Polyethylene Glycol Stress

Chen Dongkai¹, Luo Han¹, Ma Rui², Xie Yongsheng¹, Duan Jie³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Forestry College, Gansu Agricultural University,

Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Forestry Station of Linwei District, Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract: [Objective] The germination ability of *Artemisia desertorum* seeds under salt and drought stress was investigated to provide a reference for artificial cultivation and planting of *A. desertorum*. [Methods] Using *A. desertorum* seeds as experimental materials, different concentrations of NaCl solutions (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, 1.6%, and 1.8%) and polyethylene glycol (PEG) solutions (5%, 10%, 15%, 20%, and 25%) were applied to simulate salinity and drought stress conditions on seeds. The germination rate, germination potential, germination index, and vigor index were measured in the early stage of seed germination. [Results] When the NaCl concentration was $\leq 0.6\%$, the above-mentioned indices did not change significantly compared with the control group. However, when the solution concentration was higher than this range, the indices decreased significantly with the increase in concentration. The NaCl solution concentration of 0.6% was the most suitable concentration limit for normal seed germination. When the PEG concentration was $\leq 15\%$, the above indices of *A. desertorum* seeds did not change significantly compared with the control group. However, when the PEG concentration was higher than 15%, the seed indices decreased significantly compared with the control group. The PEG concentration of 15% was the

收稿日期: 2020-10-15

修回日期: 2020-11-06

资助项目: 国家重点研发计划项目“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”(2016YFC0503702)。

第一作者: 陈东凯(1996—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士研究生, 研究方向为植物生理与水土保持。Email: imchendk@163.com。

通讯作者: 骆汉(1985—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。Email: hanl@ms.iswc.ac.cn。

most suitable concentration limit for normal germination. [Conclusion] *A. desertorum* seeds showed tolerance to mild and moderate salt and drought stress and could still grow normally in low salt content soil and mild and moderate drought environments.

Keywords: *Artemisia desertorum*; seed; salt stress; drought stress; germination

中国广袤的西北地区常年干旱少雨, 由其所引发的一系列问题是制约当地社会经济发展与生态环境建设的重要因素。据研究, 在植物所遭受的各种非生物灾害中, 干旱对其生长造成的危害最为严重^[1]; 且整个西北地区植被分布稀疏, 地表常年裸露在外, 土壤蒸发量也较大, 盐分在地表聚集, 导致盐渍化问题也十分突出^[2], 这使当地植物除了遭受干旱的袭扰外, 还要经受盐分的侵害。近年来, 随着中国对自然生态的逐渐重视, 许多学者对西北地区的荒漠化治理、植被恢复、以及对盐渍化土地的开发利用等问题进行了研究, 发现栽种耐盐、耐旱植物是改善生态环境最有效、最经济的一种措施^[3-5]。沙蒿 (*Artemisia desertorum*) 是常见的沙生、旱生植物, 具有耐干旱、耐盐碱、耐沙埋等特点, 是干旱地区防风固沙的理想植物^[6], 且由于其较好的耐盐性, 也多栽种于遭受盐渍化侵害的地区, 以此来改善土壤质地和结构, 减弱盐渍化造成的危害^[7]。

