

# 不同种源长柄扁桃种子萌发期耐旱及耐盐性

李荣<sup>1,3</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 曹庆喜<sup>1,4</sup>, 王海鹰<sup>1</sup>, 赵学庆<sup>1</sup>, 陈倩<sup>1</sup>, 曹振林<sup>2</sup>, 高荣<sup>1</sup>

(1.陕西省林业科学院, 陕西 西安 710082; 2.榆阳区林业和种苗工作站,  
陕西 榆林 719000; 3.陕西省榆林市沙生植物国家林木种质资源库, 陕西 榆林  
719000; 4.陕西榆林毛乌素沙地荒漠生态系统定位观测研究站, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** [目的] 探究长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)种子萌发期抗逆性, 揭示不同种源长柄扁桃种子性状之间的差异及其萌发特性间的差异, 为筛选长柄扁桃优良种源及其在干旱和盐碱地区的合理引种及生态修复提供理论指导。[方法] 以榆林市榆阳区小纪汗乡(XJH)、榆林市神木市锦界镇(JJZ)、包头市固阳县金山镇(JSZ)、锡林郭勒盟苏尼特右旗赛汉塔拉镇(SHT)4个种源长柄扁桃种子为试验材料, 使用聚乙二醇(PEG-6000)和NaCl分别模拟干旱胁迫和盐胁迫, 探究萌发期内的变化, 并采用主成分分析法(PCA)和隶属函数法对种子抗逆性进行综合评价。[结果] 4个种源长柄扁桃种子在耐旱性和耐盐性上有显著差异, 其分别表现为: SHT>XJH>JJZ>JSZ 和 XJH>JJZ>SHT>JSZ, 其中 SHT 种源的耐旱性综合评价指数为 90.12, XJH 种源的耐盐性综合评价指数为 89.51。[结论] SHT 种源更抗旱, JJZ 种源更耐盐, 不同种源的长柄扁桃种子对胁迫的耐受性存在差异性。

**关键词:** 长柄扁桃; 种子萌发; 耐旱性; 耐盐性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0111-13 中图分类号: Q948.1, Q945.34

**文献参数:** 李荣, 张艳, 曹庆喜, 等. 不同种源长柄扁桃种子萌发期耐旱及耐盐性[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 111-123. Li Rong, Zhang Yan, Cao Qingxi, et al. Drought and salt tolerance during seed germination of different provenances of *Amygdalus pedunculata* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 111-123. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.018; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.018.

## Drought and salt tolerance during seed germination of different provenances of *Amygdalus pedunculata*

Li Rong<sup>1,3</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Cao Qingxi<sup>1,4</sup>, Wang Haiying<sup>1</sup>, Zhao Xueqing<sup>1</sup>, Chen Qian<sup>1</sup>, Cao Zhenlin<sup>2</sup>, Gao Rong<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an, Shaanxi 710082, China; 2. Yuyang District Forestry and Seedling Workstation, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. National Forest Germplasm Resources Bank for Psammophytes in Yulin of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi 719000, China; 4. Long-term Observation and Research Station for Maowusu Desert Ecosystem in Yulin of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** [Objective] The stress tolerance of *Amygdalus pedunculata* seeds during germination were investigated, and the differences in seed traits and germination characteristics among different provenances were analyzed, in order to provide theoretical guidance for selecting superior *A. pedunculata* provenances and their rational introduction and ecological restoration in arid and saline-alkali areas. [Methods] Seeds from four provenances of *A. pedunculata* were used as experimental materials: Xiaojihan Township (XJH), Yuyang District, Yulin City; Jinjie Town (JJZ), Shenmu City, Yulin City; Jinshan Town (JSZ), Guyang County, Baotou City; and Saihantala Town (SHT), Sonid Right Banner, Xilin Gol League. Polyethylene glycol (PEG-6000) and NaCl were used to simulate drought stress and salt stress, respectively. Changes during the germination period were investigated. Principal component analysis (PCA) and the membership function method were employed for a comprehensive evaluation of seed stress tolerance. [Results] There were significant differences in drought tolerance and salt tolerance among the four *A. pedunculata* provenances, respectively ranked as SHT>

收稿日期: 2025-03-25

修回日期: 2025-06-13

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 榆林市科学技术计划项目“毛乌素沙地二次沙化阻控关键技术研究”(YF-2022-9); 陕西省林业科技创新青年人才培养专项项目“毛乌素沙地不同植物配置模式下的生物土壤结皮”(SXLK2023-06-4)

第一作者: 李荣(1973—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水土保持等方面的研究。Email: lirong.222@163.com。

通信作者: 高荣(1974—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水土保持等方面的研究。Email: 383538638@qq.com。

XJH>JJZ>JSZ and XJH>JJZ>SHT>JSZ. The comprehensive evaluation index of drought tolerance was 90.12 for SHT provenance, while the index for salt tolerance was 89.51 for XJH provenance. [Conclusion] The SHT provenance is more drought-resistant and the JJZ provenance is more salt-resistant, revealing that seed stress tolerance varies among different *A. pedunculata* provenances.

**Keywords:** *Amygdalus pedunculata*; seed germination; drought tolerance; salt tolerance

长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)又名“长梗扁桃”“柄扁桃”,为蔷薇科(Rosaceae)扁桃属落叶灌木,主要分布于陕西省北部及内蒙古自治区等西北干旱、半干旱地区的山地和沙漠地带,是西北地区特有的防沙治沙和木本粮油树种<sup>[1-3]</sup>。因长柄扁桃具有耐旱耐寒、耐贫瘠、萌蘖力强、适应能力强等优点<sup>[4]</sup>,在防风固沙、荒山造林、治沙育林及水土保持等生态修复领域广泛应用。除生态价值外,作为陕西省珍稀保护植物,其也具有极高的经济价值,长柄扁桃种仁含油率达45%~58%,不饱和脂肪酸总量高达约98%,可制成高品质的食用油<sup>[5]</sup>。

种子萌发期是植物对环境最敏感的阶段之一,也是衡量植物耐旱性强弱的重要时期。不同的逆境(如干旱、盐胁迫等)会不同程度地抑制种子萌发,致使其生长减缓甚至死亡。作为植物生长和发育过程中至关重要的成分,水分参与着细胞内多种代谢活动。盐分是影响种子萌发的重要因素,通过渗透作用和离子毒害影响植物的离子平衡,降低植物细胞酶活性<sup>[6]</sup>,限制植物生长。

由于原生地生境遭受人为破坏,目前长柄扁桃自然群落减少,种源杂乱,退化,优良种质资源匮乏,制约了其在直播造林,引种造林方面的发展<sup>[7]</sup>。张檀等<sup>[8]</sup>研究发现长柄扁桃种子不存在明显的生理休眠

现象且光照条件对其发芽过程亦无显著影响,并得出20~25℃是其发芽的最佳温度;郭改改等<sup>[9]</sup>通过长柄扁桃的旱害指数和叶片解剖结构对5个长柄扁桃种源进行抗旱性评价;蒋晋豫等<sup>[10]</sup>对长柄扁桃两个种源一年生幼苗进行了研究,明确了其抗旱性。因此,开展长柄扁桃优质种源筛选,并将其作为干旱荒漠区重点推广树种等工作非常重要。

目前对长柄扁桃的研究多集中于其幼苗以及单一地区种源抗逆性的研究,缺乏对于不同种源长柄扁桃种子萌发在耐旱及耐盐性方面的研究。因此,本试验以PEG-6000构建干旱胁迫环境,用NaCl营造盐胁迫环境,采用主成分分析,相关性热图分析方法,对4个长柄扁桃种源萌发的性状进行综合鉴定,揭示不同种源长柄扁桃种子性状之间的差异及其萌发特性间的差异,以期筛选长柄扁桃优良种源,扩大其种植范围提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试的长柄扁桃种质材料共4份,由陕西省林业科学研究院治沙研究所于2023年8月协助采集,室温下保存于西北农林科技大学实验室,具体采样信息详见表1。

表1 供试长柄扁桃种源信息  
Table 1 Provenance information of tested *A. pedunculata*

种源编号	种源地	经度/ (°)	纬度/ (°)	海拔/ m	年降水 量/mm	年均 温/℃	地形地貌	土壤 类型	生长状况
JJZ	榆林市神木市锦界镇	109.88	38.86	1262	424.90	7.60	固定或半固定沙地	砂土	野生种质资源,生长状况良好,无病虫害
XJH	榆林市榆阳区小纪汗乡	109.21	38.49	1285	407.80	8.50	固定或半固定沙地	砂土	野生种质资源,生长状况良好,无病虫害
JSZ	包头市固阳县金山镇	110.15	40.80	1606	318.30	6.00	土石山区	栗钙土	野生种质资源,生长状况良好,无病虫害
SHT	锡林郭勒盟苏尼特右旗赛汉塔拉镇	112.44	42.57	1200	206.90	5.20	固定或半固定沙地	砂土	野生种质资源,因干旱少雨,生长状况较好

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 种子形态特征测定

每个种源随机选取90粒种子,平均分为3份,每份30粒,为一个重复。使用电子数显游标卡尺(精确度0.01 mm)测量每粒种子的纵径及横径<sup>[11]</sup>。其中种

子纵径是指种子在垂直方向上的最大长度,通常是从种子的顶端到基部的距离,种子横径是指种子在与纵径垂直方向上的最大宽度,通常是从种子最宽处的两侧边缘之间的距离。参考郭松等<sup>[12]</sup>方法计算种子形数,计算公式为

$$\text{种子形数} = \text{种子纵径} / \text{种子横径} \quad (1)$$

### 1.2.2 种子千粒重测定

测定千粒重时,分别从常温储藏的4个种源长柄扁桃种子中随机选取1 000粒种子,使用电子天平(1/10 000)精确称重,重复3次,测定结果取平均值<sup>[13]</sup>。

