

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2021. 02. 011

# 聚乙二醇模拟干旱胁迫对榆树种子萌发影响\*

张航, 战金雨, 杨柳, 张廷秀, 杨成君  
(东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为探究干旱条件下榆树种子的发芽特性, 以榆树种子为试验材料, 采用滤纸发芽法, 研究聚乙二醇(PEG)模拟干旱对其种子萌发的影响。结果表明: 不同浓度的PEG干旱胁迫对榆树种子萌发有不同影响, 5%浓度的PEG胁迫对榆树种子的萌发有明显的促进作用; 榆树种子可耐5%~10%PEG浓度的干旱胁迫, 而15%浓度的PEG胁迫明显抑制榆树种子萌发, 20%浓度的PEG胁迫则对其种萌发有严重抑制作用。榆树的种子耐旱适宜范围、种子耐旱半致死浓度、种子耐旱极限浓度对应的PEG浓度分别为7.71%、12.33%、19.73%。

**关键词:** 榆树; 种子萌发; PEG胁迫

**中图分类号:** S 792.19   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-8246 (2021) 02-0078-07

## Effect of PEG Simulated Drought Stress on Germination of *Ulmus pumila* Seeds

ZHANG Hang, ZHAN Jin-yu, YANG Liu, ZHANG Ting-xiu, YANG Cheng-jun  
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the germination characteristics of *Ulmus pumila* L seeds under drought conditions, *U. pumila* L seeds were used as experimental materials to study the effect of polyethylene glycol (PEG) simulated drought on the germination of *U. pumila* L seeds. The results showed that different concentrations of PEG simulated drought stress have different effects on the germination of *U. pumila* L seeds, the concentration of 5% PEG stress have obvious promoting effect to seed, *U. pumila* L. seed can be resistant to the concentration of 5% ~ 10% PEG drought stress, and the concentration of 15% PEG stress significantly inhibited *U. pumila* L. seed germination, the concentration of 20% PEG stress has serious inhibition. The suitable range of seed drought tolerance, the semi-lethal concentration of seed drought tolerance, and the PEG concentration corresponding to the limit concentration of seed drought tolerance were 7.71%, 12.33%, and 19.73%, respectively.

**Key words:** *Ulmus pumila* L.; seed germination; PEG stress

外部环境因子长期作用于植物的生长发育, 从种子萌发到幼苗生长是受其影响最明显的时期<sup>[1]</sup>, 此时是衡量植物抗逆性强弱的重要时期<sup>[2-3]</sup>, 也是最脆弱的时期<sup>[4-5]</sup>。逆境条件下种子萌发情况和幼苗生长状况的优劣会影响植物中后期的正常生长及群体建成和质量<sup>[6-7]</sup>。干旱是一种常见的逆境条

件, 处于干旱环境下会导致种子在萌发过程中水分亏缺, 植物细胞遭到破坏, 体内代谢发生紊乱, 种子萌发受到抑制甚至不萌发。

聚乙二醇(PEG-6000)属于高分子渗透剂, 在试验上多用于模拟干旱胁迫<sup>[8]</sup>。Stoffela等<sup>[9]</sup>根据种子在高渗溶液或在不同渗透势的土壤中的发芽

\* 收稿日期: 2020-10-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572019BA08)。

第一作者简介: 张航(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林植物资源学研究。E-mail: hangernice@163.com

通信作者简介: 杨成君(1978—), 男, 副教授, 主要从事森林植物资源学研究。E-mail: nxycj@163.com

势、发芽率评价其耐旱性，并提出了种子萌发耐旱指数。Tobe 等<sup>[10]</sup>为鉴定不同牧草的抗旱性，使用 PEG 溶液来模拟干旱胁迫条件。韩占江等<sup>[11]</sup>试验结果表明 5 种藜科 (Chenopodiaceae) 植物种子不仅对轻度干旱具有耐受性，甚至可以萌发得更好，此结论与前人的结果相似<sup>[12-13]</sup>。试验证明干旱胁迫也诱导黄瓜 (*Cucumis sativus*) 种子的适应性调节反应，这与 Zhang Hua 等<sup>[14]</sup>的报道一致。

