

干旱胁迫下沙地赤松等松科植物种子萌发特性

何凌仙子¹, 贾志清^{1,2*}, 李清雪^{1,2}, 张友焱^{1,2}, 冯莉莉¹,
杨凯悦¹, 戴捷¹, 陈娟¹

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站, 青海 共和 813005)

摘要: [目的] 以北方干旱区常用的3种松科植物沙地赤松、樟子松和青海云杉为研究对象, 分析其种子萌发特性及对干旱胁迫的响应。沙地赤松为辽宁省固沙研究所于2014年筛选审定的新品种, 目前在辽宁省生长状况良好, 尚未有过其抗旱能力的相关研究。青海共和是高寒沙区, 将沙地赤松与青海省常见的两种松科植物青海云杉和樟子松进行对比, 以期沙地赤松在青海引种试种提供参考。[方法] 采用不同浓度PEG-6000溶液模拟干旱胁迫的方法进行种子萌发试验, 利用模糊隶属函数对干旱胁迫下3种松科植物的种子相对发芽率、相对胚根长、相对胚芽长、萌发胁迫指数、萌发抗旱指数和萌发活力指数等6项指标进行综合评价。[结果] 低浓度的PEG-6000溶液对3种松科植物种子萌发和胚根生长发育均有促进作用; 随着干旱胁迫程度的加剧, 3种松科植物的发芽率、幼苗鲜质量、活力指数、萌发胁迫指数、萌发抗旱指数均呈先上升后下降的趋势; 种子萌发期耐水分胁迫能力为沙地赤松 > 樟子松 > 青海云杉。[结论] 沙地赤松比樟子松和青海云杉的抗旱性强, 适宜在青海引种试种。

关键词: PEG胁迫; 松科植物; 抗旱性; 萌发; 隶属函数

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)03-0173-07

Seed Germination upon Drought Stress of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. and Other Two Pinaceae Species

HE Ling-xian-zi¹, JIA Zhi-qing^{1,2}, LI Qing-xue^{1,2}, ZHANG You-yan¹, FENG Li-li¹,
YANG Kai-yue¹, DAI Jie¹, CHEN Juan¹

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Gonghe 813005, Qinghai, China)

Abstract: [Objective] The experiment aims at estimating the seed germination characteristics and the response to drought stress of *Pinus densiflora*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Picea crassifolia* which were widely used in arid area afforestation in north China. *Pinus densiflora* is a new species screened and verified in 2014 by the Liaoning Sand-Fixation Afforestation Research Institute. It grows well in Liaoning Province, and there is not any studies on its drought tolerance during seed germination. Gonghe County in Qinghai Province is an alpine sandy area. In order to provide reference for introducing *Pinus densiflora* in Qinghai sandy land, the tolerance of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Picea crassifolia*, two common sandy Pinaceae plants in Qinghai province, to drought stress were compared with *Pinus densiflora*. [Method] Seed germination experiments were conducted using different concentrations of PEG-6000 solution to simulate the drought stress. The relative germination rate, relative root length, radicle length, vigor indexes, germination stress index and germination drought tolerance index of the three species were

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201504420), 国家自然科学基金(31670706, 31600585)

作者简介: 何凌仙子(1991—), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向: 退化土地植被恢复与重建. E-mail: hlxz20st@163.com.

* 通讯作者: E-mail: jiazq369@caf.ac.cn.

comprehensively evaluated by fuzzy membership function method. [**Result**] Low concentrations of PEG-6000 improved seed germination and the radicle length of the three species. The seed germination, radicle length, seed flesh weights, vigor indexes, germination stress index and germination drought tolerance index of the three species showed a trend of increase in initial and then decrease with increasing PEG-6000 concentration. The tolerance to water stress was *Pinus densiflora* > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* > *Picea crassifolia*. [**Conclusion**] The drought tolerance of *Pinus densiflora* seed is superior to that of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Picea crassifolia*, which indicates that *Pinus densiflora* is suitable to be planted in Qinghai province.