### 1.2.3 试验设计

(1) 种子预处理。选取外表饱满、大小一致且无病虫害的各种源长柄扁桃种子,为消除种壳对种子萌发产生的影响,将所有种子均用砂纸打磨,破除种壳。置于0.1%的高锰酸钾溶液中消毒30 min后,用蒸馏水反复冲洗以去除多余的高锰酸钾溶液残留,最后用滤纸吸干种子表面水分备用。

(2) 聚乙二醇(PEG-6000)和NaCl处理。试验参考作建芬等<sup>[14]</sup>采用的纸上发芽法,选择直径为15 cm的培养皿作为发芽床,铺设双层湿润滤纸,配制不同浓度的PEG-6000溶液和NaCl溶液,以此模拟不同程度的干旱胁迫和盐胁迫环境,进而探究长柄扁桃种子在逆境下的萌发状况。参考马小卫等<sup>[15]</sup>、乌兰图亚等<sup>[16]</sup>的方法,本试验确定设置5组不同浓度(质量分数)PEG-6000溶液模拟干旱胁迫,分别为5%,10%,15%,20%和25%,对应的水势依次为-0.10,-0.20,-0.40,-0.60和-0.86 MPa;设置5组不同浓度(质量分数)NaCl溶液,分别0.02,0.04,0.06,0.10和0.14 mol/L模拟盐胁迫<sup>[17]</sup>。试验共设置12组处理,4个种源均一致,其中设置2组蒸馏水对照(标记为CK<sub>1</sub>,CK<sub>2</sub>),5组PEG-6 000溶液处理组,5组NaCl溶液处理组;每组放置30粒种子,设置3次生物学重复,共计使用126个培养皿,培养皿标记处理编号。先将培养皿(内径为150 mm)置于高压灭菌锅消毒30 min,取出放入双层大小与培养皿内径适配的干净无菌滤纸。采用质量平衡法每日用移液枪向对应编号培养皿中分别添加不同浓度的PEG溶液以及无菌蒸馏水(CK<sub>1</sub>)、不同浓度NaCl溶液以及无菌蒸馏水(CK<sub>2</sub>),直至滤纸饱和。将所有处理的培养皿放入25℃,50%湿度的黑暗恒温培养箱中培养。为有效减少水势变动,每4 d更换1次滤纸,并及时清理发霉腐烂的种子,避免其他种子感染。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 测定指标

试验过程中,每隔24 h观察记录一次种子的萌发情况,以胚根伸出种皮2 mm为萌发标准,记录种子萌发数量,据此计算发芽率,发芽势,发芽指数和活力指数。经7 d萌发期结束,将每个处理组中萌发的种子挑出,分别测定其胚根长,胚轴长,胚芽长,并

计算各指标平均值。用1/1 000电子分析天平测量种子的鲜质量。为了消除不同种源之间的差异,采用各指标的相对值(以对照为基准)来反映对干旱和盐胁迫的响应程度。各指标的计算公式分别为

$$\text{发芽率(GR)} = (\text{发芽结束时发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽势(GP)} = (3\text{d内正常发芽的种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{发芽指数GI} = \sum(G_t / D_t) \quad (4)$$

式中: $G_t$ 为在第 $t$ 天发芽种子数量; $D_t$ 为对应发芽天数;

$$\text{活力指数(VI)} = \text{GI} \cdot S \quad (5)$$

式中: $S$ 为平均长度。

$$\text{相对发芽势} = N_h / N_i \times 100\% \quad (6)$$

式中: $N_i$ 为0浓度胁迫下种子发芽势; $N_h$ 为不同浓度胁迫下种子发芽势。

$$\text{相对发芽率} = N_j / N_k \times 100\% \quad (7)$$

式中: $N_k$ 为0浓度胁迫下种子发芽率; $N_j$ 为不同浓度胁迫下种子发芽率;

$$\text{相对发芽指数} = N_p / N_q \times 100\% \quad (8)$$

式中: $N_q$ 为0浓度胁迫下种子发芽指数; $N_p$ 为不同浓度胁迫下种子发芽指数。

$$\text{相对活力指数} = \text{相对发芽指数} \times \text{幼苗相对重量} \quad (9)$$

### 1.3.2 耐旱性和耐盐性综合评价方法

耐旱性和耐盐性综合评价方法采用主成分分析法和隶属函数值法,对每种材料的多个性状指标综合分析,并进一步对不同材料做出综合评价<sup>[18]</sup>。隶属函数值法所用公式为

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (10)$$

式中: $X_j$ 为第 $j$ 个性状指标的测定值, $j=1,2,3,\dots,n$ ; $X_{\max}$ , $X_{\min}$ 分别为每份供试材料某一性状指标的最大值和最小值。

根据性状的贡献程度计算权重,权重计算公式为

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (11)$$

式中: $W_j$ 表示第 $j$ 个公因子在所有公因子中的主要程度; $P_j$ 为各材料第 $j$ 个指标与耐旱(耐盐)系数间的相关系数,表示各品种第 $j$ 个公因子的贡献率。

最后把每份材料的各项指标隶属函数值累加,取其平均值为综合评价值。

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \cdot W_j] \quad (12)$$

式中: $D$ 值为供试材料在干旱(盐)胁迫条件下用综合指标评价所得的耐旱(耐盐)性综合评价值。根据各材料综合评价值的大小确定其耐旱性(耐盐性)强

弱,  $D$  值越大耐抗旱(耐盐)性越强;反之,耐旱性(耐盐性)越弱。

#### 1.4 数据处理

该试验采用 Excel 2020 软件对数据进行预处理,使用 SPSS 25.0 分析软件对发芽率,发芽势等指标进行差异显著性检验(显著水平为 95%),使用 Excel 2020 对发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长、胚轴长、胚芽长、鲜质量计算隶属函数并进行主成分分析,使用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 种子形态特征测定结果

由表 2 可知,供试种源长柄扁桃种子横径、种子形数及种子千粒重均有显著差异,种子纵径差异较小,其中 JSZ 种源的种子横径和千粒重最大,分别为 10.14 mm 与 532.47 g, XJH 种源的种子横径和千粒重最小,分别为 8.68 mm 和 371.93 g。

表 2 供试长柄扁桃形态特征测定值

Table 2 Measured morphological characteristics of tested *A. pedunculata*

编号	种子纵径/mm	种子横径/mm	种子形数	千粒重/g
XJH	11.55±0.22 <sup>b</sup>	8.68±0.22 <sup>d</sup>	1.33±0.01 <sup>b</sup>	371.93±6.11 <sup>d</sup>
JJZ	12.90±0.22 <sup>a</sup>	9.20±0.04 <sup>c</sup>	1.41±0.03 <sup>a</sup>	458.20±6.61 <sup>b</sup>
JSZ	12.60±0.36 <sup>a</sup>	10.14±0.15 <sup>a</sup>	1.25±0.02 <sup>c</sup>	532.47±2.90 <sup>a</sup>
SHT	12.47±0.32 <sup>a</sup>	9.75±0.21 <sup>b</sup>	1.28±0.01 <sup>c</sup>	395.53±8.22 <sup>c</sup>

注:①数值为平均值±标准误;②同列数据后不同小写字母表示品种间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.2 干旱胁迫和盐胁迫对 4 个种源长柄扁桃种子发芽指标及生长指标的影响

#### 2.2.1 干旱胁迫

(1) 发芽指标。不同浓度的 PEG-6000 对不同种源的长柄扁桃胁迫程度不同,图 1 结果显示,4 个种源的长柄扁桃的发芽率、发芽指数、活力指数随着 PEG 浓度的升高均呈下降趋势。SHT 种源的发芽势呈先上升后下降趋势,其余种源发芽势均随 PEG 浓度的升高而下降。图 1a 表明,与对照相比, JJZ 与 JSZ 在 5% 处理组的发芽率差异均不显著,与其余处理组均有显著差异;SHT 种源的发芽率相对对照组在 5%、10% PEG 处理下无显著差异,与其余各浓度之间存在显著差异。同一处理梯度下, XJH 种源具有较高的发芽率, JSZ 种源发芽率较低,在 20% PEG 处理时,相比对照 XJH 和 JSZ 的发芽率降幅分别为 39.28%、91.42%。图 1b 显示,与对照相比,在 20%、25% PEG 处理时 4 个种源的发芽势均无显著差异,且 XJH, SHT, JSZ 种源在 25% PEG 处理时为 0;在

20% PEG 处理时,4 个种源的发芽势均有显著差异,其中 JJZ, XJH, SHT, JSZ 种源的降幅分别为 92.30%、89.47%、82.76% 和 95.00%。同处理组相比,在 10% PEG 处理时, SHT 的发芽势最高,为 77.78%, JSZ 的发芽势最低,为 40.00%。图 1c 显示,与对照相比, JJZ 与 XJH 的处理组间均有显著差异, SHT 与 JSZ 在 5% PEG 处理时与对照无显著差异,且 JSZ 种源在 25% PEG 处理时为 0,与 20% PEG 处理时无显著差异。在同一处理梯度下, XJH 种源在所有 PEG 处理下均具有最高的发芽指数,表明其发芽指数受干旱影响较小,而 JSZ 种源的发芽指数显著低于其余材料,干旱对其影响较大。图 1d 显示,与对照相比, JJZ, XJH, SHT 种源的活力指数均有较大的降幅,且处理组与对照组相比均有显著差异,而 JSZ 的降幅较小,在 20% 和 25% PEG 处理时无显著差异。在 5% PEG 处理时, JJZ, XJH, SHT, JSZ 的降幅分别为 38.02%、13.86%、23.59%、8.94%。