在此之前对榆树 (*Ulmus pumila* L.) 抗旱性的研究主要集中在对其幼苗的生长及生理生化方面，试验方法多采用盆栽控水法。张伟<sup>[15]</sup>的研究表明随着干旱程度增加，榆树各个部分的生物量均有所降低；但轻度干旱胁迫下，其叶片生物量比例增加，中度干旱胁迫下，其根系生物量比例增加。白国华<sup>[16]</sup>的研究表明在轻度到中度干旱条件下，随着干旱程度增加，幼苗叶片含水量逐渐降低，茎含水量先升后降，根系含水量上升，比根长和水分利用效率随着干旱胁迫程度增加而增加。徐士印<sup>[17]</sup>研究发现随着干旱程度增加白榆叶片叶绿素含量逐渐降低，可溶性蛋白含量和可溶性糖含量稳步上升。本研究以榆树种子为研究对象，利用聚乙二醇模拟干旱的方法探究干旱条件下榆树种子的发芽特性。因此，根据对榆树种子的耐旱程度的研究，其试验结果可以为抗旱品种早期选择以及榆树早期抗旱鉴定提供参考。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验用榆树种子为来自于东北林业大学校园内的榆树母树成熟种子。

### 1.2 试验方法

配置不同浓度的 PEG 溶液，浓度分别为 5%、10%、15%、20%、25%，设置一个 0% 浓度作为对照。试验材料选取均匀饱满无病虫害的榆树种子，用自来水将种子冲洗干净，再用 5% 的次氯酸钠溶液浸种消毒 10 min 后，用无菌水冲洗干净，备用。

采用滤纸发芽法，把种子摆放在铺有 2 层滤纸的培养皿中，分别加入相应浓度的处理液 10 mL，对照处理需要加入同样体积的蒸馏水，试验期间隔天每个培养皿补充 10 mL 的处理液或蒸馏水。水平放置于温度 25 ℃、光照和黑暗交替（光照时间为 16 h，黑暗时间为 8 h）的人工恒温气候箱中进行种

子萌发实验。每个培养皿 30 粒种子，每个处理 3 个重复，试验共进行 7 d。每天定时记录发芽种子数。

试验结束时，每个培养皿随机选取 5 粒种子，测量苗长。计算发芽势和最终的发芽率。以胚根突破种皮 1 mm 作为种子发芽标准。当连续 5 d 不再有种子发芽时结束种子萌发试验。胁迫初期，种子萌发数达到高峰时统计发芽势，第 7 d 统计其发芽率。

### 1.3 数据处理与分析

统计种子的发芽数量，测量种子萌发苗的苗长，计算不同贮藏条件下的种子发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数。计算公式如下<sup>[18]</sup>：

发芽势 (%) = 种子萌发初期的高峰发芽数 / 供试种子数 × 100%

相对发芽势 (%) = 处理发芽势 / 对照发芽势 × 100%

发芽率 (%) = 种子最终发芽数 / 供试种子数 × 100%

相对发芽率 (%) = 处理发芽率 / 对照发芽率 × 100%

平均发芽时间 (d) =  $\sum (Gt \times t) / \sum Gt$

发芽指数 ( $G_i$ ) =  $\sum (Gt / Dt)$

活力指数 ( $V_i$ ) =  $S \times \sum (Gt / Dt)$

胚根长 (cm) = 种子发芽后上胚根长 + 下胚轴长。

式中： $G_t$  为在时间  $t$  的种子发芽数； $D_t$  为相应的发芽天数； $S$  为幼苗的生长势（以苗长表示）。

计算各处理的榆树种子发芽指数，用每天的累计种子发芽数除以种子在培养皿中萌发放置的天数，待种子发芽结束后，将每天计算得到的数值相加，即为该种子的发芽指数。数据分析主要通过 SSPS 19.0 的计算程序完成，采用 Anova 方法比较均值差异，采用 Duncan 进行多重比较，利用 GraphPad Prism 5 进行数据处理及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 PEG 对榆树种子发芽指数的影响

