



PEG 模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响

李志萍,张文辉*,崔豫川

(天津师范大学 生命科学学院 天津市动植物抗性重点实验室,天津 300387)

摘要:为了阐明栓皮栎种子萌发期对水分胁迫的耐受性,以当年采集的栓皮栎种子为材料,采用培养皿滤纸萌发的方法研究了不同浓度(0%、5%、10%、20%、30%)PEG-6000溶液对其种子萌发、生长、保护酶活性和有机渗透调节物质的影响,并对种子萌发率、胚根生长速率等与PEG浓度进行了回归分析。结果表明:(1)随着干旱胁迫程度的加剧,栓皮栎种子的发芽率、发芽指数、胚根长度、胚根生长速率和活力指数均呈先升高后下降趋势,说明低浓度(5%、10%)PEG胁迫可以促进栓皮栎种子萌发及生长,而高浓度(20%、30%)则具有抑制作用。(2)建立水分胁迫条件下种子萌发率、胚根生长速率等与PEG浓度的回归方程发现,栓皮栎种子在PEG胁迫下的萌发临界值和极限值分别为32.01%和36.99%,胚根生长速率的临界值和极限值分别为30.1%和33.35%。(3)随着PEG浓度的升高,栓皮栎种子中3种保护酶(SOD、POD、CAT)活性和3种有机渗透调节物质(可溶性蛋白、脯氨酸、可溶性糖)含量呈现不同的变化,但均有不同程度升高趋势。由此可见,栓皮栎种子可通过增加保护酶活性和体内渗透调节物质来适应水分胁迫环境,使自身萌发和生长受抑制程度降到最低。

关键词:栓皮栎;种子萌发;干旱胁迫;聚乙二醇;临界值

中图分类号:Q945.79 文献标志码:A

Effects of PEG Simulated Drought Stress on Seed Germination and Growth Physiology of *Quercus variabilis*

LI Zhiping, ZHANG Wenhui*, CUI Yuchuan

(College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to study the water tolerance of *Quercus variabilis* in seed germination stage, the effects of different concentrations (0%, 5%, 10%, 20%, 30%) of PEG stress on seed germination, growth, protective enzyme activities and the organic osmoregulation substances were measured with choosing fresh cork oak seeds and using Petri dish and filter paper germination method. The correlation analyses were done between seed germination, radicle growth rate and PEG stress. The results showed that: (1) With the increasing of drought stress, seed germination rate, vigor index, germination index and radicle length of cork oak were all increased then decreased, showing that low concentration PEG stress (5%, 10%) can promote the cork oak seed germination and growth, whereas high concentrations (20%, 30%) had inhibition effects. (2) The regression equation between seed germination, radicle growth rate and PEG stress showed that the critical and the maximum value of the seed germination of *Q. variabilis* were 32.01% and 36.99%, while the corresponding radicle growth rates were 30.1% and 33.35% under the PEG stress. (3) With the increase of PEG concentration, three protective enzyme (SOD, POD and CAT) activities and contents of three kinds of organic osmoregulation substances were presented different responses, but had a same rising trend. Thus it

收稿日期:2013-06-29;修改稿收到日期:2013-09-04

基金项目:国家林业局林业公益性行业专项(201104011);国家自然科学基金项目(30872018)

作者简介:李志萍(1989—),女,在读硕士研究生,主要从事植物生理生态学相关研究。E-mail:742820393@qq.com

*通信作者:张文辉,博士,教授,博士生导师,主要从事植物生理生态学相关理论与研究。E-mail:zwhckh@163.com

can be seen that cork oak seeds increased protective enzyme activities and contents of osmotic regulation substances *in vivo* to adapt to the water stress, making the inhibition degree of germination and growth to the minimum.

Key words: *Quercus variabilis*; seed germination; drought stress; PEG; critical value

随着水资源的日益匮乏,干旱已成为全球内的环境问题。天津地区处于华北平原东北部的温带季风气候区,降水年际变化很大,气候干旱,不仅影响农业生产,而且严重制约城市的园林绿化^[1-2]。因此,筛选具有较强耐旱能力的园林植物向天津引种是园林绿化和城乡建设最经济实用的途径。