(2) 生长指标。不同浓度的 PEG 处理对长柄扁桃种子的生长有明显的抑制作用,图 2 显示,4 个种源长柄扁桃的胚根长、胚轴长、胚芽长、鲜质量随着 PEG 浓度的升高呈不同的变化趋势,其中 JJZ 与 SHT 种源胚根长呈先上升后下降的趋势, XJH 和 JSZ 种源的胚根长呈下降趋势; JJZ, XJH 和 SHT 的胚轴长呈先上升后下降的趋势, JSZ 种源呈下降趋势; JJZ 和 XJH 种源的胚芽长呈先上升后下降的趋势,而 SHT 和 JSZ 种源的胚根长呈下降趋势; JJZ 和 JSZ 种源的鲜质量呈先上升后下降的趋势。图 2a 显示,与对照相比,5% PEG 处理时, JSZ 种源的胚根长较对照增大,其余 3 个种源的胚根长呈下降趋势。 XJH 与 SHT 种源的胚根长在不同浓度 PEG 处理时具有显著差异, JSZ 种源在 25% PEG 处理时胚根长为 0,表明高浓度的 PEG 溶液会抑制其胚根长的生长。同处理组相比,在 10% PEG 处理时, SHT 种源的胚根长最大,为 5.04 cm, XJH 种源的胚根长最小,为 3.47 cm。图 2b 显示,与对照相比,5% PEG 处理时, XJH 与 JSZ 种源的胚轴长升高,其余两种源下降;10% PEG 处理时, XJH 与 JJZ 种源的增幅明显,其增幅分别为 7.87% 和 6.43%。同处理组相比,10% PEG 处理时, XJH 种源胚轴长最大,为 3.82 mm, SHT 种源的轴长最小,为 2.81 mm。相较于 20% PEG 处理,25% PEG 处理时, XJH 与 JSZ 种源的胚轴长降幅明显, JSZ 种源降低至 0, XJH 种源降幅为 52.27%,表明胚轴长受干旱影响较大。图 2c 结果显示,与对照相比,5% PEG 处理时,4 个种源的胚芽长均有下降趋势, JJZ 种源的

降幅最大,为69.04%,SHT种源的降幅最小,为0.52%。15%PEG处理时,各种源胚芽长均呈下降趋势,幅度为31.98%~69.44%。同处理组相比,SHT种源在CK,5%PEG,10%PEG处理下均保持较高的胚芽长;在15%PEG与20%PEG处理时,XJH种源的胚芽长均最大,分别为16.49和12.44 mm;25%PEG处理下,JSZ种源的胚芽长为0,其胚芽长易受干旱影响。图2d结果显示,与对照相比,5%PEG处理时,

SHT和JSZ种源的鲜质量有上升的趋势,但幅度较小,JJZ种源有较明显的下降趋势,幅度为23.22%。10%PEG处理时,SHT,XJH和JSZ种源的鲜质量均有上升,JJZ种源的鲜质量下降。同处理组相比,SHT种源在CK,5%PEG,10%PEG处理下均保持较高的鲜质量,JSZ在15%PEG处理下鲜质量最大,为0.43 g,而在25%PEG处理下,JSZ的鲜质量下降为0,其受干旱影响较大。

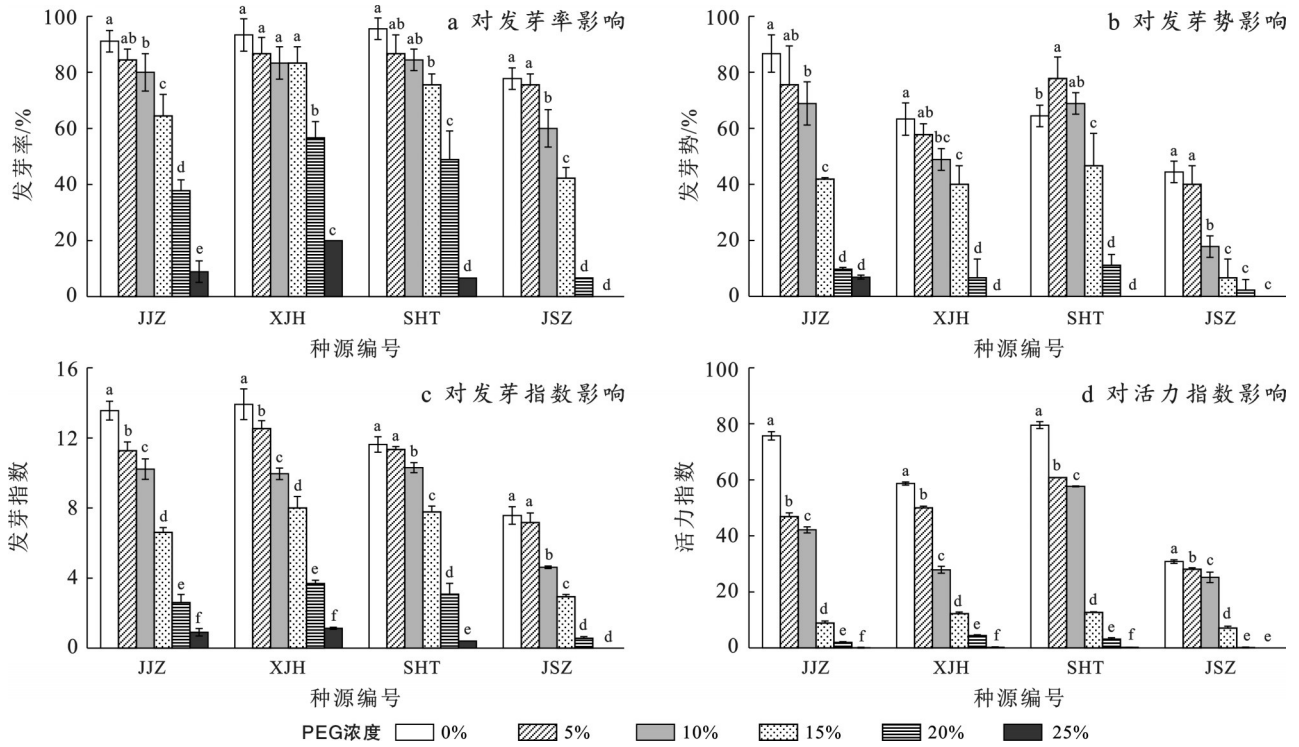


图1 聚乙二醇(PEG)处理对4个种源长柄扁桃种子发芽指标的影响

Fig.1 Effect of polyethylene glycol (PEG) treatment on germination indices of *A. pedunculata* seeds from four provenances

2.2.2 盐胁迫

(1) 发芽指标。图3显示,随着NaCl浓度的升高,4个种源长柄扁桃的发芽率总体均呈下降趋势,发芽势总体呈现先上升后下降的趋势,发芽指数的变化趋势均有不同的表现,活力指数除JSZ种源呈现先上升后下降的趋势外,其余种源均呈现下降趋势。图3a显示,与对照相比,随着NaCl浓度的升高,4个种源的发芽率表现出不同的差异性,在0.2 mol/L NaCl处理下,4个种源的发芽率与对照均无显著差异。在0.10 mol/L NaCl处理时,4个种源的发芽率较对照组均有显著差异,JJZ种源有较高的发芽率,而JSZ种源的发芽率最低,为23.33%。同一处理梯度下,JJZ和XJH种源具有较高的发芽率,而JSZ种源的发芽率较低,在0.06 mol/L NaCl处理时,XJH种源发芽率较高,为79.67%,JSZ种源的发芽率在0.10~0.14 mol/L NaCl处理时发芽率较低,表明其

发芽率受盐胁迫影响较大。图3b显示,与对照相比,0.02 mol/L NaCl处理时,除JJZ种源外,其余种源均有显著差异,其变化幅度为2.50%~64.99%,在0.10 mol/L NaCl处理时,除XJH种源外,其余种源较对照差异显著,JJZ种源有较高的发芽势,为73.33%,JSZ种源的发芽势最低,为13.33%。同一处理梯度下,较JSZ种源,其余种源在不同浓度处理时,均有较高的发芽势。在0.06 mol/L NaCl处理时,JSZ的发芽势最低,为46.67%,其余3个种源的发芽势差异较小。与0.06 mol/L NaCl处理相比,0.10 mol/L NaCl处理时,JSZ种源发芽势下降幅度最大,表明高浓度的盐胁迫会抑制其生长。图3c显示,与对照相比,在0.02 mol/L NaCl处理下,4个种源的发芽指数均表现出显著差异,且均呈现下降趋势,幅度为20.14%~31.27%;0.04 mol/L NaCl处理下,4个种源的发芽指数均有不同程度的下降,幅度为

12.88%~39.88%; 0.10~0.14 mol/L NaCl 处理时, 各种源均呈现显著下降趋势, 幅度分别为 39.88%~77.72% 和 56.04%~84.90%。在同一处理梯度下, JJZ 和 SHT 种源随 NaCl 浓度的升高呈现先上升后下降的趋势, JJZ 种源在 0.04, 0.06, 0.10 mol/L NaCl 处理下均保持较高的发芽指数, 而 JSZ 种源表现出较低的发芽指数, 表明其受盐胁迫影响较大。图 3d 显示, 与对照相比, 在 0.02 mol/L NaCl 处理下, 4 个种源的活力指数差异显著, JSZ 种源的活力指数呈上升趋势

势, 其余种源均表现出下降趋势, 其中 SHT 种源的下降幅度最大, 为 60.84%; XJH 种源的下降幅度最小, 为 1.49%; 0.04 mol/L NaCl 处理时, 各种源的活力指数均下降, 幅度为 32.69%~61.84%。同处理组相比, XJH 种源在 0.02, 0.06, 0.10 mol/L NaCl 处理时均有较高的活力指数; JJZ 种源在 0.04 mol/L NaCl 处理时活力指数最高; 而 JSZ 种源则在 0.10~0.14 mol/L NaCl 处理下活力指数均表现较低, 表明其受盐胁迫影响较大。