在植物生长发育的过程中, 种子的萌发阶段对植物能否存活起到关键作用^[8], 而生活在干旱、盐渍化地区的植物, 土壤中的水分、盐分含量又会直接影响种子的萌发。因此, 植物种子的萌发阶段是研究该植物抗旱、抗盐性的重要时期^[9]。聚乙二醇 (PEG-6000) 有良好的亲水性, 可降低溶液水势, 使得植物根系难以从周围吸收水分, 因此在植物的抗旱性研究中, 通常使用 PEG-6000 模拟植物受到的干旱胁迫^[10-13]。而在研究植物的耐盐性时, 则常使用 NaCl 溶液模拟植物受到的盐分胁迫^[14-17]。马彦军等^[18]就曾运用 PEG 以及 NaCl 溶液对沙冬青种子的抗旱、抗盐性进行了相关的研究, 为沙冬青种的人工栽种提供了参考依据。在沙蒿方面, 一些学者对沙蒿根系的固土能力^[19]、落叶溶解性有机质^[20]、及其对生物结皮和下伏土壤养分的影响^[21]进行了研究, 但关于沙蒿种子萌发以及其抗盐、抗旱性的研究并不多见。因此本试验分别运用不同浓度的聚乙二醇 (PEG-6000) 和 NaCl 溶液处理种子, 以模拟沙蒿种子萌发时受到的干旱以及盐分胁迫, 探究在不同含盐量以及干旱胁迫条件下种子萌发期间各项生理指标的变化过程, 了解沙蒿的抗盐、抗旱程度, 揭示其能正常萌发的适宜浓度范围, 以期沙蒿在盐渍化以及干旱地区的人工栽种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

沙蒿种子于 2016 年 10 月采收于甘肃民勤沙生植物园 (103°09'11"E, 38°62'48"N), 平均海拔 1 400 m, 温带大陆性干旱气候, 年均降水量为 127.7 mm, 年均蒸发量 2 623 mm, 年均气温 8.3 °C。千粒重 0.467 g, 经干燥、清洁处理后存放于 4 °C 的冷藏室中保存。试验所用聚乙二醇 6000 (PEG-6000)、NaCl 分别由中国医药 (集团) 上海化学试剂公司、天津西尔斯化工有限公司生产。

1.2 试验方法

1.2.1 种子预处理 挑选大小一致、没有明显破损及病虫害的种子为试验材料, 使用 75% 的酒精对供试种子消毒 1~2 min, 之后用蒸馏水冲洗种子表面, 再将其浸泡于 75 °C 的水中 24 h^[22], 最后使用滤纸吸干表面水分备用。

1.2.2 培养皿处理 将玻璃培养皿放入 122 °C 的高压蒸汽锅中消毒 25 min^[23]。一组 3 个培养皿, 编号 1, 2, 3, 试验共设置 15 组, 共计 45 个培养皿。其中蒸馏水对照 1 组, PEG 溶液处理 5 组, NaCl 溶液处理 9 组。每个培养皿中铺设两张干净无菌的滤纸, 再将预处理好的沙蒿种子均匀放置在滤纸上, 每个培养皿共放置 50 粒种子。

1.2.3 PEG 胁迫处理 试验采用纸上发芽法^[24]。按照 Michel 等^[25]的方法, PEG-6000 溶液配置 5 个浓度水平: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% (质量分数)。每组培养皿对应一个浓度水平 (3 次重复), 将 PEG 溶液加入每个培养皿中直至滤纸饱和, 然后对各培养皿依次称重记录。

1.2.4 NaCl 胁迫处理 配置浓度 (质量分数) 分别为 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, 1.6%, 1.8% 的 NaCl 溶液, 每组培养皿对应一个浓度水平 (3 次重复)。将配置完成的 NaCl 溶液加入培养皿中直至滤纸饱和, 并依次称重记录。最后将所有处理完毕的培养皿放置在室温 25 °C, 相对湿度为 50%, 采用自然光照的组培室中进行种子萌发试验。

1.3 种子发芽观测

按照《国际种子检验规程》^[26]的方法, 本次试验以 30 d 为期限。从处理完毕的第二天开始, 每天使

用分析天平定时称量培养皿,根据重量的变化及时向培养皿内加入蒸馏水,补偿由于种子吸收以及水分蒸发而损失的水分,确保 PEG 渗透压和 NaCl 浓度不变。同时每天应观察并记录每个培养皿中发芽的种子数直至整个发芽过程结束。结束后,从每个培养皿中随机挑选 10 株沙蒿幼苗为一组,使用分析天平称量并记录每组幼苗的鲜重并取平均值。