Keywords: PEG stress; Pinaceae; drought tolerance; germination; fuzzy membership function

我国北方高寒沙区是土地沙漠化最严重的区域之一,该地区海拔高、气温低、气候干燥、降水量少、植被覆盖度低且类型单一,主要通过人工固沙、植树造林、涵养水源等措施来实现退化土地的植被恢复与重建^[1-4]。作为高寒沙区重要的造林树种,国内研究主要集中于樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)等松科固沙植物的生物量、碳储量、碳稳定同位素组成、生理性状对干旱盐碱胁迫的响应、树木年轮气候学、种子幼苗生理特性等^[5-10]。辽宁省固沙造林研究所于2014年筛选审定的新品种沙地赤松(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)辽宁省生长状况良好,然而该植物种子在其他地区的萌发期适应性研究未见报道。本研究拟选用不同浓度的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫环境,对3种松科造林树种沙地赤松、樟子松和青海云杉的种子萌发特性和对干旱胁迫的响应进行对比研究,以期对沙地赤松在青海的引种试种提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 种子来源

沙地赤松种子来自辽宁省固沙造林研究所,樟子松和青海云杉种子采自青海省治沙试验林场(99°45′~100°30′E, 36°03′~36°40′N, 海拔2 871 m)。PEG-6000由国药集团化学试剂有限公司生产,分析纯。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理 2016年12月18日在中国林业科学研究院荒漠化所实验室开始实验。在清水中剔除空粒、烂粒、虫蚀粒和杂质,用0.5%的高锰酸钾溶液浸泡种子0.5 h后,用蒸馏水漂洗,在通风处自然阴干至安全含水量后备用。试验前用TTC法^[11]测得供试种子生活力均在90%以上。

1.2.2 模拟干旱胁迫条件 采用不同浓度的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫条件。PEG溶液设置5%、10%、15%、20%、25%、30%等6个浓度梯度,以蒸馏水(CK)处理为对照。

1.2.3 萌发试验 用直径11 cm培养皿垫双层湿润滤纸作为发芽床萌发的方法进行萌发试验,将消毒过的植物种子分别放入7组含有等量试剂(15 mL)发芽床中,每组重复操作3次,每个重复组需测试50粒种子。萌发试验在MGC-250光照培养箱内进行,置于(25±0.5)℃恒温光照培养,光照周期12 h/12 h(光照/黑暗),相对湿度为60%。试验过程中,采用质量平衡法每天向培养皿中补充蒸发失去的水分,为了减少发芽床水势变动,每2 d更换1次滤纸,并及时清理发霉腐烂的种子,以防感染其他种子。从种子放入发芽床之日起观察,以胚根突破种皮作为萌发标准,以3个重复组中出现1粒以上萌发种子的时间节点作为相应处理条件下的种子发芽始期,每天定时观察记录发芽种子数量,以连续4 d不再种子萌发为发芽结束期。统计种子萌发率,并从每个培养皿中测定所有幼苗初生根长度以及全部幼苗鲜质量。

1.3 计算方法

$$\text{萌发率(GR)} = (\text{发芽的种子数} / \text{种子总数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{逐日萌发率(DGR)} = (\text{每日萌发种子数} / \text{种子总数}) \times 100\% \quad [12] \quad (2)$$

$$\text{相对胚根长} = \text{不同浓度下胚根长度} / \text{对照组胚根长度} \quad (3)$$

$$\text{相对胚芽长} = \text{不同浓度下胚芽长度} / \text{对照组胚芽长度} \quad (4)$$

$$\text{萌发胁迫指数(GSI)} = \text{干旱胁迫下种子发芽指数} / \text{对照种子发芽指数} \quad [13] \quad (5)$$

$$\text{干旱胁迫下种子发芽指数} GI = \sum_{i=1}^t G_i / D_i \quad (6)$$

式中: G_t 为时间 t 日的萌发数, D_t 为相应的萌发天数。

$$\text{活力指数(VI)}: VI = GI \times S^{[14]} \quad (7)$$

式中: GI 为萌发指数, S 为幼苗鲜质量。

萌发抗旱指数(GDRI) = 干旱胁迫下种子萌发指数/对照种子萌发指数^[15] (8)

式中:干旱胁迫下种子萌发指数 = $(1.00)Rd_2 + (0.75)Rd_4 + (0.5)Rd_6 + (0.25)Rd_8$, Rd_2 、 Rd_4 、 Rd_6 、 Rd_8 分别为第2、4、6、8天的种子萌发率,1.00、0.75、0.50、0.25 分别为相应萌发天数所赋予的抗旱系数。