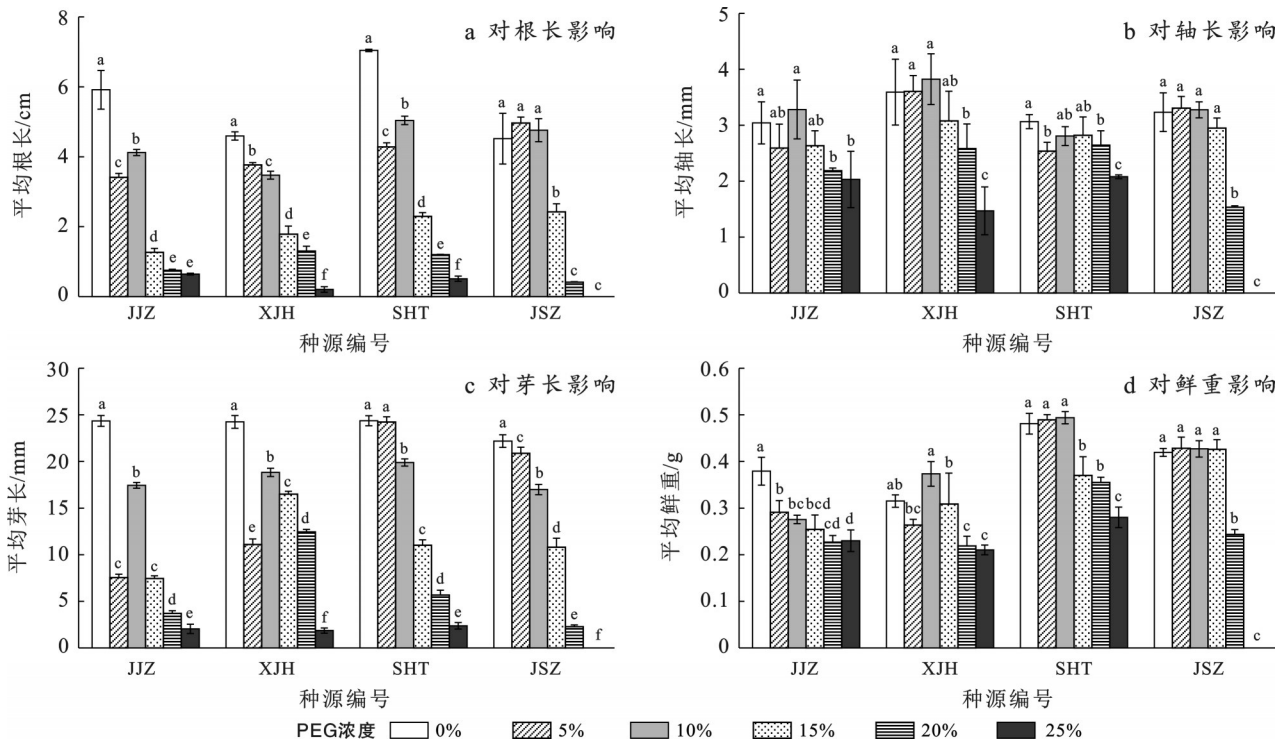


图 2 聚乙二醇(PEG)处理对 4 个种源长柄扁桃种子生长指标的影响

Fig. 2 Effect of polyethylene glycol (PEG) treatment on growth indices of *A. pedunculata* seeds from four provenances

(2) 生长指标。不同种源的长柄扁桃种子对不同浓度的 NaCl 胁迫响应差异明显, 图 4 结果表明, 随着 NaCl 浓度的上升, XJH 和 JJZ 种源的胚根长呈先上升后下降趋势, 其余种源胚根长呈现持续下降的趋势; 除 XJH 种源的胚轴长呈现先下降后上升再下降的趋势外, 其余种源的胚轴长均呈现先上升后下降的趋势; JJZ 和 SHT 种源的胚芽长呈现下降趋势, XJH 和 JSZ 种源呈现先上升后下降趋势; 4 个种源的鲜质量均呈现不同的变化趋势。图 4a 显示, 与对照相比, 0.02 mol/L NaCl 处理下, 除 JJZ 种源外, 其余种源的胚根长均有显著差异, 且 XJH 和 JSZ 种源呈上升趋势, 上升幅度分别为 17.71% 和 20.31%; JJZ 和 SHT 种源呈下降趋势, 下降幅度为 10.37% 和 45.51%; 0.10~0.14 mol/L NaCl 处理时, 各种源的胚根长均呈下降趋势, 幅度分别为 71.95%~83.20% 和 84.10%~95.29%。

同处理组相比, JSZ 种源在 0.02, 0.04 mol/L NaCl 处理时均保持较高的胚根长; XJH 在 0.06 mol/L NaCl 处理时胚根长最大, 为 2.74 mm; 而 JJZ 在 0.10~0.14 mol/L NaCl 处理时胚根长均较低, 表明其胚根生长受盐胁迫影响较大。图 4b 显示, 与对照相比, 0.02 mol/L NaCl 处理时, XJH 种源胚轴长呈显著降低趋势, 幅度为 18.29%, 其余 3 份材料均有明显上升趋势, JJZ 种源上升幅度最大, 为 38.71%; 0.04 mol/L NaCl 处理下, JJZ, SHT 和 JSZ 种源的胚轴长显著上升, 上升幅度分别为 9.75%, 23.89% 和 10.41%, XJH 种源显著下降, 下降幅度为 11.25%; 0.14 mol/L NaCl 处理时, 4 个种源的胚轴长均呈现显著下降趋势, 幅度为 27.36%~64.37%。同一处理梯度下, 4 个种源的轴长具有显著差异。0.02 mol/L NaCl 处理下, JJZ 种源具有较高的胚轴长, 为 3.34 mm, 而 XJH 种源的胚轴长最小, 为 2.94 mm; 0.04, 0.14

mol/L NaCl 处理时, SHT 种源均具有较高的轴长; 0.14 mol/L NaCl 处理时, XJH 种源胚轴长较低, 为 1.28 mm, 表明其受盐胁迫影响较大。图 4c 显示, 与对照相比, 0.02, 0.04 mol/L NaCl 处理下, XJH 和 JSZ 种源胚芽长均呈显著上升趋势, JJZ 和 SHT 种源均呈下降趋势, 且 JSZ 种源在 0.02 mol/L NaCl 处理时上升幅度最大, 为 54.32%; 0.10, 0.14 mol/L NaCl 处理下, 4 个种源胚芽长均显著下降, 幅度分别为 41.63%~79.87% 和 87.60%~93.83%。同处理组下, JSZ 种源在 0.02, 0.04 mol/L NaCl 处理下均具有较大的胚芽长, 分别为 34.24 和 25.10 mm; 而 JJZ 种源的均最小, 分别为 19.70 和 19.63 mm; 0.10 mol/L

NaCl 处理时, JJZ 胚芽长最大, 为 14.21 mm, 而 SHT 种源的较小, 为 4.91 mm; 0.14 mol/L NaCl 处理时, XJH 种源胚芽长较小, 表明其受盐胁迫影响较大。图 4d 显示, 与对照相比, 4 个种源在 0.02 mol/L NaCl 处理时鲜质量均有显著差异, 而 XJH 种源呈上升趋势, 幅度为 11.33%, 其余种源且均呈下降趋势, 下降幅度为 14.46%~28.95%。同处理梯度下, SHT 种源在各个浓度均具有较高的鲜质量, 0.04 mol/L NaCl 处理时, SHT 种源的鲜质量为 0.48 g, 而 JJZ 种源的鲜质量最小, 为 0.32 g; 0.14 mol/L NaCl 处理时, XJH 种源的鲜质量最小, 为 0.20 g, 表明其受盐胁迫影响较大。