1.4 测定指标

发芽率指在测试种子中,已发芽的种子粒数占测试种子总粒数的百分比。

$$GR = N/M \times 100\% \quad (1)$$

式中:GR 为种子发芽率(%); N 为已发芽的种子数(粒); M 为每盒中的种子总数(粒);

发芽势指在整个试验过程中,从种子开始发芽到种子发芽达到最高峰时,已发芽的种子数占测试种子粒数的百分比^[27]。

$$GP = W_2/M \times 100\% \quad (2)$$

式中:GP 为种子发芽势(%); W_2 为在第 2 天种子发芽达到最高峰时发芽的种子数(粒);

发芽指数是指测试种子发芽成活的统计指数,一般情况下代表该测试种子的均值发芽率^[28]。

$$GI = \sum G_t / D_t \quad (3)$$

式中:GI 为种子发芽指数; G_t 为第 t 天发芽的种子数,粒; D_t 为相对应的天数;

种子活力是指种子在所处环境条件下的发芽出苗能力^[29]。

$$VI = GI \times S \quad (4)$$

式中:VI 为种子活力指数; S 为幼苗鲜重(g);

1.5 数据处理

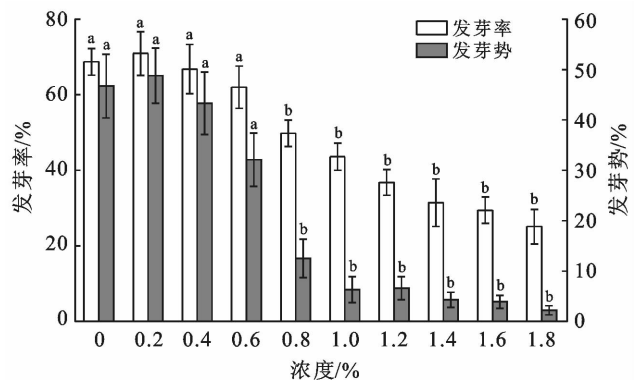
使用 Excel 2013 软件对数据进行预处理,使用 SPSS 19.0 分析软件对发芽率、发芽指数等指标进行差异显著性检验(显著水平为 95%),使用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 种子发芽率、发芽势对 NaCl 胁迫的响应

本试验中所有处理 3 次重复之间差异性不显著($p > 0.05$)。从图 1 可以看出,随着 NaCl 浓度逐渐升高,沙蒿种子的发芽率总体呈现下降趋势。但当使用 0.2% 的 NaCl 溶液处理种子时,沙蒿种子的发芽率为 70.9%,比对照组高 2.2%。当 NaCl 溶液浓度高于 0.2% 时,沙蒿种子的发芽率虽然随着溶液浓度的升高而持续降低,但 NaCl 的浓度为 0.4%,0.6% 时,沙蒿种子的发芽率与对照组相比并未表现出显著差异性($p > 0.05$);当溶液浓度从 0.8% 递增到 1.8%

时,种子发芽率与对照组相比下降幅度较大且差异性显著($p < 0.05$),当溶液浓度达到本次试验的最大值 1.8% 时,种子的发芽率仅为 25.1%,比对照组的发芽率低 43.6%。这表明,当 NaCl 浓度 $\leq 0.6\%$ 时,沙蒿种子发芽率未受到显著影响,但当其浓度高于 0.6% 时,沙蒿种子的萌发能力受到了明显抑制。发芽势可以用来衡量种子品质的好坏,一般来说,发芽势越高说明种子品质越好发芽也会更加同步,因此人们常用这一指标来表示种子发芽的整齐程度^[30]。由图 1 可见,随着 NaCl 溶液浓度的逐渐升高,沙蒿种子的发芽势总体也呈下降态势。当使用 0.2% 的 NaCl 溶液处理沙蒿种子时,种子的发芽势为 48.8%,与对照组的 46.7% 相比上升了 2.1%,说明低浓度的 NaCl 溶液对种子萌发有一定促进作用。当溶液浓度从 0.4% 递增到 1.8% 时,种子发芽势逐渐降低,为 3.4%~44.5%。但当溶液浓度为 0.4%,0.6% 时,其发芽势与对照组相比没有表现出显著差异性($p > 0.05$);当 NaCl 的浓度高于 0.6% 后,种子的发芽势与对照组相比下降幅度在 34.2%~44.7% 之间,下降幅度较之前明显增大,且与对照组相比差异性显著($p < 0.05$)。