栓皮栎(*Quercus variabilis*)是中国暖温带和亚热带海拔2 000 m以下地区地带性植被落叶阔叶林的建群种,其木材、树皮、果实及叶等均有重要的经济价值,是中国重要软木资源和食用菌、天麻、木炭生产的经济树种;同时,栓皮栎林对保持水土、涵养水源、增加土壤肥力等方面均有重要意义^[3]。目前对栓皮栎的研究内容主要集中于生物学特性、生态学特性、种群生态、资源培育以及综合利用方面^[4],关于其对干旱土壤适应性方面实验研究很少。2008年我们将栓皮栎幼苗引入到天津市区,在不同干旱土壤上栽植,观测其园林特性,发现其对干旱土壤具有一定适应性^[5],但是迄今关于栓皮栎种子耐旱方面的研究还未见报道。

聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)是一种亲水性很强的大分子有机物,用PEG-6000溶液渗透方法模拟干旱条件具有简单易行、周期短、重复性好等特点,近些年来被广泛地用于植物种子萌发期的耐旱性研究^[6-9]。栓皮栎一般通过种子繁殖,因此栓皮栎种子能否在干旱条件下萌发成苗,是其成功引种到天津的前提和关键。本研究在控制试验条件下,用不同浓度PEG-6000溶液模拟不同程度干旱胁迫,采用培养皿滤纸萌发的方法探讨干旱胁迫对栓皮栎种子萌发、生长及保护酶系统等的影响,为评价栓皮栎种子萌发期的耐旱特性提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验用种子采自位于栓皮栎分布中心的秦岭北坡的周至县楼观台林场。2011年10月份采摘种子后水选法去除空粒和夹杂物,经表面阴干后加入磷化铝包装寄运回实验室。选取饱满、大小均匀的种子4℃低温保存。

实验前先进行种子大小、重量及活力的测定。

种子千粒重测定以1000粒×3组的平均值为其平均重量(±标准误差);以毫米纸为标准,测定20粒种子的长轴和短轴,求平均值;将种子切片烘干后测定其含水量;用TTC法^[10]进行种子活力快速测定。经检测,实验用栓皮栎种子直径(16.02±2.32)mm,长(23.12±1.56)mm,千粒重(3 954±89)g;新鲜栓皮栎种子含水量为76.51%;种子活力在90%以上。然后选取饱满、大小均匀的种子备用。

1.2 种子胁迫处理

2013年1月10日开始水分胁迫实验。挑选大小均一、成熟饱满的栓皮栎种子,用自来水冲干净,经0.1% HgCl₂消毒10 min,蒸馏水冲洗3次。吸水纸吸干种子表面水分后,将种子播种于置入2层纱布和1层滤纸的培养皿(直径12 cm)中,每皿摆放20粒种子。根据预实验以及参考文献^[11,12]设置PEG浓度,每皿分别移入10 mL蒸馏水配制的质量分数5%、10%、20%、30%的PEG-6000溶液,对应的渗透势大约分别为-0.05 MPa、-0.20 MPa、-0.60 MPa、-1.20 MPa^[13]。每个处理3次重复,用蒸馏水作对照,2 d更换一次发芽床。盖上玻璃盖,以防溶液蒸发。将培养皿置于生化培养箱内,于恒温25℃下连续黑暗培养10 d。

1.3 生长指标测定

以种子露白为发芽标志,每天定时记录种子萌发数和胚根长度,种子萌发的时限按国际种子检验规程规定发芽天数为10 d^[14]。由于10 d之内栓皮栎种子并未出现胚轴及子叶,发芽结束后测定全部胚根鲜重。相关生长指标的具体计算公式如下:

$$(1) \text{萌发率 } G = n/N \times 100\%$$

式中,n为萌发种子数,N为供试种子数^[15]。

$$(2) \text{发芽指数: } Gi = \Sigma(G_t/D_t)$$

式中,G_t为时间t日的萌发数,D_t为相应的萌发天数。

$$(3) \text{活力指数: } Iv = s \times Gi$$

式中,s为幼苗鲜重^[16]。

$$(4) \text{生长速率} = L/\Sigma[N_i \times (D_t - D_{i-1})]$$

式中,L指每一皿中全部萌发种子胚根或胚轴长度的总和;N_i指第i天的萌发种子数;D_t指实验持续的天数(10 d),D_{i-1}指第i天^[17]。

(5) 相对干重含水量(%)=(FW-DW)/DW×100%

式中, FW 指萌发种子或各部分的鲜重; DW 指相应的干重。

(6) 耐旱临界值与极限值: 先对相应指标和 PEG 胁迫浓度进行相关分析, 若两者存在相关性, 则进行回归分析, 根据回归方程求出耐旱临界值与极限值。耐旱临界值与极限值分别为与干旱胁迫强度呈正相关的指标增加到对照的 200%、400% 时所对应的浓度, 或者与干旱胁迫强度呈负相关的指标降低到对照的 50%、25% 时所对应的浓度^[18-19]。