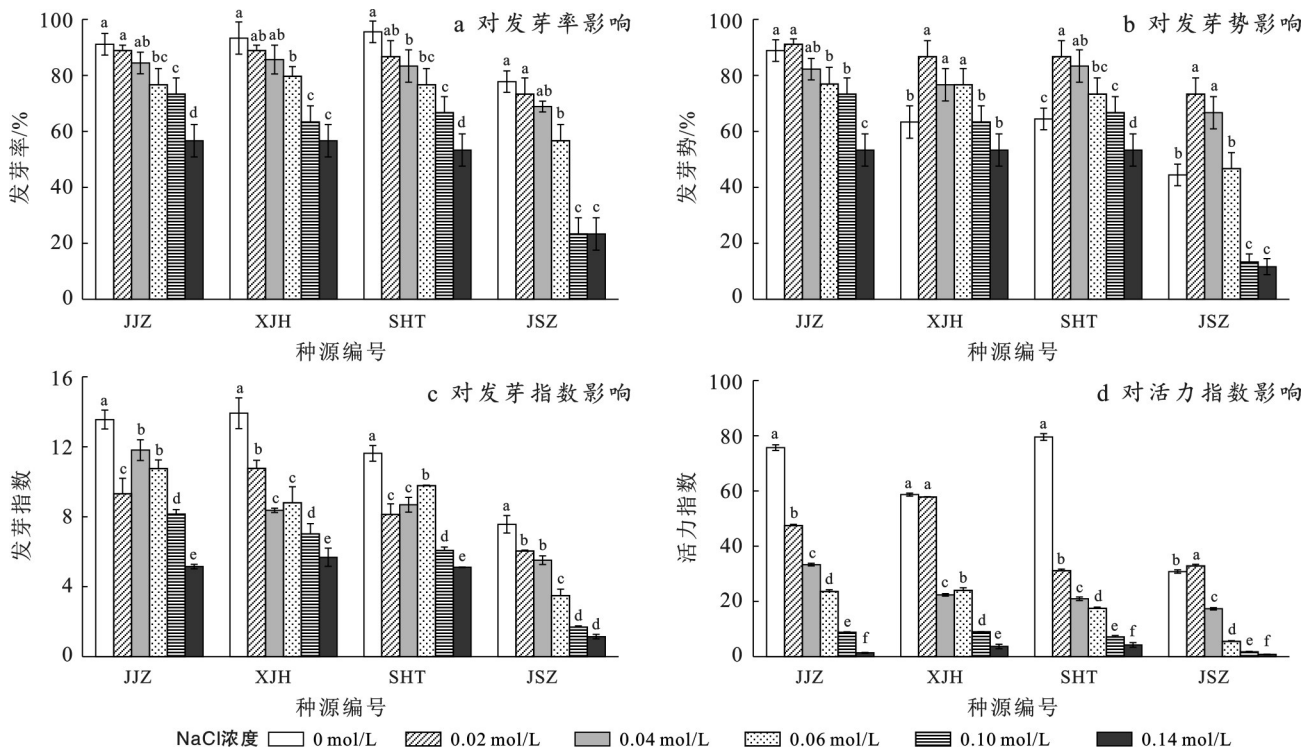


图 3 NaCl 处理对 4 个种源长柄扁桃种子发芽指标的影响

Fig.3 Effect of NaCl treatment on germination indices of *A. pedunculata* seeds from four provenances

### 2.3 不同干旱(盐)胁迫浓度对 4 个不同种源长柄扁桃测定指标的差异性分析

#### 2.3.1 不同浓度 PEG 间测定指标的差异性分析

PEG-6000 胁迫对不同种源长柄扁桃种质萌发的影响各异, 且各测定指标存在显著差异, 为精确评价长柄扁桃种质抗旱能力的强弱, 以 4 个长柄扁桃种源为总体, 确定长柄扁桃最适 PEG-6 000 浓度。表 3 结果表明, 与对照相比, 5% PEG 处理时, 供试种源的发芽指数、胚根长、胚芽长显著降低, 其余指标降低程度无显著差异; 10% PEG 处理时, 供试长柄扁桃的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和胚芽长显著降低; 15%~20% PEG 处理时, 各项指标均呈显著降低趋势; 当 PEG 浓度达到 25% 时, 各指标总体幅度

较 20% PEG 处理时显著降低, 且变异系数较大, 差异明显, 表明供试种源在该浓度处理时稳定性较差, 不能很好地区分各种源间的抗旱程度, 因此, 20% PEG 处理适宜作为抗旱性评价的最佳浓度。

#### 2.3.2 不同浓度 NaCl 间测定指标的差异性分析

不同种源长柄扁桃对 NaCl 胁迫的响应各有差异, 各项测定指标的的变化不同。为准确评价其耐盐性强弱, 进一步确定其总体耐盐最适浓度, 以 4 个种源的总体萌发和生长指标为依据, 对 8 个测定指标进行差异性分析, 从而得到最适盐浓度。表 4 结果表明, 与对照相比, 0.02 mol/L NaCl 处理时, 供试种源的发芽势、胚轴长和胚芽长均有上升趋势, 且发芽势与胚芽长显著上升, 其余指标均显著降低, 供试种源

受盐胁迫影响程度较轻;0.04 mol/L NaCl处理时,除胚轴长外,其余测定指标均显著下降;0.06和0.10 mol/L NaCl处理时,各指标均显著下降,变异系数也相对减小;当NaCl浓度上升至0.14 mol/L时,各测定

指标显著降低的同时,变异系数增大,差异明显,表明该浓度下各种源种质对盐胁迫的响应程度不稳定,不能准确评价其耐盐性。综上所述,可选择0.10 mol/L NaCl浓度作为最佳耐盐浓度。

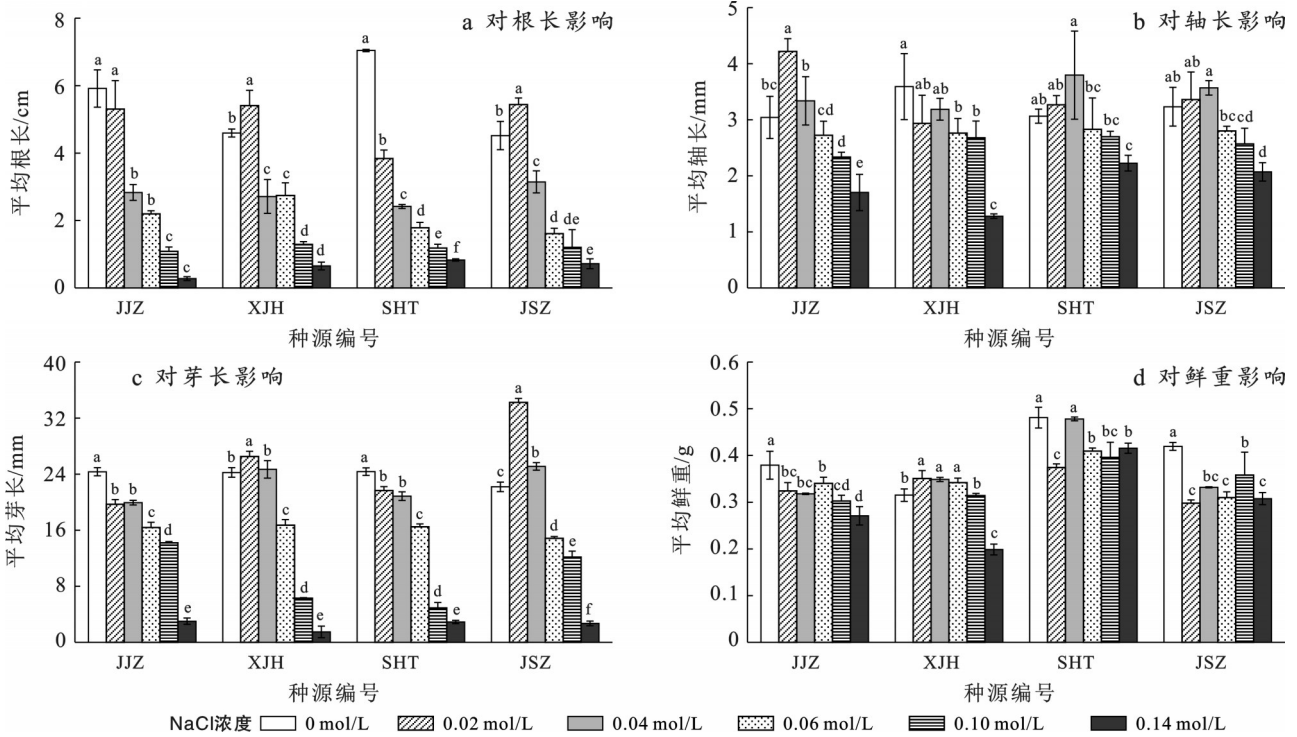


图4 NaCl处理对4个种源长柄扁桃种子生长指标的影响

Fig.4 Effect of NaCl treatment on growth indices of *A. pedunculata* seeds from four provenances

表3 PEG处理下各测定指标总体显著性分析及变异系数

Table 3 Overall significance analysis and coefficient of variation of measured indices under polyethylene glycol (PEG) treatment

测定指标	项目	聚乙二醇(PEG)处理浓度					
		0%	5%	10%	15%	20%	25%
发芽率	均值/%	90.42±1.82 <sup>a</sup>	83.89±0.24 <sup>ab</sup>	77.92±1.82 <sup>bc</sup>	68.61±2.77 <sup>c</sup>	41.94±6.98 <sup>d</sup>	13.61±8.43 <sup>e</sup>
	变异系数	0.020	0.003	0.023	0.040	0.166	0.619
发芽势	均值/%	64.72±2.68 <sup>a</sup>	62.78±2.55 <sup>a</sup>	51.11±3.47 <sup>b</sup>	32.02±1.57 <sup>c</sup>	5.93±1.28 <sup>d</sup>	1.67±1.67 <sup>d</sup>
	变异系数	0.041	0.041	0.068	0.049	0.217	1.000
发芽指数	均值/%	11.72±0.14 <sup>a</sup>	10.21±0.29 <sup>b</sup>	8.77±0.08 <sup>c</sup>	6.18±0.45 <sup>d</sup>	2.48±0.13 <sup>e</sup>	0.61±0.16 <sup>f</sup>
	变异系数	0.012	0.028	0.009	0.073	0.052	0.267
活力指数	均值/%	55.14±11.87 <sup>a</sup>	45.34±6.02 <sup>a</sup>	30.35±6.75 <sup>b</sup>	10.03±0.27 <sup>c</sup>	2.40±0.19 <sup>c</sup>	0.13±0.04 <sup>e</sup>
	变异系数	0.215	0.133	0.222	0.027	0.079	0.318
胚根长	均值/%	5.23±0.44 <sup>a</sup>	4.00±0.16 <sup>b</sup>	4.75±0.45 <sup>a</sup>	1.96±0.01 <sup>c</sup>	0.88±0.09 <sup>d</sup>	0.34±0.03 <sup>e</sup>
	变异系数	0.083	0.040	0.096	0.006	0.101	0.092
胚轴长	均值/%	3.23±0.21 <sup>a</sup>	3.01±0.15 <sup>ab</sup>	3.30±0.25 <sup>a</sup>	2.87±0.14 <sup>b</sup>	2.24±0.06 <sup>c</sup>	1.36±0.17 <sup>d</sup>
	变异系数	0.066	0.051	0.077	0.048	0.028	0.124
胚芽长	均值/%	23.61±0.08 <sup>a</sup>	15.94±0.29 <sup>c</sup>	18.28±0.19 <sup>b</sup>	9.75±0.35 <sup>d</sup>	6.03±0.17 <sup>e</sup>	1.57±0.09 <sup>f</sup>
	变异系数	0.003	0.018	0.010	0.036	0.028	0.058
鲜质量	均值/%	0.41±0.02 <sup>a</sup>	0.37±0.02 <sup>ab</sup>	0.38±0.05 <sup>ab</sup>	0.34±0.03 <sup>b</sup>	0.27±0.02 <sup>c</sup>	0.18±0.00 <sup>d</sup>
	变异系数	0.057	0.040	0.128	0.077	0.063	0.017