各相对指标均为干旱胁迫处理与对照组所得参数的比值。

1.4 抗旱性综合评价方法

用模糊数学隶属法对种子萌发期的耐水分胁迫能力进行综合评价^[16]。利用下列公式进行标准化处理:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中, X_j 表示第 j 个指标值, X_{\min} 表示第 j 个指标的最小值, X_{\max} 表示第 j 个指标的最大值;如某一个指标与抗性为负相关,则用公式:

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

按公式(8)计算标准差系数 V_j ,按照公式(9)计算权重系数 W_j ;按公式(10-12)计算隶属函数值(D)。 D 值越大,表示抗旱性越强。

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}}{\bar{X}_j}, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (12)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad (13)$$

1.5 统计分析

本研究应用 Excel、Origin 8.5 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 干旱胁迫对3种松科植物种子萌发率的影响

图1所示:沙地赤松初始萌发天数最长(15 d),青海云杉最短(12 d)。不同的 PEG 胁迫条件下,种子的逐日萌发率变化规律不一致。图2中,沙地赤松种子的总萌发率最高(83.33%),青海云杉次之(70.67%),樟子松最低(55.33%)。随 PEG 干旱胁迫的加剧,沙地赤松总萌发率在5%和10% PEG 胁迫下与对照组的差异不显著($P > 0.05$),樟子松种子总萌发率先上升后下降,而青海云杉呈持续下降趋势。当 PEG 胁迫浓度为25%和30%时,3种植物种子均不萌发,由此表明 PEG25%是萌发极限阈值浓度;20% PEG 浓度处理下,青海云杉、沙地赤松和樟子松种子萌发率分别比对照组下降了92%、69%和67%,后二者差异不显著($P > 0.05$);5%与10% PEG 浓度处理时,沙地赤松和樟子松种子的萌发率均高于对照组,青海云杉略低于对照组。整体上看,随干旱胁迫的加剧,3种植物种子的萌发率逐渐降低。种子的萌发率受其自身特性的影响较大,种子的相对萌发率越大,植物抗旱性越强^[17]。从图2可知:樟子松种子的相对萌发率最高,沙地赤松次之,青海云杉最低。

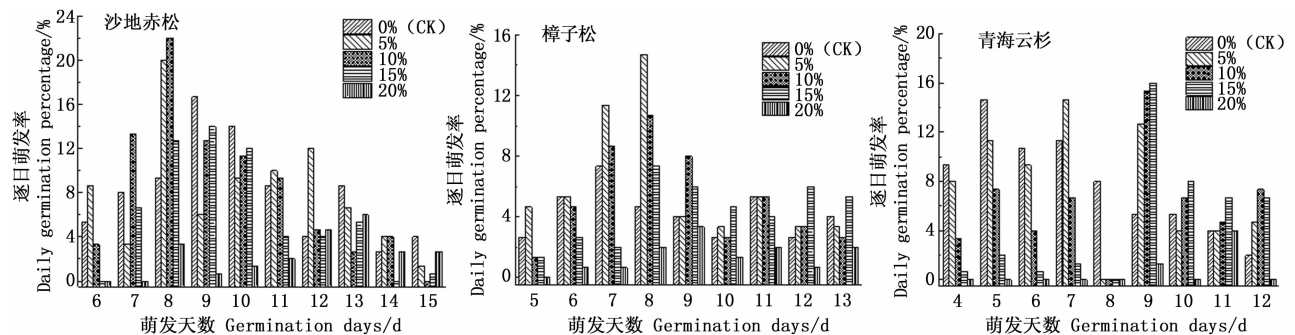


图1 PEG 干旱胁迫对3种松科植物种子逐日萌发率(DGR)的影响

Fig.1 Effect of PEG stress on seed daily germination rates(DGR) of three Pinaceae plants