发芽指数可以较敏感地反映出植物种子在胁迫环境下的反应<sup>[19]</sup>。从各浓度处理下的榆树种子的发芽指数来看，随着 PEG 浓度的增加，榆树种子的发芽指数呈现先上升后下降的趋势（图 1），CK 除与 5%、10% 无明显差异外，与他处理相对比差异明显。5% PEG 浓度的发芽指数达到最高值约为 8.76，较 CK 上升了 3.41%。说明 5% PEG 浓度的

干旱胁迫对于榆树种子的发芽指数有一定的促进作用,但其效果不明显。PEG 浓度达到 10%,发芽指数较 5% 显著下降了 9.58%,其指数为 CK 的 93.51%。当干旱胁迫的浓度达到 15% 时,榆树种子发芽指数较 10% 急剧下降了 75.11%,其值为 CK 的 23.28%。20% PEG 浓度较 15% 又明显下降 80.85%,仅为 CK 值的 4.46%。CK 较 5%、10% 无显著差异。试验结果证明,榆树种子对中低浓度的 PEG 胁迫有一定的耐受力,且 5% 浓度的 PEG 溶液对榆树种子萌发有一定促进作用,但随着 PEG 浓度的增加(即干旱程度加深),高浓度 PEG(干旱)胁迫显著抑制榆树种子萌发。

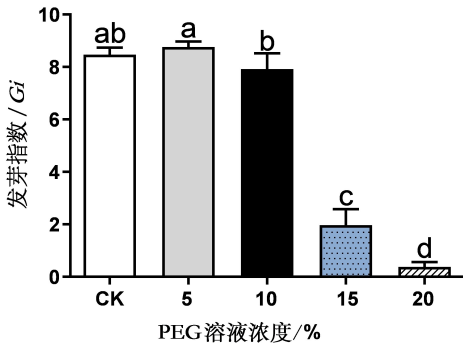


图 1 不同浓度 PEG 胁迫下榆树种子的发芽指数

Fig. 1 Effects of PEG stress at different concentrations on the germination index of *U. pumila* seeds

## 2.2 不同浓度 PEG 对榆树种子活力指数的影响

活力指数代表种子发芽的潜力和种子质量<sup>[20]</sup>。

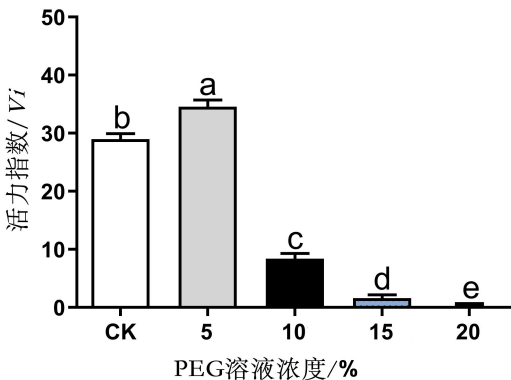


图 2 不同浓度 PEG 胁迫对榆树种子的活力指数的影响

Fig. 2 Effects of PEG stress at different concentrations on the vigour index of *U. pumila* seeds

如图 2 所示,各处理间的活力指数均有明显差异。榆树种子在 PEG 胁迫下的活力指数呈先上升后下降的趋势。5% PEG 浓度下榆树种子的活力指数达到最高值约为 32.53,较 CK 显著上升 12.21%,为 CK 的 112.21%。PEG 浓度达到

10%,种子的活力指数较 5% 急剧下降 78.58%,下降为 CK 的 24.03%。15% PEG 浓度处理下的榆树种子,其活力指数较 10% 又下降 77.26%,为 CK 的 5.47%。20% PEG 浓度较 15% 明显下降 97.62%,仅为 CK 的 0.13%。除 5% PEG 浓度下榆树种子的活力指数显著增加外,其余浓度处理的榆树种子其活力指数均随着盐胁迫浓度的升高而逐渐下降。试验结果表明,5% PEG 溶液对于榆树种子的活力指数有显著的促进作用,15%、20% PEG 溶液对于榆树种子的活力指数抑制明显。