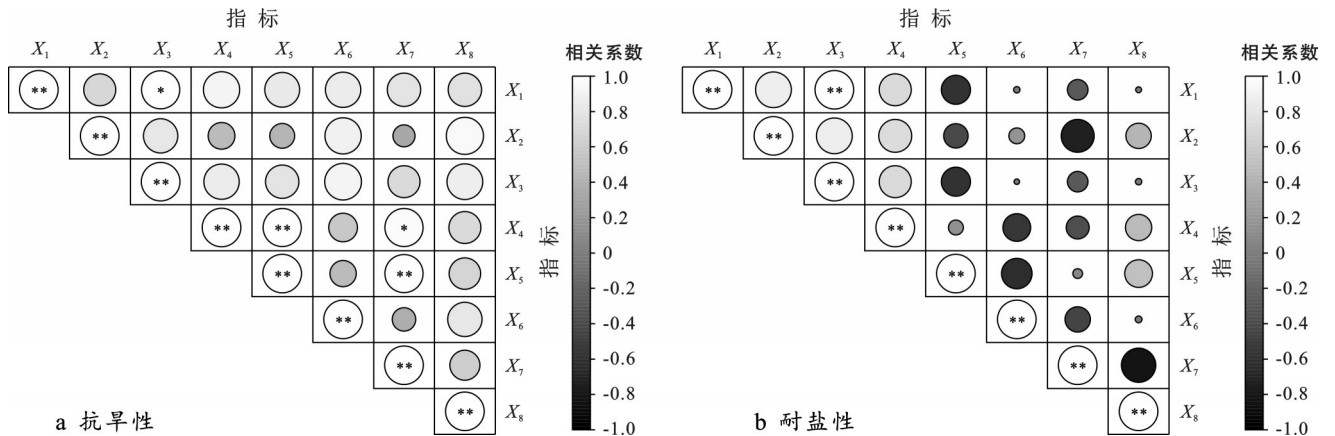
表 4 NaCl 处理下各测定指标总体显著性分析及变异系数  
Table 4 Overall significance analysis and variation coefficient of measured indices under NaCl treatment

测定指标	项目	NaCl 浓度					
		0 mol/L	0.02 mol/L	0.04 mol/L	0.06 mol/L	0.10 mol/L	0.14 mol/L
发芽率	均值/%	89.44±3.15 <sup>a</sup>	84.44±0.96 <sup>b</sup>	80.58±2.93 <sup>b</sup>	72.42±3.09 <sup>c</sup>	56.67±1.44 <sup>d</sup>	47.50±2.50 <sup>e</sup>
	变异系数	0.035	0.011	0.036	0.043	0.025	0.053
发芽势	均值/%	65.28±1.73 <sup>c</sup>	84.44±3.37 <sup>a</sup>	77.22±4.11 <sup>b</sup>	68.39±3.75 <sup>c</sup>	54.17±0.72 <sup>d</sup>	42.92±3.15 <sup>e</sup>
	变异系数	0.027	0.040	0.053	0.055	0.013	0.073
发芽指数	均值/%	11.72±0.14 <sup>a</sup>	8.31±0.45 <sup>b</sup>	8.59±0.13 <sup>b</sup>	8.07±0.11 <sup>b</sup>	6.58±0.74 <sup>c</sup>	4.16±0.33 <sup>d</sup>
	变异系数	0.012	0.054	0.015	0.013	0.113	0.079
活力指数	均值/%	59.61±10.04 <sup>a</sup>	40.64±2.76 <sup>b</sup>	24.65±1.68 <sup>c</sup>	17.69±0.29 <sup>c</sup>	6.68±0.16 <sup>d</sup>	2.54±0.05 <sup>d</sup>
	变异系数	0.168	0.068	0.068	0.017	0.024	0.018
胚根长	均值/%	5.31±0.50 <sup>a</sup>	4.97±0.29 <sup>a</sup>	2.70±0.18 <sup>b</sup>	2.10±0.14 <sup>c</sup>	1.21±0.15 <sup>d</sup>	0.62±0.06 <sup>e</sup>
	变异系数	0.095	0.059	0.066	0.069	0.126	0.100
胚轴长	均值/%	3.23±0.21 <sup>a</sup>	3.45±0.25 <sup>a</sup>	3.47±0.30 <sup>a</sup>	2.78±0.18 <sup>b</sup>	2.57±0.08 <sup>b</sup>	1.82±0.13 <sup>c</sup>
	变异系数	0.066	0.072	0.086	0.066	0.031	0.070
胚芽长	均值/%	23.61±0.08 <sup>b</sup>	25.53±0.50 <sup>a</sup>	22.64±0.22 <sup>c</sup>	16.11±0.33 <sup>d</sup>	9.40±0.24 <sup>e</sup>	2.53±0.34 <sup>f</sup>
	变异系数	0.003	0.020	0.010	0.021	0.026	0.132
鲜质量	均值/%	0.41±0.02 <sup>a</sup>	0.34±0.00 <sup>c</sup>	0.37±0.00 <sup>b</sup>	0.35±0.01 <sup>bc</sup>	0.34±0.01 <sup>c</sup>	0.30±0.01 <sup>d</sup>
	变异系数	0.057	0.012	0.001	0.017	0.021	0.025

2.4 不同种源长柄扁桃种子萌发期抗旱性、耐盐性的相关性分析

抗旱和耐盐两种逆境胁迫条件下,不同种源的长柄扁桃种子萌发期各指标相对值的相关性如图 5 所示。

由图 5 可知,在干旱胁迫下,不同种源长柄扁桃种子萌发期胚根长和活力指数、胚芽长呈极显著正相关,发芽率和发芽指数、活力指数和胚芽长呈显著正相关;在盐胁迫下,不同种源长柄扁桃种子萌发期发芽率和发芽指数呈极显著正相关。



注: X<sub>1</sub>为相对发芽率; X<sub>2</sub>为相对发芽势; X<sub>3</sub>为相对发芽指数; X<sub>4</sub>为相对活力指数; X<sub>5</sub>为相对胚根长; X<sub>6</sub>为相对轴长; X<sub>7</sub>为相对胚芽长; X<sub>8</sub>为相对鲜质量。

图 5 长柄扁桃种子萌发期抗旱性和耐盐性各指标相对值的相关性分析  
Fig.5 Correlation analysis of relative values of indicators related to drought and salt tolerance of *A. pedunculata* seeds during germination

2.5 不同种源长柄扁桃种子萌发期抗逆性的主成分分析

2.5.1 抗旱性

8个测定指标的相对值间呈显著正相关(图 5),因此,为防止各测定指标间抗旱信息重叠,以

20%PEG 作为抗旱鉴定的最佳浓度(表 3)。由表 5—6 可知,4 个长柄扁桃品种萌发期抗旱性前 2 个主成分的累计贡献率达到 96.08%,所以提取前 2 个主成分代替 8 个指标来评价其抗旱性强弱。第 I 主成分的贡献率为 78.61%,其中相对发芽指数(X<sub>3</sub>)、相对发

芽率( $X_1$ )、相对活力指数( $X_4$ )的相关系数较大,说明其在第 I 主成分上有较大载荷,可以反映干旱胁迫下长柄扁桃早期幼苗生长状况;第 II 主成分的贡献率为 17.47%,以相对发芽势( $X_2$ )、相对轴长( $X_6$ )、相对鲜质量( $X_8$ )的载荷较大,可以反映干旱胁迫下长柄扁桃的萌发状况。

### 2.5.2 耐盐性

8 个指标间的相对值间有正相关和负相关(图 5),为防止指标间的耐盐信息重叠,以 0.1 mol/L NaCl 作为耐盐性评价的最佳浓度(表 4)。由表 5—6 可知,4 个长柄扁桃种源萌发期耐盐性前 3 个成分的累计方差贡献率达到 100%,所以提取前 3 个主成分代替 8 个指标来评价其耐盐性。第 I 主成分的贡献率为 49.86%,其中相对发芽势( $X_2$ )、相对发芽率( $X_1$ )、相对发芽指数( $X_3$ )的相关系数较大,说明其在第 I 主成分上有较大载荷,可以反映盐胁迫下长柄扁桃种源早期幼苗生长状况;第 II 主成分的贡献率为 28.06%,以相对胚根长( $X_5$ )、相对鲜质量( $X_8$ )、相对活力指数( $X_4$ )的载荷较大;第 III 主成分的贡献率为 22.08%,其中相对胚芽长( $X_7$ )、相对活力指数( $X_4$ )、相对发芽率( $X_1$ )的载荷较大,可以反映盐胁迫下长柄扁桃种源的萌发状况。

表 5 4 个种源长柄扁桃种子萌发期主成分的特征值及方差贡献率

Table 5 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components during germination of *A. pedunculata* seeds from four provenances