注:图中同组不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同浓度 NaCl 溶液处理下沙蒿种子发芽率与发芽势

2.2 种子发芽指数、活力指数对 NaCl 胁迫的响应

从图 2 可以看到,当沙蒿种子受到各浓度梯度的 NaCl 溶液处理后,沙蒿种子的发芽指数和活力指数总体皆呈下降趋势。当使用浓度为 0.2%,0.4%,0.6% 的 NaCl 溶液处理沙蒿种子时,其发芽指数与对照组相比差异不显著($p > 0.05$),其数值分别下降了 4.5,10.1,12.7;当 NaCl 浓度 $> 0.6\%$ 时,各处理下的种子发芽指数分别下降了 27.9,31.4,37.8,41.2,45.0,54.0,下降幅度较之前有明显增加,且与对照组相比差异显著($p < 0.05$)。当 NaCl 溶液的浓度在 0.2%~0.6% 的范围内变化时,沙蒿种子的活力指数

与对照组相比差异不显著($p>0.05$),其数值分别下降了 0.4, 0.6, 0.8。当 NaCl 溶液 $>0.6\%$ 时,各处理下的种子活力指数与对照组差异显著($p<0.05$),其数值分别下降了 1.6, 1.8, 2.2, 2.4, 2.8, 3.1。可见,当 NaCl 溶液的浓度 $\leq 0.6\%$ 时,沙蒿种子仍可以正常萌发,对盐分胁迫表现出较强耐受性。

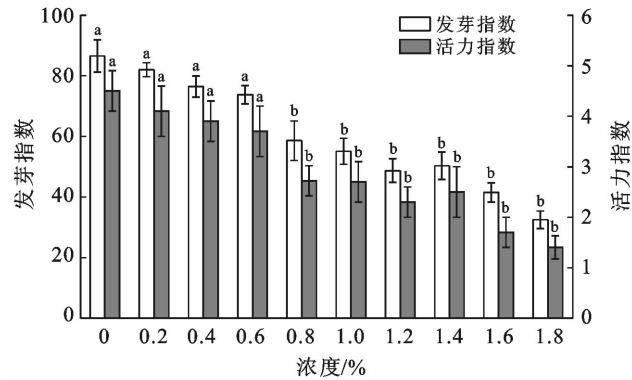


图 2 不同浓度 NaCl 溶液处理下沙蒿种子发芽指数与活力指数

2.3 种子发芽率、发芽势对 PEG 胁迫的响应

由图 3 可知,随着 PEG 溶液浓度的逐步升高,沙蒿种子的发芽率逐步降低。当 PEG 浓度 $\leq 15\%$ 时,沙蒿种子的发芽率均保持在 60%以上,与对照组的发芽率 68.7%相比有小幅下降(2.4%~8.9%),但差异不显著($p>0.05$)。当 PEG 浓度增加至 20%时,种子的发芽率为 46.4%,比对照组显著降低,下降幅度为 22.3%($p<0.05$);当 PEG 溶液浓度达到 25%时,沙蒿种子的发芽率仅为 32.3%,比对照组显著降低了 36.4%($p<0.05$),这表明沙蒿种子在 PEG 浓度 $>15\%$ 时,种子的发芽能力被显著抑制。从种子发芽势来看,使用不同浓度的 PEG 溶液处理沙蒿种子时,发芽势也呈现出下降趋势(图 3)。当 PEG 浓度为 5%~15%时,种子发芽势与对照组 46.7%均无显著差异,其中,当溶液浓度为 5%时,种子发芽势为 47.9%,略高于对照组($p>0.05$)。当溶液浓度递增到 20%时,沙蒿种子的发芽势为 15.8%,与对照组相比明显下降($p<0.05$),其发芽势降低了 30.9%。当浓度达到 25%时,种子的发芽势仅为 14.5%,与对照组相比下降了 32.2%($p<0.05$),这表明 PEG 浓度 $\leq 15\%$ 时,种子萌发能力未受到显著影响,但当其浓度继续增大时,种子发芽率与发芽势均显著降低。