## 2.3 不同浓度 PEG 对榆树种子发芽势的影响

发芽势反映了在胁迫环境下,各处理种子萌发初期的高峰值的表现<sup>[21]</sup>。

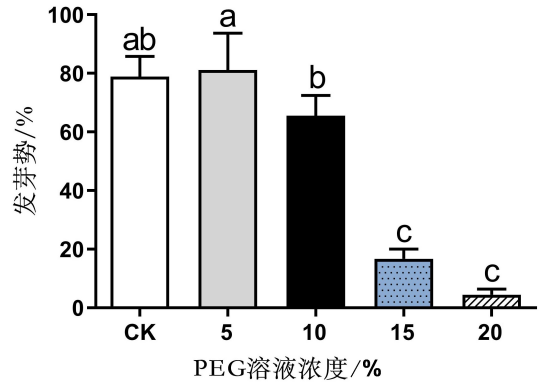


图 3 不同浓度 PEG 胁迫下榆树种子的发芽势

Fig. 3 Effects of PEG stress at different concentrations on the germination energy of *U. pumila* seeds

如图 3 所示,CK 除与 5%、10% PEG 浓度无明显差异外,与其他处理差异显著,15% PEG 浓度较 20% PEG 浓度榆树种子的发芽势差异显著。随着 PEG 溶液浓度的升高,榆树种子发芽势呈先上升后下降的趋势,5% PEG 浓度的榆树种子发芽势最高,均值为 81.11%,较 CK 上升 2.22%。PEG 浓度达到 10%,榆树种子发芽势降低,较 5% 下降 15.56%。15% PEG 浓度下的榆树种子的发芽势急剧下降 48.89%。20% PEG 溶液浓度处理下的种子发芽势又下降 12.22%。其中 5%、10%、15%、20% PEG 浓度与 CK 的相对发芽势为 102.99%、83.08%、21.17%、5.76%。本试验结果表明,在干旱胁迫条件下,榆树种子的萌发高峰期的发芽势相互对比,5% 较 CK、15% 差异不显著,证明榆树种子对中低程度的干旱胁迫有耐受力,且 5% 浓度的 PEG 溶液对榆树种子萌发有促进作用。随着 PEG 浓度的上升,高浓度的干旱胁迫显著抑制榆树种子萌发。其中 20% PEG 浓度下的

榆树种子发芽势最低，说明在 20% 浓度下的榆树种子在萌发初期的种子发芽数极少，萌发能力低，对榆树种子的发芽势有严重的影响和抑制作用。

#### 2.4 不同浓度 PEG 对榆树种子发芽率的影响

发芽率体现了种子在整个发芽过程中的最终萌发结果<sup>[22]</sup>。如图 4 所示，CK 除与 5%、10% PEG 浓度无明显差异外，较 15%、20% PEG 浓度均差异明显，15% 较 20% PEG 浓度的榆树种子的发芽率差异显著。随着 PEG 溶液浓度的上升，种子发芽率与发芽势变化一致，呈先上升后下降的趋势。5% PEG 浓度处理的榆树种子发芽率最高，均值为 90%，较 CK 上升 3.33%。10% PEG 浓度，榆树种子发芽率较 5% PEG 下降 5.56%。当 PEG 溶液上升到 15% 时，榆树种子的发芽率较 10% 急剧下降 54.44%。20% PEG 浓度较 15% 又明显下降 23.33%。其中 5%、10%、15%、20% 浓度与 CK 的相对发芽率为 103.85%、97.44%、34.62%、7.69%。随着 PEG 溶液浓度的升高，5%、10% PEG 浓度的榆树种子发芽率虽下降，但 CK、5%、10% PEG 浓度三者间无明显差异，证明榆树种子对中低程度的 PEG 浓度（干旱）胁迫有一定的耐受力，且 5% 浓度的 PEG 溶液对榆树种子萌发有促进作用。其中 15%、20% PEG 浓度二者间差异明显，证明随着 PEG 浓度的上升，高浓度的 PEG 浓度（干旱）胁迫对榆树种子的发芽率有不同程度的影响和显著的抑制作用。