处理	主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
干旱胁迫	I	6.289	78.613	78.613
	II	1.397	17.464	96.077
盐胁迫	I	3.989	49.860	49.860
	II	2.245	28.058	77.918
	III	1.767	22.082	100.00

结合特征向量,参考王倩等<sup>[19]</sup>的方法,以特征向量为权重分别构建长柄扁桃萌发期抗旱性、耐盐性的主成分函数表达式。

(1) 抗旱性函数表达式为

$$Y_1=0.385X_1+0.312X_2+0.390X_3+0.366X_4+0.349X_5+0.332X_6+0.327X_7+0.359X_8 \quad (13)$$

$$Y_2=-0.021X_1+0.495X_2+0.116X_3-0.338X_4-0.403X_5+0.425X_6-0.475X_7+0.243X_8 \quad (14)$$

(2) 耐盐性函数表达式为

$$Y_1=0.461X_1+0.496X_2+0.461X_3+0.389X_4-0.216X_5+0.04X_6-0.315X_7+0.173X_8 \quad (15)$$

$$Y_2=-0.17X_1+0.023X_2-0.175X_3+0.322X_4+0.595X_5-0.368X_6-0.227X_7+0.543X_8 \quad (16)$$

$$Y_3=0.221X_1-0.096X_2+0.218X_3+0.305X_4+$$

$$0.102X_5-0.624X_6+0.526X_7-0.352X_8 \quad (17)$$

式中: $Y_i(i=1,2,3)$ 为主成分; $X_1$ — $X_8$ 分别为发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、轴长、芽长、鲜质量的相对值。

表 6 4 个种源长柄扁桃种子萌发期抗逆性主成分分析中各因子的载荷矩阵

Table 6 Loading matrices of factors in principal component analysis of stress tolerance during germination of *A. pedunculata* seeds from four provenances

指标	干旱胁迫		盐胁迫		
	I 主成分	II 主成分	I 主成分	II 主成分	III 主成分
发芽率( $X_1$ )	0.966	-0.025	0.921	-0.255	0.294
发芽势( $X_2$ )	0.782	0.585	0.991	0.035	-0.128
发芽指数( $X_3$ )	0.978	0.137	0.920	-0.262	0.290
活力指数( $X_4$ )	0.917	-0.399	0.777	0.482	0.406
胚根长( $X_5$ )	0.876	-0.476	-0.431	0.892	0.135
胚轴长( $X_6$ )	0.832	0.502	0.08	-0.552	-0.830
胚芽长( $X_7$ )	0.821	-0.561	-0.629	-0.34	0.699
鲜质量( $X_8$ )	0.901	0.287	0.346	0.813	-0.468

利用单一的  $Y_1, Y_2$  无法对长柄扁桃萌发期的抗逆性作出综合评价,因此以每个主成分贡献率占提取主成分累计贡献率的比例作为权重计算主成分综合模型,得到其抗旱性模型为: $Y=0.629Y_1+0.140Y_2$ ;耐盐性模型为: $Y=0.499Y_1+0.281Y_2+0.221Y_3$ 。根据上述模型计算得到 4 个不同种源长柄扁桃萌发期抗旱性及耐盐性的主成分综合得分和具体排序详见表 7。4 个不同种源长柄扁桃抗旱性以 SHT 最强,JSZ 最弱,其种源抗旱性排序为:SHT>XJH>JJZ>JSZ;耐盐性为 XJH 最强,JSZ 最弱,其种源耐盐性排序为:XJH>JJZ>SHT>JSZ。对 4 个不同种源长柄扁桃的隶属函数值进行相关性分析,发现其抗旱性与耐盐性的相关系数为 0.722。

表 7 4 个不同种源长柄扁桃抗逆性综合得分及排序

Table 7 Comprehensive scores and rankings of stress tolerance of *A. pedunculata* from four different provenances

种源编号	抗旱性		耐盐性	
	得分	排序	得分	排序
JJZ	44.27	3	63.51	2
XJH	81.82	2	89.51	1
SHT	90.12	1	52.57	3
JSZ	6.68	4	23.35	4

### 3 讨论

种子的萌发是植物生命周期的关键阶段,干旱胁迫会抑制种子的发芽,促使植物体内产生抗逆物质<sup>[20]</sup>。韩宇等<sup>[21]</sup>、侯瑞虹等<sup>[22]</sup>、郭丽娜等<sup>[23]</sup>、雷斌等<sup>[24]</sup>分别对野生披碱草、野花苜蓿、马棘、豌豆进行了干旱胁迫的研究,证明了植物在种子萌发期受到干旱胁迫时发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数等萌发指标均会受到显著影响。尽管不同植物在经历干旱胁迫时影响时,以上指标均会受到不同程度的影响,但判断抗旱性的有效指标会因植物的不同而相应变化,结合马小卫等<sup>[15]</sup>、白斯古楞<sup>[25]</sup>所做的相关研究,本试验选择测定种子发芽率、发芽势、根长、胚轴长、胚芽长、鲜质量,并计算发芽指数和活力指数,对4个种源长柄扁桃种子萌发期的抗旱能力进行了综合评价。

本研究表明 PEG-6000 模拟干旱胁迫时, SHT 和 XJH 种源的种子在低浓度的干旱胁迫下,仍能保持相对较高的发芽率和发芽指数,表明这2个种源的种子对轻度干旱环境具有一定的适应能力。许多利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫下种子萌发情况的研究表明,植物种子在干旱胁迫下萌发时,各指标较对照多呈现下降趋势,但低浓度胁迫下对某些植物的萌发具有促进作用<sup>[26]</sup>,这与本试验结果一致。种子萌发过程中的抗逆性机制在幼苗生长过程中能持续发挥作用,郭改改等<sup>[27]</sup>研究发现长柄扁桃的抗旱性与其叶片的结构密切相关,其研究结果表明 XJH 的长柄扁桃叶片角质层最厚,栅栏组织排列最紧密,具有较强的抗旱能力;而 JSZ 的长柄扁桃叶片角质层和栅栏组织较其他薄弱,抗旱性较弱,其试验结果幼苗的抗旱性与本试验中抗旱性排序结果相一致,而本试验中 SHT 的发芽势和发芽指数均高于对照以及其他种源,其具有更好的抗旱能力。

高浓度的  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  不仅对植物细胞具有毒害作用,还会引起植物细胞形成高渗透压的环境,破坏细胞结构,进而影响种子萌发。而低浓度的盐溶液处理种子时,溶液中的离子会渗入种子细胞,降低细胞渗透势,促进种子的发芽。张笑颜等<sup>[28]</sup>研究表明长柄扁桃可正常生长的基质盐含量  $< 1.8 \text{ g/kg}$ , 致死基质含盐量约为  $2.8 \text{ g/kg}$ , 其具有较强的耐盐性。

综上所述,种子的抗旱性和耐盐性不只是单一因素作用的结果,而是多指标共同作用,无灌溉直播造林技术不仅能够显著提升造林效率,同时也能够创造更大的生态效益<sup>[29]</sup>。曹志伟等<sup>[30]</sup>研究表明直播造林的长柄扁桃种子在适生地发芽能力相当且苗木

生长更健康。探究长柄扁桃种子抗逆性能避免因实生苗木而引起的适生生境发生明显改变时苗木生长渐缓的缺陷,为长柄扁桃的造林引种提供理论支撑,为良种选择提供技术指导。且直播造林能减少人力成本和育苗周期,在荒漠化及盐碱化较为严重的地带优势更为突出。

### 4 结论

(1) 抗旱性综合评价结果表明:SHT 种源抗旱性表现最为良好,其抗旱性得分为 90.12,而 JSZ 种源抗旱性得分仅为 6.68。抗旱性排序为:SHT>XJH>JJZ>JSZ。

(2) 耐盐性综合评价结果表明,XJH 种源的耐盐性表现最良好,其耐盐性得分为 89.51,而 JSZ 种源的耐盐性得分为 23.35,其耐盐性表现最差。耐盐性排序为:XJH>JJZ>SHT>JSZ。

(3) 不同种源的长柄扁桃种子对胁迫的耐受性具有差异性,4个种源中 SHT 种源更抗旱, JJZ 种源更抗盐,因此,在实际种植时应优先考虑这两个种源。

### 参考文献 (References)

- [1] 郭咪咪,李秀娟,栾霞.长柄扁桃仁及其水酶法油脂的品质研究[J].中国粮油学报,2020,35(10):111-116.  
Guo Mimi, Li Xiujuan, Luan Xia. Quality of *Amygdalus pedunculata* Pall kernel and its oil from aqueous enzymatic extraction [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10):111-116.
- [2] 王正安,余治家,马杰,等.不同造林方式对宁南山区樟子松抗旱造林效果的影响[J].水土保持通报,2021,41(5):226-231.  
Wang Zheng'an, Yu Zhijia, Ma Jie, et al. Effects of drought resistant afforestation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in mountainous area of southern Ningxia under different planting patterns [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5):226-231.
- [3] 林姝婧,何炎红,王昭才,等.长柄扁桃对土壤干旱的生理响应[J].分子植物育种,2024,22(8):2756-2761.  
Lin Shujing, He Yanhong, Wang Zhaocai, et al. Physiological response of *Prunus pedunculata* to soil drought [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(8):2756-2761.
- [4] 左丝雨,尹明宇,乌云塔娜,等.野生长柄扁桃种质资源花器官的多样性[J].经济林研究,2017,35(2):72-77.  
Zuo Siyu, Yin Mingyu, Wu Yuntan, et al. Diversity of flower organ phenotype in wild *Amygdalus pcdunculata* germplasm resources [J]. Nonwood Forest Research, 2017, 35(2):72-77.
- [5] 许新桥,王伟,褚建民.毛乌素沙地长柄扁桃31个优良