2.4 种子发芽指数、活力指数对 PEG 胁迫的响应

通过图 4 可见,当沙蒿种子被不同浓度的 PEG 溶液处理后,种子的发芽指数和活力指数整体呈现出下降趋势。当 PEG 浓度为 5%~15%时,两项指标

与对照组均无显著差异,其中,当 PEG 溶液浓度为 5%时,种子的两项指标略高于对照组($p>0.05$);当 PEG 溶液的浓度为 10%, 15%时,种子的发芽指数相比对照组分别下降 0.24, 2.54, 种子的活力指数分别下降 0.1, 0.2, 下降幅度均较小($p>0.05$)。当 PEG 的浓度达到 20%, 25%时,沙蒿种子的发芽指数和活力指数下降幅度明显增大,发芽指数减少了 22.14, 42.49, 活力指数下降了 1.6, 2.7, 与对照组呈现出显著差异($p<0.05$)。

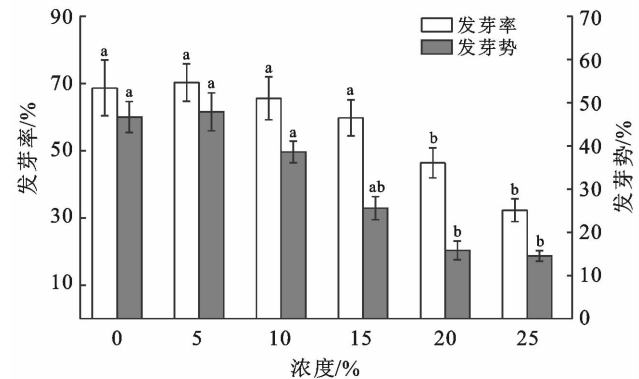


图 3 不同浓度 PEG 溶液处理下沙蒿种子发芽率与发芽势

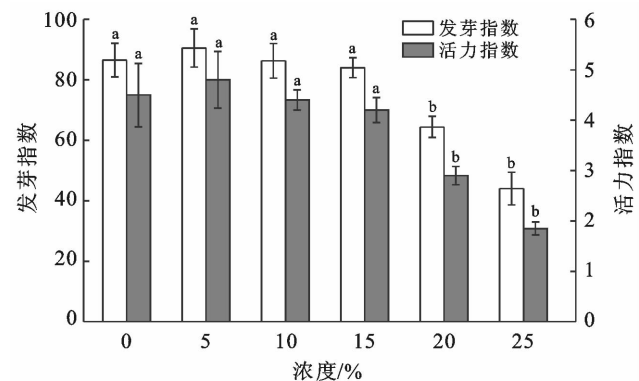


图 4 不同浓度 PEG 溶液处理下沙蒿种子发芽指数与活力指数

3 讨论

本试验使用 NaCl 溶液处理沙蒿种子模拟种子受到的盐分胁迫,探讨沙蒿种子的萌发能力在盐渍化地区受到的影响。结果显示,当使用浓度为 0.2%~0.6%的 NaCl 溶液处理种子时,种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数与对照组相比虽有一定的波动,但并未表现出显著差异;这其中,当 NaCl 溶液浓度为 0.2%时,种子的发芽率、发芽势皆高于对照组,这说明低浓度的 NaCl 溶液对种子萌发有一定的促进作用。这与张苏江等^[31]、马琳等^[32]的研究结论是一致的,这是因为 NaCl 溶液中的 Na^+ 为植物生长发