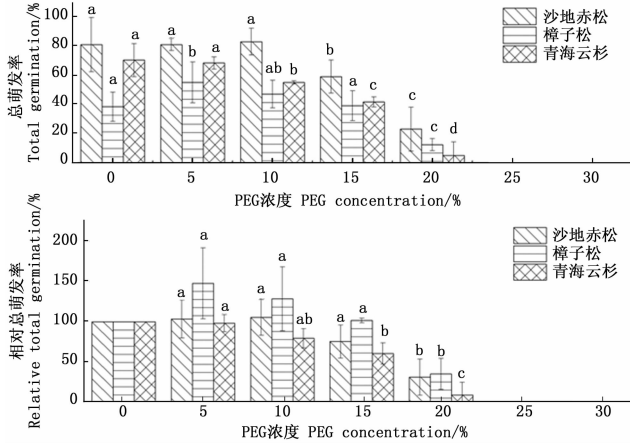


图2 PEG干旱胁迫对3种松科植物种子总萌发率和相对总萌发率的影响

Fig. 2 Effect of PEG stress on the total seed germination rates and relative germination rates of three Pinaceae plants

2.2 PEG-6000 干旱胁迫对3种松科植物种子胚根的影响

植物根系越发达,其抗旱能力越强。由图3可知:随PEG干旱胁迫浓度的增加,种子胚根长度均呈先上升后下降的趋势。樟子松、青海云杉和沙地赤松的PEG临界浓度(胚根生长至最大值)为5%、5%和10%。PEG浓度为25%时,3种松科植物胚根长度均下降至零,即达到或超过该PEG浓度,植物将无法正常萌发。

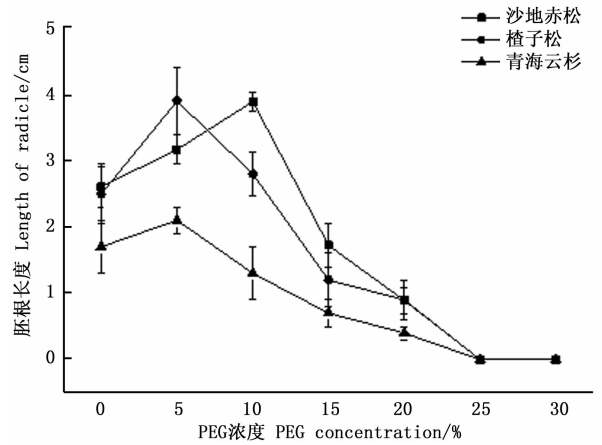


图3 PEG干旱胁迫对3种松科植物种子胚根的影响

Fig. 3 Effect of PEG stress on seed radicle length of three Pinaceae plants

2.3 PEG-6000 干旱胁迫对3种松科植物幼苗鲜质量和活力指数的影响

由图4可知:随PEG浓度的增加,沙地赤松和樟子松幼苗鲜质量呈先上升后下降的趋势,在干旱胁迫条件下,沙地赤松在PEG浓度为10%时,鲜质量最大为0.032g,樟子松在PEG浓度为5%时,鲜质量最大为0.023g,而青海云杉幼苗鲜质量缓慢下降,在空白对照时幼苗鲜质量最大为0.019g。此外,PEG干旱胁迫对樟子松相对幼苗鲜质量的影响最大。