- 单株坚果核仁脂肪酸组成变异分析[J]. 林业科学, 2015, 51(7):142-147.
- Xu Xinqiao, Wang Wei, Chu Jianmin. Variation analysis on kernel oil content and its fatty acid composition in 31 superior *Amygdalus pedunculata* individuals from Mu Us desert [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51 (7) : 142-147.
- [6] 杨涛,施智宝,李剑,等. 本油料灌木长柄扁桃和柄扁桃种子发芽及生长特性研究[J]. 陕西林业科技, 2015(1): 14-18.
- Yang Tao, Shi Zhibao, Li Jian, et al. Seed germination and seedling growth of *Prunus pedunculata* and *Prunus pedunculata* Pall [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2015(1):14-18.
- [7] 王念,何威,李会宽,等. 长柄扁桃引种栽培及物候期观察[J]. 河南林业科技, 2017, 37(1):1-2.
- Wang Nian, He Wei, Li Huikuan, et al. Introduction cultivation and phenological phase observation of *Amygdalus pedunculatus* Pall [J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 2017, 37(1):1-2.
- [8] 张檀,郑瑞杰,梅立新,等. 长柄扁桃种子萌发特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4):73-76.
- Zhang Tan, Zheng Ruijie, Mei Lixin, et al. Germination characters of the seeds of the *Amygdalus pedunculata* Pall [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4):73-76.
- [9] 郭改改,封斌,麻保林,等. 不同区域长柄扁桃叶片解剖结构及其抗旱性分析[J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 720-728.
- Guo Gaigai, Feng Bin, Ma Baolin, et al. Leaf anatomical structures of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. and their drought resistance analysis [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33 (4) : 720-728.
- [10] 蒋晋豫,施智宝,李云,等. 干旱胁迫对不同种源长柄扁桃生理特性的影响[J]. 陕西林业科技, 2020, 48(4):5-9.
- Jiang Jinyu, Shi Zhibao, Li Yun, et al. Effect of drought stress on physiological characteristics of *Amygdalus pedunculata* with different provenances [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2020, 48(4) : 5-9.
- [11] 何权,蒋瑞娟,朱军,等. 新疆梭梭种子表型性状变异分析及相关研究[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 26-32.
- He Quan, Jiang Ruijuan, Zhu Jun, et al. Variation analysis on seed phenotypic traits of *Haloxylon ammodendron* in Xinjiang and related research [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2019, 28(3):26-32.
- [12] 郭松,李在留,薛建辉,等. 不同种源掌叶木果实和种子表型性状多样性分析及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4):11-20.
- Guo Song, Li Zailiu, Xue Jianhui, et al. Diversity analysis and comprehensive evaluation on phenotypic traits of fruit and seed of *Handeliiodendron bodinieri* from different provenances [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2018, 27(4):11-20.
- [13] 李永华,朱强. 长柄扁桃种子生物学特性及不同浓度赤霉素对其生长的影响[J]. 农业科技通讯, 2014(10): 107-110.
- Li Yonghua, Zhu Qiang. Biological characteristics of almond seeds and effects of gibberellin with different concentrations on their growth [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2014(10):107-110.
- [14] 作建芬,林益超,刘维维,等. 聚乙二醇-6000 模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(13):6414-6426.
- Zuo Jianfen, Lin Yichao, Liu Weiwei, et al. Effects of simulated drought stress with PEG-6000 on seed germination and seedling growth of three species of forage grasses [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025; 45(13).6414-6426.
- [15] 马小卫,郭春会,罗梦. 核壳、盐和水分胁迫对长柄扁桃种子萌发的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 69-72.
- Ma Xiaowei, Guo Chunhui, Luo Meng. Influence of endocarp, salt and water stress on the seed germination of *Amygdalus pedunculata* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4):69-72.
- [16] 乌兰图亚,斯琴巴特尔. 盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发及其幼苗耐盐性的影响[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(6): 1451-1454.
- Wu Lantuya, Siqin Bateer. Effect of salt stress on seed germination and seedling salt tolerance of *Prunus mongolica* maxim [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2017, 28(6):1451-1454.
- [17] 邹瑾,王晓佳,曹兵,等. 花棒种子萌发对 NaCl 及聚乙二醇胁迫的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(8):2002-2008.
- Zou Jin, Wang Xiaojia, Cao Bing, et al. Response of seed germination of *Hedysarum scoparium* to NaCl and polyethylene glycol stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8):2002-2008.
- [18] 张士超,袁芳,郭建荣,等. 利用隶属函数值法对甜高粱苗期耐盐性的综合评价[J]. 植物生理学报, 2015, 51(6):893-902.
- Zhang Shichao, Yuan Fang, Guo Jianrong, et al. Comprehensive evaluation on salt-tolerance of sorghum bicolor seedlings by subordinate function values analysis [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(6):893-902.
- [19] 王倩,董孔军,薛亚鹏,等. 糜子核心种质成株期抗旱性鉴定评价与抗旱种质筛选[J]. 中国农业科学, 2023, 56

- (21):4163-4174.
- Wang Qian, Dong Kongjun, Xue Yapeng, et al. Identification and evaluation of drought tolerance and screening of drought-tolerant germplasm for core germplasms in proso millet at adult stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(21):4163-4174.
- [20] Pei Yanwu, Huang Laiming, Shao Ming'an, et al. Responses of *Amygdalus pedunculata* Pall. in the sandy and loamy soils to water stress [J]. *Journal of Arid Land*, 2020,12(5):791-805.
- [21] 韩宇,梁洪汀,谷丽丽.模拟干旱胁迫下5份野生披碱草属植物萌发期抗旱性评价[J].草食家畜,2024(3):36-44.
- Han Yu, Liang Futing, Gu Lili. Evaluation of drought resistance of five wild *Elymus* plants during germination under simulated drought stress [J]. *Grass-Feeding Livestock*, 2024(3):36-44.
- [22] 侯瑞虹,杜柯,黄伟业,等.10份不同种源野生花苜蓿材料种子萌发期抗旱性评价[J].草地学报,2024,32(2):489-494.
- Hou Ruihong, Du Ke, Huang Weiye, et al. Evaluation on drought resistance of 10 wild *Medicago ruthenica* L. materials from different provenances at germination period [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024,32(2):489-494.
- [23] 郭丽娜,陈双庆,杨思岑.PEG模拟干旱对马棘种子萌发特性及抗旱性研究[J].陕西农业科学,2023,69(2):13-18.
- Guo Lina, Chen Shuangqing, Yang Sicen. Germination characteristics and drought resistance of *Indigofera bungeana* walpers under PEG simulated drought stress [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2023,69(2):13-18.
- [24] 雷斌,张凤银.3个豌豆变种种子萌发及幼苗生长生理对干旱胁迫的响应[J].江汉大学学报(自然科学版),2022,50(6):22-29.
- Lei Bin, Zhang Fengyin. Responses of seed germination and seedling growth physiology of 3 pea variants to drought stress [J]. *Journal of Jiangnan University* (Natural Science Edition), 2022,50(6):22-29.
- [25] 白斯古楞.长梗扁桃种子萌发影响因子研究[J].内蒙古林业,2021(11):39-40.
- Bai Siguleng. Study on influencing factors of seed germination of almond with long stem [J]. *Inner Mongolia Forestry*, 2021(11):39-40.
- [26] 孙景宽,张文辉,张洁明,等.种子萌发期4种植物对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J].西北植物学报,2006,26(9):1811-1818.
- Sun Jingkuan, Zhang Wenhui, Zhang Jieming, et al. Response to drought stresses and drought-resistances evaluation of four species during seed germination [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006,26(9):1811-1818.
- [27] 郭改改,封斌,麻保林,等.不同区域长柄扁桃抗旱性的研究[J].植物科学学报,2013,31(4):360-369.
- Guo Gaigai, Feng Bin, Ma Baolin, et al. Studies on drought resistance of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall [J]. *Plant Science Journal*, 2013,31(4):360-369.
- [28] 张笑颜,朱立新,贾克功.5种核果类果树的耐盐性与抗盐性分析[J].北京农学院学报,2008,23(2):19-23.
- Zhang Xiaoyan, Zhu Lixin, Jia Kegong. Study on salt-tolerance and salt-resistance of five stone fruit trees [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2008,23(2):19-23.
- [29] 王建新.长柄扁桃无灌溉直播造林技术研究[J].特种经济动植物,2024,27(4):101-103.
- Wang Jianxin. Study on direct seeding afforestation technology of almond without irrigation [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2024,27(4):101-103.
- [30] 曹志伟,毕宇,司海忠,等.长柄扁桃引种栽培物候期及结实播种品质研究[J].防护林科技,2021(6):30-32.
- Cao Zhiwei, Bi Yu, Si Haizhong, et al. Phenological period of introduction and cultivation of *Amygdalus pedunculata* and sowing quality of its fruiting [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2021(6):30-32.

(上接第110页)

- [33] 邓长春,蒋先敏,刘洋,等.高山林线交错带高山杜鹃的凋落物分解[J].生态学报,2015,35(6):1769-1778.
- Deng Changchun, Jiang Xianmin, Liu Yang, et al. Litter decomposition of *Rhododendron lapponicum* in alpine timberline ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(6):1769-1778.
- [34] 赵鹏武,张素华,张波,等.森林草原过渡区森林凋落物分解初期规律研究[J].内蒙古林业科技,2016,42(3):16-19.
- Zhao Pengwu, Zhang Suhua, Zhang Bo, et al. Study on the rules of early forest litter decomposition in forest-steppe transition zone [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2016,42(3):16-19.
- [35] 邓仁菊.季节性冻融对亚高山森林凋落物分解的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2008.
- Deng Renju. Effects of seasonal freeze-thaw on litter decomposition in the subalpine forest [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2008.