育初期所需元素,从而促进种子萌发;与此同时溶液中的部分 Na^+ 能够提高细胞渗透势促进种子吸水,这同样有利于种子的萌发。但当 NaCl 溶液的浓度为 0.8% 时,上述各项指标均显著下降 ($p < 0.05$),之后随着溶液浓度的持续升高,种子的上述指标则进一步降低。较高浓度的 NaCl 溶液会使种子外部渗透压升高,导致种子内部水分进入到溶液中,限制种子萌发;同时高浓度的离子环境对植物种子又会造成离子毒害作用,从而抑制种子萌发能力^[33]。本试验中 NaCl 溶液浓度为 0.6% 时,是种子萌发能力显著降低的转折点。由此可推知,沙蒿种子对较低含盐量的环境表现出较强耐受性,这与杨佳鑫等^[30],朱金方等^[34]的研究结果相似。

使用 PEG 溶液处理沙蒿种子模拟干旱对种子的胁迫,主要是利用其对种子的渗透调节作用^[35]。在此次试验中,我们发现当 PEG 溶液的浓度为 5%~15% 时,沙蒿种子的发芽率均保持在 60% 左右,发芽能力差异不显著 ($p > 0.05$);这其中当种子受到 5% 的 PEG 溶液处理时,其发芽势、发芽指数、活力指数分别比对照组高出 1.2, 4.0, 0.3, 这表明低浓度的 PEG 溶液对种子萌发有促进作用,这与一些研究结论是一致的^[36-37],原因可能是轻微干旱胁迫促使种子自我保护机制的启动,减少种子吸胀过程中膜系统的损伤,有利于膜系统的修复,提高了种子内酶的活性加速了新陈代谢作用,从而提高植物种子发芽率^[38]。但当 PEG 溶液的浓度达到 20%, 25% 时,种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数有了明显下降。由此可知,沙蒿种子在 PEG 浓度 $\leq 15\%$ 时,其发芽能力未受到明显抑制,但是当溶液浓度超过这一数值后,种子的萌发能力会随浓度的升高而大幅降低。这是因为种子在重度干旱胁迫下,细胞内自由基过度积累,造成膜的完整性受损并导致渗透调节功能紊乱,种子萌发能力被抑制^[39]。本试验中,PEG 溶液的浓度为 15% 时,是种子萌发能力显著降低的转折点,高于此浓度时种子萌发受到显著抑制。

沙蒿作为耐盐、耐旱的理想植物在西北地区广泛栽种,本试验结果表明沙蒿种子萌发能力随 NaCl 和 PEG 溶液浓度的升高均呈先上升后下降,在某一浓度后显著受抑制的变化趋势,这与沙冬青^[40]、沙棘^[41]、柽柳等^[42]沙生植物对干旱和盐分胁迫的响应机制相似,只是不同物种对应不同的溶液适宜值、临界值和极限值。本试验结果补充了对沙蒿种子耐旱、耐盐碱程度的研究,揭示了适宜其种子萌发的 NaCl 和 PEG 浓度界限,对其最适宜种植的环境条件和区域的确定具有重要的参考价值,可提高植被恢复效

率、节约治理成本。但本试验仍存在一定的不足,因为 NaCl 同样会改变溶液渗透压,因此沙蒿种子会遭受盐害以及干旱的双重胁迫。在今后的试验中,我们将改进试验设计,将 NaCl 与 PEG 溶液的渗透压设为相同,比较干旱以及盐害对种子萌发影响的相对大小。