1.4 生理指标测定

1.4.1 保护酶活性 待发芽结束后(10 d 后), 取每培养皿中全部发芽种子的胚根, 置于预冷的研钵中, 加适量预冷的 50 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(含 1% PVP, PH 7)及少量石英砂, 在冰浴中研磨成匀浆, 在 2 ℃~4 ℃下, 12 000 g 离心 20 min。上清液即为粗酶液。SOD 活性的测定参照李合生^[20]的方法, 以抑制 NBT 光化还原 50% 为一个酶活性单位。CAT 活性的测定用紫外吸收法, 以 1 min 内 A₂₄₀ 减少 0.1 的酶量为一个酶活性单位^[21]。POD 活性的测定用愈创木酚染色法, 以 1 min 内 A₄₇₀ 变化 0.01 为一个过氧化物酶活性单位^[10,22]。

1.4.2 渗透调节物质含量 (1) 可溶性蛋白含量 提取粗酶液采用考马斯亮兰染色法^[20] 测定。

(2) 脯氨酸含量 取每培养皿发芽种子胚根 0.1 g, 加入 3% 的碘基水杨酸溶液研磨, 将匀浆液全部转入到离心管中, 沸水浴 10 min, 冷却离心后吸取上清液即为脯氨酸的提取液, 后采用茚三酮显色法^[20] 测定含量。

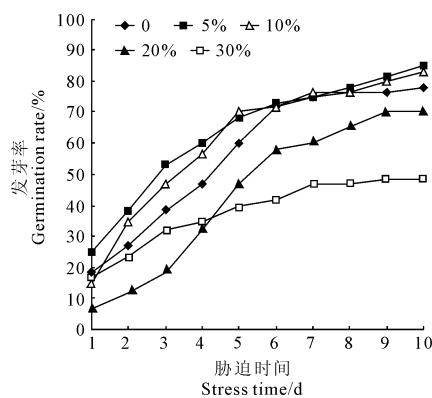


图 1 PEG 胁迫下栓皮栎种子萌发率的变化特征

不同小写字母表示不同 PEG 浓度处理间在 0.05 水平上差异显著; 下同

Fig. 1 The seed germination rate of *Q. variabilis* under PEG stress

The different normal letters indicate the significant difference among concentrations at 0.05 level; The same as below

(3) 可溶性糖含量 采用硫代巴比妥酸法测定^[23]。取每培养皿发芽种子胚根 0.1 g, 加入 10% TCA 迅速研磨, 离心后, 取上清和 10% TCA 各 2 mL 于另一空离心管中, 加盖煮沸 15 min, 冷却后再次离心, 测定吸光值。

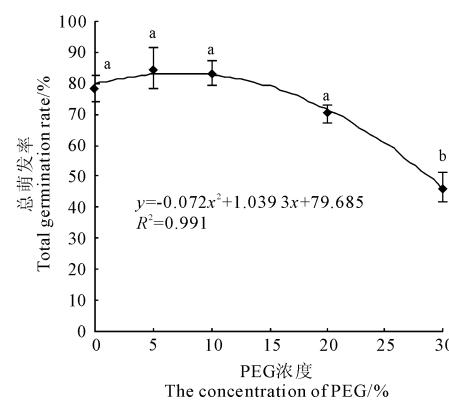
1.5 数据分析

所得数据用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析, 在置信水平 95% 上用 Duncan 方法进行多重比较, 每一指标的图或表, 均为 3 次重复求平均值, 用 Excel 2003 程序绘图并拟合回归方程。

2 结果与分析

2.1 PEG 胁迫对栓皮栎种子萌发的影响

2.1.1 萌发率 栓皮栎种子在不同浓度 PEG 胁迫下的萌发率变化曲线及总萌发率的回归曲线(图 1)显示, 其种子萌发力较强, 在 1~6 d 各浓度处理种子发芽率升高较快, 6 d 后基本保持不变或缓慢升高趋势。同时, 发芽结束(10 d)后, 栓皮栎种子总萌发率随 PEG 胁迫的增强呈抛物线式变化, 在 5% 和 10% PEG 浓度下萌发率均高于对照, 但与对照无显著差异, 且在 5% 浓度下达到最大值, 是对照的 1.08 倍; 20%~30% PEG 处理下种子萌发率有所下降, 且在 30% 浓度下降到最低, 为对照的 59.56%, 且与对照差异显著。可见, 低浓度 PEG 胁迫可以促进栓皮栎种子萌发, 而高浓度则抑制种子发芽。另外, 建立水分胁迫条件下种子萌发率与 PEG 浓度的回归方程, 发现种子萌发率与 PEG 胁迫呈显著负相关, 栓皮栎种子在 PEG 胁迫下的萌发临界值和极限值分别为 32.01% 和 36.99%。