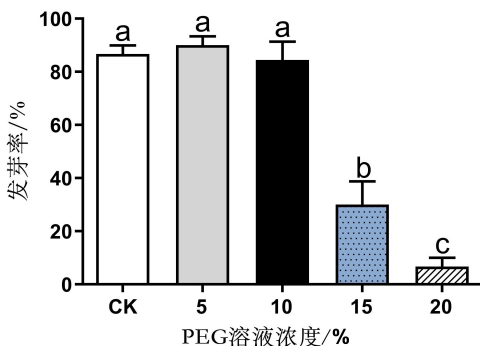


图 4 不同浓度 PEG 胁迫对榆树种子的发芽率的影响

Fig. 4 Effects of PEG stress at different concentrations on the germination rate of *U. pumila* seeds

#### 2.5 不同浓度 PEG 对榆树萌发后胚根长的影响

胚根长反映了萌发过程中胁迫环境对种子萌发后胚根、胚轴的影响<sup>[23]</sup>。如图 5 所示，各处理间的榆树种子发芽后的胚根长差异明显。随着 PEG 溶液浓度的升高，榆树萌发种子的胚根长呈先上升后下降的趋势。5% PEG 处理的胚根长最长，均值为 3.42 cm。5% PEG 浓度的榆树萌发胚根长较 CK 略上升 15.19%，可达 CK 的 115.19%。PEG 浓度达到 10%，榆树萌发后胚根长下降，较 5% 下降 72.95%，为 CK 的 31.16%。15% PEG 溶液处理下的榆树种子，胚根长较 10% 下降了 25.63%，为 CK 的 23.17%。20% PEG 浓度较 15% 又下降 87.39%，为 CK 的 2.92%。除了 5% 浓度下的胚根长有所上升外，随着干旱胁迫浓度的上升，其他处理的胚根长逐渐下降。20% 浓度干旱胁迫下的胚根长最短，约为 0.1 cm，说明在此浓度下榆树种子虽有萌发，但其苗已无法正常生长。

为 3.42 cm。5% PEG 浓度的榆树萌发胚根长较 CK 略上升 15.19%，可达 CK 的 115.19%。PEG 浓度达到 10%，榆树萌发后胚根长下降，较 5% 下降 72.95%，为 CK 的 31.16%。15% PEG 溶液处理下的榆树种子，胚根长较 10% 下降了 25.63%，为 CK 的 23.17%。20% PEG 浓度较 15% 又下降 87.39%，为 CK 的 2.92%。除了 5% 浓度下的胚根长有所上升外，随着干旱胁迫浓度的上升，其他处理的胚根长逐渐下降。20% 浓度干旱胁迫下的胚根长最短，约为 0.1 cm，说明在此浓度下榆树种子虽有萌发，但其苗已无法正常生长。

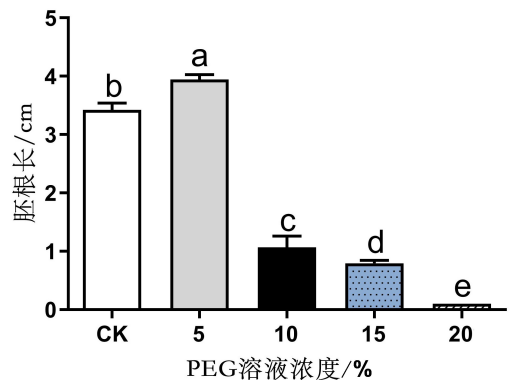


图 5 不同浓度 PEG 胁迫下榆树种子的胚根长

Fig. 5 Effects of PEG stress at different concentrations on the seedling length of *U. pumila* seeds