4 结论

沙蒿种子萌发,NaCl,PEG 溶液的最适宜浓度分别为 0.2%, 5%。在较低浓度的 NaCl ($\leq 0.6\%$), PEG ($\leq 15\%$) 溶液的胁迫下,其各项生理指标与对照组相比未发生显著变化,种子的萌发能力未受明显抑制。当 NaCl 溶液浓度 $> 0.6\%$, PEG 浓度 $> 15\%$ 时,种子的萌发能力显著降低。因此 NaCl 浓度为 0.6%, PEG 浓度为 15% 时,是沙蒿种子萌发能力受到明显抑制的转折点。试验结果证实了沙蒿仅在一定盐分以及干旱胁迫程度内有较强的耐盐、耐旱性,对西北地区沙蒿的人工栽种具有指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 胡小文,王彦荣,武艳培. 荒漠草原植物抗旱生理生态学研究进展[J]. 草业学报, 2004, 13(3): 9-15.
- [2] 燕辉. 西北旱区两种典型沙生植物对盐胁迫响应的研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [3] 郭世乾,崔增团,傅亲民. 甘肃省盐碱地现状及治理思路与建议[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(4): 75-79.
- [4] 刘玉艳,于凤鸣,曹慧颖,等. 盐胁迫对紫花地丁植株生长及生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 36-40.
- [5] Zhao Kefu, Song Jie, Feng Gu, et al. Erratum to: Species, types, distribution, and economic potential of halophytes in China [J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 511-526.
- [6] 刘敦华. 沙蒿籽胶性质、结构及应用的研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2006.
- [7] 赵振勇,张科,王雷,等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1420-1425.
- [8] 王赞,李源,吴欣明,等. PEG 渗透胁迫下鸭茅种子萌发特性及抗旱性鉴定[J]. 中国草地学报, 2008, 30(1): 50-55.
- [9] 霍平慧,李剑峰,师尚礼,等. 碱性盐胁迫对超干贮藏苜蓿种子幼苗生长及抗性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(13): 2643-2651.
- [10] 张翠梅,师尚礼,吴芳. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 868-882.
- [11] Osmolovskaya N, Shumilina J, Kim A, et al. Methodology of drought stress research: Experimental setup