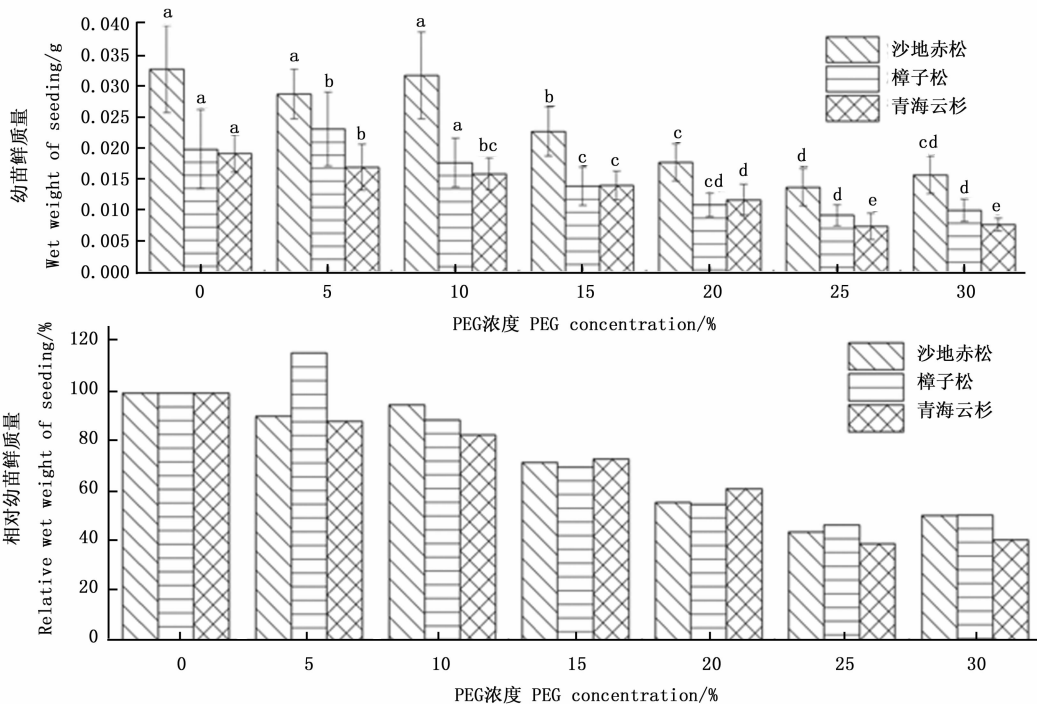


图4 PEG干旱胁迫对3种松科植物幼苗鲜质量的影响

Fig. 4 Effect of PEG stress on seedling fresh weights of three Pinaceae plants

萌发活力指数用以表征不同植物种子间抗旱性的强弱。方差分析结果表明:不同松科植物种子间的萌发活力指数差异显著($P < 0.05$)。图5所示:3种松科植物在25%、30% PEG浓度下活力指数均为零;沙地赤松在15%和20% PEG处理下,活力指数分别比对照下降了46%和86%;樟子松在5% PEG处理下,活力指数比对照升高了60%,在20% PEG处理下,活力指数为对照组的10%;青海云杉活力指数在5%、10%、15%、20%分别比对照下降了18%、45%、73%、95%。在20% PEG胁迫下,沙地赤松的活力指数较其他2种植物的高。

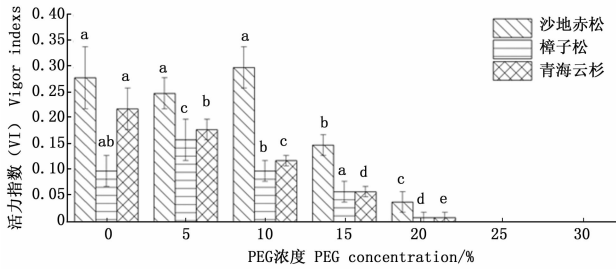


图5 PEG干旱胁迫对3种松科植物种子活力指数(VI)的影响
Fig. 5 Effect of PEG stress on vigor indexes (VI) of three Pinaceae plants

2.4 PEG-6000 干旱胁迫对3种松科植物萌发胁迫指数和萌发抗旱指数的影响

通过方差分析,不同松科植物种子间的萌发胁迫指数和萌发抗旱指数差异显著($P < 0.05$)。由图6可知:沙地赤松和樟子松萌发胁迫指数均呈先上升后下降的趋势。在5%和10%浓度PEG溶液处理下,樟子松种子萌发胁迫指数有明显上升趋势;在5% PEG溶液处理下,沙地赤松种子萌发胁迫指数虽有上升趋势,但与对照组差异不显著($P > 0.05$);随PEG胁迫的加剧,青海云杉种子萌发胁迫指数平缓下降。沙地赤松、樟子松和青海云杉萌发胁迫指数最大值分别出现在10%、5%、0% (CK) PEG溶液处理条件下。在20% PEG溶液处理下,沙地赤松、樟子松和青海云杉种子萌发胁迫指数分别比对照组下

降了75%、69%、94%。

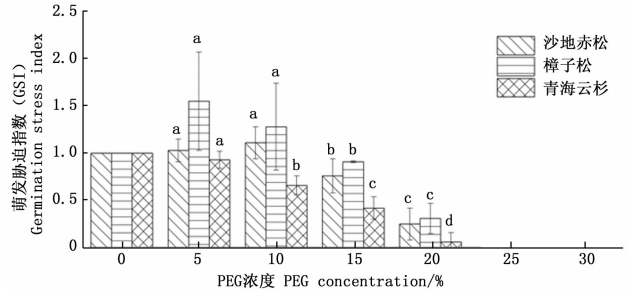


图6 PEG干旱胁迫对3种松科植物种子萌发胁迫指数(GSI)的影响

Fig. 6 Effect of PEG stress on germination stress index (GSI) of three Pinaceae plants