#### 2.6 不同浓度 PEG 对榆树种子平均发芽时间的影响

平均发芽时间代表了胁迫环境对种子平均萌发速度的影响，其值大小，表现了种子萌发速度的快慢，时间的延长与缩短<sup>[24]</sup>。

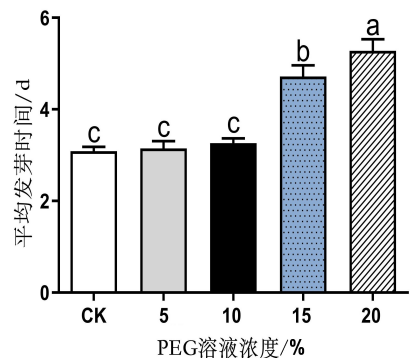


图 6 不同浓度 PEG 胁迫对榆树种子的平均发芽时间的影响

Fig. 6 Effects of PEG stress at different concentrations on the mean germination time of *Ulmus pumila* seeds

如图 6 所示，CK、5%、10% PEG 浓度三者相比差异不显著，其他处理的种子平均发芽时间差异显著。随着 PEG 溶液浓度的升高，榆树种子的平

均发芽时间呈明显的上升趋势。5% PEG 浓度的较 CK 的平均发芽时间延长了 0.06 d, 为 CK 的 101.85%。10% PEG 浓度的榆树种子平均发芽时间较 5% 延长 0.17 d, 为 CK 的 105.61%。随着 PEG 溶液浓度的上升, 榆树种子的平均发芽时间继续延长, 15% PEG 浓度较 10% 的平均发芽时间显著延长 1.63 d, 其值为 CK 的 152.77%; 20% PEG 浓度较 15% 又明显延长 2.19 d, 为 CK 的 170.89%。试验结果表明, 中低度的干旱胁迫对榆树种子的平均发芽时间影响不明显外, 重度的干旱

胁迫对榆树种子的平均发芽时间有显著的延长作用。

## 2.7 各指标与 PEG 溶液浓度的回归分析

根据各指标与干旱浓度进行回归分析, 得出各指标的回归方程及榆树种子耐旱适宜范围、种子耐旱半致死浓度、种子耐旱极限浓度。由表 1 中相关系数最高的相对发芽势, 根据其回归方程得出榆树种子耐旱适宜范围、种子耐旱半致死浓度、种子耐旱极限浓度对应的 PEG 浓度分别为 7.71%、12.33%、19.73%。

表 1 PEG 溶液浓度和各指标的回归分析结果

Tab. 1 Regression analysis results of PEG solution concentration and various indicators

指标	回归方程	相关系数 $R$	适宜值/%	临界值/%	极限值/%
发芽指数	$y = 10.097 - 45.96x$	0.904	8.14	12.75	20.14
活力指数	$y = 32.884 - 181.75x$	0.896	6.13	10.12	16.48
发芽势	$y = 92 - 426.67x$	0.902	7.70	12.32	19.65
发芽率/%	$y = 103.56 - 440x$	0.894	8.76	13.69	21.60
苗长/%	$y = 3.825 - 19.593x$	0.906	6.42	10.78	17.74
发芽时间/d	$y = 2.708 + 11.903x$	0.906	3.29	9.78	20.20
相对发芽势	$y = 116.66 - 540.61x$	0.922	7.71	12.33	19.73
相对发芽率/%	$y = 119.63 - 507.89x$	0.889	8.79	13.71	21.59

注: 种子耐旱适宜范围即适宜值=处理指标达到 CK 的 75% 时相对应的 PEG 溶液浓度; 种子耐旱半致死浓度即临界值=处理指标达到 CK 的 50% 时相对应的 PEG 溶液浓度; 种子耐旱极限浓度=处理指标达到 CK 的 10% 时相对应的 PEG 溶液。

## 3 结论与讨论

改善干旱地区植被一直以来都是全球急需解决的问题, 选育合适树木, 既保持其良好生长又合理节约水资源的问题需要关注, 而榆树作为较速生的抗旱树种, 是改善西北干旱环境的首选树种。目前, 国内对榆树在干旱胁迫下生长及生理方面的研究较少, 本试验研究了 CK、5%、10%、15%、20% 浓度的 PEG 溶液处理对榆树种子萌发的影响, 结果表明: 5% 浓度的干旱胁迫对于榆树种子的萌发促进作用明显, 榆树种子可耐 5% ~ 10% PEG 浓度的干旱胁迫, 而 15% 浓度的干旱胁迫可以显著抑制榆树种子萌发, 20% PEG 浓度的干旱胁迫则对其种子有严重抑制作用。根据各指标与 PEG 浓度回归分析, 得出榆树种子耐旱适宜范围、种子耐旱半致死浓度、种子耐旱极限浓度对应的 PEG 浓度分别为 7.71%、12.33%、19.73%。