- and physiological characterization [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018,19(12):40-89.
- [12] 赵波,杨秀云,沈向群. PEG 与低温对法国百里香种子萌发的影响[J]. *草业科学*,2015,32(11):1808-1814.
- [13] Utkhao W, Yingjajaval S. Changes in leaf gas exchange and biomass of *Eucalyptus camaldulensis* in response to increasing drought stress induced by polyethylene glycol [J]. *Trees*, 2015,29(5):1581-1592.
- [14] 陆嘉惠,吕新,吴玲,等. 3 种药用甘草种子对盐渍环境的萌发响应及其适宜生态种植区[J]. *草业学报*,2013,22(2):195-202.
- [15] 宗莉,甘霖,康玉茹,等. 盐分、干旱及其交互胁迫对黑果枸杞发芽的影响[J]. *干旱区研究*,2015,32(3):499-503.
- [16] Li Qian, Yang An, Zhang Wenhao. Comparative studies on tolerance of rice genotypes differing in their tolerance to moderate salt stress [J]. *BMC Plant Biology*, 2017,17(1):141.
- [17] Liu Jie, Bai Bing, Zhao Shengliang, et al. Comparison of the effects of salt stress and salt-alkaline mixed stress on the mineral nutrition of sunflower [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2012,43(15):1963-1975.
- [18] 马彦军,段慧荣,曹致中,等. 沙冬青种子萌发期抗逆性研究[J]. *中国沙漠*,2011,31(4):963-967.
- [19] 张强,刘静,李强,等. 黑沙蒿与粉土质砂根—土及土—土界面摩擦阻特性[J]. *西北农业学报*,2019,28(3):489-496.
- [20] 赵丽,孙超,刘春,等. 小叶杨、沙蒿、沙柳和毛白杨落叶溶解性有机质的紫外与荧光性质对比研究[J]. *干旱区资源与环境*,2019,33(6):179-184.
- [21] 董金伟,李宜坪,李新凯,等. 毛乌素沙地植被类型对生物结皮及其下伏土壤养分的影响[J]. *水土保持研究*,2019,26(2):112-117.
- [22] 韩文娟,王铁娟,玉昉永. 5 种蒿属沙生半灌木种子萌发耐旱性研究[J]. *种子*,2015,34(2):42-45.
- [23] 回振龙,李自龙,刘文瑜,等. 黄腐酸浸种对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *西北植物学报*,2013,33(8):1621-1629.
- [24] 孙时轩. *造林学*[M]. 2 版. 北京:中国林业出版社,1992.
- [25] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. *Plant Physiology*, 1973,51(5):914-916.
- [26] 国际种子检验协会(ISTA). 国际种子检验规程:1976 [M]. 修订本. 颜启博,毕辛华,译. 北京:技术标准出版社,1980:145-183.
- [27] 周劲松,罗绍春,汤泳萍,等. 芦笋种子发芽率、发芽势测定及多胚现象观察[J]. *江西农业学报*,2014,26(4):30-32.
- [28] 李振,廖同庆,冯青春,等. 基于机器视觉的蔬菜种子活力指数检测算法研究及系统实现[J]. *浙江农业学报*,2015,27(12):2218-2224.
- [29] 蒋敏明. 种子活力研究进展及展望[J]. *中国种业*,2018(6):15-18.
- [30] 杨佳鑫,李庆卫,刘玉霞,等. NaCl 胁迫对梅花和山桃种子萌发及生理特性的影响[J]. *西北林学院学报*,2018,33(2):94-99.
- [31] 张苏江,张玲,江承凤,等. 复合盐浓度对 4 种牧草种子萌发的影响[J]. *江苏农业科学*,2005(6):106-108.
- [32] 马琳,李红丽,董智,等. 不同浓度 NaCl 盐处理对 4 种牧草种子萌发和生长的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*,2009,30(2):125-130.
- [33] 刘克彪,姜生秀. 干旱和钠盐胁迫对罗布麻种子萌发的影响[J]. *草业学报*,2016,25(5):214-221.
- [34] 朱金方,刘京涛,陆兆华,等. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响[J]. *生态学报*,2015,35(15):5140-5146.
- [35] 程波,胡生荣,高永,等. PEG 模拟干旱胁迫下 5 种紫花苜蓿萌发期抗旱性的评估[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2019,47(1):53-59.
- [36] 史薇,徐海量,赵新风,等. 胀果甘草种子萌发对干旱胁迫的生理响应[J]. *生态学报*,2010,30(8):2112-2117.
- [37] 李志萍,张文辉,崔豫川. PEG 模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响[J]. *西北植物学报*,2013,33(10):2043-2049.
- [38] 孙艳茹,石屹,陈国军,等. PEG 模拟干旱胁迫下 8 种绿肥作物萌发特性与抗旱性评价[J]. *草业学报*,2015,24(3):89-98.
- [39] 杨景宁,王彦荣. PEG 模拟干旱胁迫对 4 种荒漠植物种子萌发的影响[J]. *草业学报*,2012,21(6):23-29.
- [40] 姜生秀,严子柱,吴昊. PEG6000 模拟干旱胁迫对 2 种沙冬青种子萌发的影响[J]. *西北林学院学报*,2018,33(5):130-136.
- [41] 乔枫,耿贵工. 盐碱胁迫对沙棘种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. *东北林业大学学报*,2012,40(2):17-19.
- [42] 刘帅,付和平,蓝登明,等. 3 种柽柳属植物种子萌发特性研究[J]. *安徽农业科学*,2017,45(11):130-132.