由图7可知:沙地赤松和樟子松种子萌发抗旱指数均先上升后下降,而青海云杉呈平缓下降趋势。沙地赤松、樟子松和青海云杉种子萌发抗旱指数最大值为1.83、1.67和1.00,且分别分别出现在5%、5%、0% (CK) PEG溶液处理条件下。在20% PEG浓度处理下,沙地赤松和樟子松种子萌发抗旱指数较对照组分别下降了82%和83%。

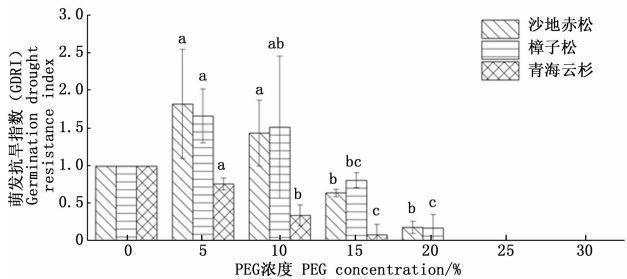


图7 PEG干旱胁迫对3种松科植物种子萌发抗旱指数(GDRI)的影响

Fig. 7 Effect of PEG stress on germination drought tolerance index (GDRI) of three Pinaceae plants

2.5 PEG-6000 干旱胁迫对3种松科植物种子萌发期耐水分胁迫能力综合评价

表1所示:沙地赤松、樟子松和青海云杉的耐水分胁迫能力综合评价价值分别为2.95、2.74和1.71。

表1 PEG干旱胁迫下3种松科植物种子各指标隶属函数值及综合评价值

Table 1 Subordinate function and comprehensive evaluation value of three *Pinus* plants under PEG stress

植物 Plants	相对发芽率 RGR	相对胚根长 RERL	萌发胁迫指数 GSI	萌发抗旱指数 GDRI	萌发活力指数 VI	综合评价值 CEV	排序 Sequencing
沙地赤松 <i>Pinus densiflora</i>	0.57	0.10	0.60	0.91	0.77	2.95	1
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	0.57	0.07	0.51	0.72	0.88	2.74	2
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.40	0.10	0.31	0.25	0.66	1.71	3

3 讨论

研究表明,随 PEG 胁迫程度的加剧,沙地赤松和樟子松种子的总萌发率、相对萌发率、幼苗鲜重、胚根长、胁迫指数和抗旱指数呈先上升后下降的趋势,青海云杉的相应指标平缓下降。植物的抗旱性是由遗传因子和环境共同控制的,单纯用 1 个抗旱指标无法准确定义植物的抗旱性问题,因此需进行多指标综合评价。采用隶属函数值平均法,既消除了个别指标带来的片面性,又由于平均值是 $[0, 1]$ 上的纯数,使各植物种子的抗旱性差异具有可比性、可行性和可靠性^[18]。综合来看,沙地赤松和樟子松对外界干旱胁迫的适应能力较青海云杉更强。在 5% 和 10% 低浓度 PEG 处理下,沙地赤松和樟子松逐日萌发率和胚根长度均比对照有所升高,而青海云杉的种子萌发率有轻微的下降,这表明低浓度 PEG 溶液(5%、10%)有助于 3 种松科植物种子的萌发,提高种子相对萌发率和胚根长度,这与其他学者的相关研究结果一致^[19-22]。在轻度干旱胁迫下,植物根系对土壤水分的减少最敏感,产生干旱胁迫信号向上传导至叶片使得其调节气孔开度以减少水分散失从而增强对环境的适应性,同时胚根的伸长有利于从不同的土层深度获得更多水分,这是植物适应缺水环境的一种生态适应表现。这种轻微的逆境胁迫能够激发植物种子自身保护机制,减少种子萌发过程中膜系统的损伤,进而提高其体内抗氧化酶活性和可溶性蛋白含量,增强植物抗旱性,提高植物种子的发芽率^[23]。