干旱胁迫对植物的影响体现在植物的整个生长发育过程中, 引起植物体内水分缺失, 导致细胞内部所需水分含量不足, 细胞器及脂膜受损, 种子无法正常进行萌发。不同植物对 PEG 干旱胁迫的耐

受阈值不同, 种子能否在干旱环境下保持活力, 正常萌发及幼苗能否继续生长是植物存活的关键。有研究表明, 干旱胁迫显著抑制黄瓜种子<sup>[25]</sup>的萌发, 并导致质膜损伤, 类似的结果在苦瓜 (*Momordica charantia*)<sup>[26]</sup>、胡萝卜 (*Daucus carota* var. *sativa* Hoffm)<sup>[27]</sup> 和 水稻 (*Oryza sativa*)<sup>[28]</sup> 中均有报道。石开明<sup>[29]</sup> 等发现低浓度、高浓度的 PEG 处理均对山桐子 (*Idesia polycarpa*) 种子的萌发显著抑制。Bousslama 等<sup>[30]</sup> 研究结果表明, 轻度干旱对大豆 (*Glycine max*) 种子萌发影响较小, 中度干旱显著延长大豆种子的萌发时间。综上所述, 干旱胁迫对植物种子萌发的影响, 与种子本身的特性有关, 而不同种子对 PEG 模拟干旱胁迫的反应也有所不同。宋鑫玲等<sup>[31]</sup> 发现亚麻 (*Linum usitatissimum*) 种子在 25% 和 30% 的 PEG 浓度下, 种子不萌发。李志萍等<sup>[32]</sup> 发现, 5% PEG 对栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 种子萌发有明显的促进作用, 表现为发芽率提高、发芽整齐度增加, 而高浓度 (20% PEG) 则有抑制作用。而汪磊<sup>[33]</sup> 等在研究胡麻 (*Sesamum indicum*) 时, 发现 25% 和 30% 浓度下其种子仍有 40% 的发芽率。江瑞涛等<sup>[34]</sup> 试验表明 PEG-6000 溶液并未完全抑制沙冬青 (*Ammopiptanthus mon-*

golicus) 种子的萌发生长, 只是延长了沙冬青种子的萌发时间, 并且沙冬青幼苗生长在高浓度 PEG 胁迫下抑制不显著。由前人的试验结果可知, 榆树种子的耐旱性, 同亚麻种子、栓皮栎种子相似, 可耐中低度的干旱胁迫。但耐旱性不如胡麻、沙冬青等。本研究主要探究了榆树种子在不同干旱条件下的发芽特性, 并找出了榆树对干旱的极限耐受阈值, 但对其萌发期间的内源物质的含量变化及抗旱机理尚不明确, 有待进一步研究。本试验结论可为了解不同浓度的干旱胁迫对榆树种子萌发的影响, 对榆树种子的耐旱能力做出评价, 并为榆树种子的播种条件、干旱地抗性树种的选择提供指导意见。

### 参考文献:

- [1] Omami E N, Haigh A M, Medd R W, et al. Changes in germinability, dormancy and viability of *Amaranthus retroflexus* as affected by depth and duration of burial[J]. Weed Research, 1999, 39(5): 345-354.
- [2] Kazuo T, Li X M, Kenji O, et al. Seed germination and radicle growth of a halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae) [J]. Annals of Botany, 2000, 85(3): 391-396.
- [3] Azarnivand H, Souri M, Etemad V. Effect of water stress on seed germination of *Artemisia spicigera* & *Artemisia fragrans* [J]. Biaban, 2007(12): 17-21
- [4] Uniyal R C, Nautiyal A R. Seed germination and seedling extension growth in *Ougeinia dalbergioides* Benth. under water and salinity stress [J]. New Forests, 1998, 16(3): 265-272.
- [5] Pujol J A, Calvo J F, Ramírez-Díaz L. Recovery of germination from different osmotic conditions by four halophytes from Southeastern Spain [J]. Annals of Botany, 2000, 85(2): 279-286.
- [6] Okcu G, Kaya M D, Atak M. Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of pea (*Pisum sativum* L.) [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 200(29): 237-242.
- [7] Mehra V, Tripathi J, Powell A A. Aerated hydration treatment improves the response of *Brassica juncea* and *Brassica campestris* seeds to stress during germination [J]. Seed Science and Technology, 2003, 31(1): 57-70.
- [8] 张卫杰, 韩松, 吉庆勋, 等. 种子处理对 PEG-6000 模拟渗透胁迫下棉花发芽的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(2): 91-96.
- [9] Stoffella P J, Sandsted R F, Zobel R W, et al. Root characteristics of black beans I. Relationship of root size to lodging and seed yield [J]. Crop Science, 1979, 19(6): 823-826.
- [10] Tobe K, Zhang L, Qiu G Y, et al. Characteristics of seed germination in five non-halophytic Chinese desert shrub species [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 47(2): 191-201.
- [11] 韩占江, 程龙, 李志军. 塔里木盆地 10 种藜科植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价 [J]. 植物研究, 2016, 36(2): 266-273.
- [12] Xu C, Huang B. Differential proteomic responses to water stress induced by PEG in two creeping bentgrass cultivars differing in stress tolerance [J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(17): 1477-1485.
- [13] Stepien P, Kobus G. Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress [J]. Biologia Plantarum, 2006, 50(4): 610-616.
- [14] Zhang H, Ye Y K, Wang S H, et al. Hydrogen sulfide counteracts chlorophyll loss in sweetpotato seedling leaves and alleviates oxidative damage against osmotic stress [J]. Plant Growth Regulation, 2009, 58(3): 243-250.
- [15] 张伟. 干旱胁迫对榆树幼苗生物量分配的影响 [J]. 防护林科技, 2016(9): 27-29.
- [16] 白国华. 不同干旱胁迫对榆树幼苗根叶形态的影响 [J]. 防护林科技, 2016(10): 41-42, 49.
- [17] 徐士印. 水分胁迫对白榆树种生化特性影响 [J]. 防护林科技, 2015(4): 13-15.
- [18] 国家农作物种子标准化技术委员会, 国家农业技术推广服务中心. 农作物种子检验规程: GB/T3543. 1-3543. 7-1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 43-48.
- [19] 石亚萍, 蔡静平. 玉米种子发芽率快速测定方法的研究 [J]. 中国粮油学报, 2008, 23(6): 181-183.
- [20] 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.
- [21] 岳莉然, 程贝贝. 盐碱胁迫及干旱胁迫对大花剪秋萝种子萌发的影响 [J]. 北方园艺, 2019(10): 86-93.
- [22] 张若宇, 坎朵, 马蓉, 等. 基于 RGB 模型的脱绒棉种颜色特征与发芽状况的关系 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 172-177.
- [23] 马秀娟, 杨洁, 张凯, 等. 盐胁迫对千屈菜和黄花鸢尾种子萌发的影响 [J]. 北方园艺, 2015(21): 90-95.
- [24] 屈燕, 区智, 夏樱, 等. 不同前处理对总状绿绒蒿种子萌发特性的影响 [J]. 种子, 2018, 37(2): 5-9, 13.
- [25] 牟雪姣, 张远兵, 吴燕, 等. 外源 H<sub>2</sub>S 缓解黄瓜种子萌发过程中干旱胁迫伤害的生理机制 [J]. 西北农业学报, 2018, 27(9): 1328-1334.
- [26] Uniyalrc, Nautiyala R. Seed germination and seedling extension growth in *Qugeinia dalbergioides* under water salinity stress [J]. New Forests, 1998, 16(3): 265-272.