本研究采用模糊隶属函数法对 3 种松科种子进行 6 项萌发指标的评价分析。结果表明,随 PEG 浓度的增加,种子萌发受到不同程度的抑制,且 3 种松科植物对 PEG 胁迫的敏感浓度不同。这与于军等^[24]对矮沙冬青(*Ammopiptanthus nanus* (M. Pop.) Cheng f.)种子及李志萍^[25]对栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)种子的研究规律一致。当胁迫超过一定程度后,胚根生长受到抑制,可能是由于植物萌发率低且萌发慢的行为能保护植物幼苗在干旱缺水的环境中生存,这对于其物种的生存具有重要意义^[26]。综合评价结果表明,这 3 种松科植物耐水分胁迫的能力为沙地赤松 > 樟子松 > 青海云杉。

4 结论

低浓度 PEG 溶液(5%~10%)有助于提高 3 种

松科植物种子萌发率和胚根长度;随 PEG 浓度增加(15%、20%、25%、30%),种子萌发受到不同程度的抑制;

耐水分胁迫的综合能力为沙地赤松 > 樟子松 > 青海云杉。沙地赤松有较强的抗旱耐旱能力,适用于干旱半干旱地区的植被恢复与重建。

参考文献:

- [1] 王涛. 荒漠化治理中生态系统,社会经济系统协调发展问题探析——以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048.
- [2] 李毅, 屈建军, 董治宝, 等. 中国荒漠区的生物多样性[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 79-81.
- [3] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 6-40.
- [4] Li Q, Jia Z, Zhu Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients after the establishment of Caragana intermedia plantation on Sand Dunes in Alpine Sandy Land of the Tibet Plateau[J]. Plos One, 2015, 10(5): e0124456.
- [5] Wang Q, Zhao C, Gao C, et al. Effects of environmental variables on seedling-sapling distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) along altitudinal gradients[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 54-64.
- [6] 王飞, 刘世增, 刘有军, 等. 沙地云杉和青海云杉种子萌发和幼苗生长对干旱盐碱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2014, 34(11): 2309-2316.
- [7] 刘晓宏, 安文玲, 梁源源, 等. 祁连山青海云杉树轮 $\delta^{13}C$ 的时空变化及其气候意义[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 666-676.
- [8] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(07): 1689-1694.
- [9] 全昌明, 邢小军, 李振昌, 等. 伊金霍洛旗樟子松和油松引种试验对比研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(2): 63-67.
- [10] 孟鹏, 李玉灵, 尤国春, 等. 彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3050-3060.
- [11] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1-2.
- [12] 孙时轩. 造林学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 48.
- [13] Li P Y, Sun Z J, Abu L T. Evaluation of drought resistance of 29 accessions of *Elytrigia repens* at seed germination stage under polyethylene glycol (PEG) stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(1): 32-39.
- [14] 郑光华. 种子生理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 706.
- [15] Bouslama M, Schapaugh W T. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance[J]. Crop Science, 1984, 24(5): 933-937.
- [16] 刘娟娟, 李吉跃, 张建国. 高 CO₂ 浓度和干旱胁迫对 4 种树苗光合特性的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(3): 339-345.

- [17] 潘 昕, 李吉跃, 王军辉, 等. 干旱胁迫对青藏高原4种灌木生理指标的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26(3): 352-358.
- [18] 何芳兰, 赵 明, 王继和, 等. 几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 100-106.
- [19] 郑光华, 徐本美, 顾增辉. PEG“引发”种子的效果[J]. 植物学报, 1985(3):107-111.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 任瑞芬, 郭 芳, 尹大芳, 等. 柠檬薄荷对干旱胁迫的形态和生理响应[J]. 西北农业学报, 2016, 25(8): 1201-1210.
- [23] 苏秀红, 宋小玲, 强 胜, 等. 不同地理种群紫茎泽兰种子萌发对干旱胁迫的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(3):308-311.
- [24] 于 军, 焦培培. 聚乙二醇(PEG6000)模拟干旱胁迫抑制矮沙冬青种子的萌发[J]. 基因组学与应用生物学, 2010, 29(2): 355-360.
- [25] 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.
- [26] 薛盼盼, 张 强, 魏学智. 模拟干旱胁迫对酸枣种子萌发及活力的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(12): 1837-1843.

(责任编辑:詹春梅)