2.1.2 发芽指数和活力指数 发芽指数和活力指数比单纯的发芽率更能全面地反映种子在实际条件下的萌发速度和整齐度,以及萌发的数目和幼苗健壮生长的潜势^[24-25]。从表1可以看出,随PEG胁迫浓度的升高,栓皮栎种子发芽指数和活力指数均呈现先升高后降低的趋势,两者在低浓度(5%、10%)PEG胁迫下均高于对照,且在5%PEG时达到最大值,分别为对照的1.21、1.62倍;高浓度(20%、30%)PEG胁迫下均低于对照,且均与对照差异显著,发芽指数于20%浓度时下降到最低值,是对照的72.75%,而活力指数于30%浓度下达到最低值,为对照的29.58%。可见,较低浓度(5%、10%)PEG胁迫对栓皮栎种子发芽指数和活力指数有促进作用,高浓度PEG对种子萌发的数目、速度及整齐度抑制作用较大。

2.2 PEG 胁迫对种子胚根生长和相对干重含水量的影响

2.2.1 胚根长度和生长速率 种子萌发后,胚根的延伸可以反映出植物定居成苗的特性。在整个PEG胁迫期间,各个浓度的栓皮栎种子胚根长度均随着胁迫时间延长而逐渐增加,而且表现出低浓度

表1 不同浓度PEG胁迫下栓皮栎种子
发芽指数和活力指数

Table 1 The seed germination index and vigor index of different concentrations of *Q. variabilis* under PEG stress

PEG浓度/ concentration/%	发芽指数/ Germination index	活力指数/ Vigor index
0	23.34±2.49a	39.98±3.78b
5	28.18±0.69a	65.05±2.90a
10	25.18±2.36a	60.75±4.72a
20	15.36±1.45b	17.51±2.13c
30	16.98±1.23b	11.83±1.56c

胁迫(5%、10%)高于对照,高浓度胁迫(5%、10%)低于对照的趋势,且胁迫时间越长这种规律越明显,处理间的差异越大(图2);在胁迫处理结束(10 d)后,低浓度胁迫(5%、10%)下种子胚根长度分别比对照显著高出36.82%、32.89%,而高浓度(20%、30%)胁迫分别比对照显著降低36.04%和36.75%,且分别在5%和30%PEG胁迫下达到最高和最低值(图3,A)。同时,栓皮栎种子胚根生长速率随PEG胁迫的增强而呈抛物线式变化(图3,B),在10%PEG浓度下达到最大,为对照的1.21倍,但与对照差异不显著,之后不断下降,在30%PEG浓度下下降到最低值,显著低于对照55.89%。以上结果说明低浓度PEG可以促进栓皮栎种子的胚根生长,而高浓度则对其有抑制作用。另外通过相关分析发现,栓皮栎胚根生长和胚根生长速率均与PEG胁迫程度呈显著负相关,胚根生长的临界值和极限值分别为26.91%和30.33%,胚根生长速率的临界值和极限值分别为30.1%和33.35%。

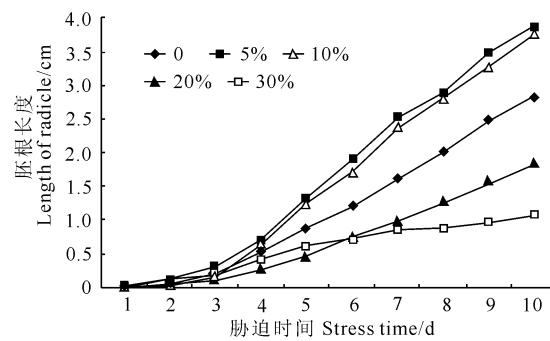


图2 不同浓度PEG胁迫下栓皮栎种子胚根长度日变化

Fig. 2 The daily radicle lengths of *Q. variabilis* under PEG stress

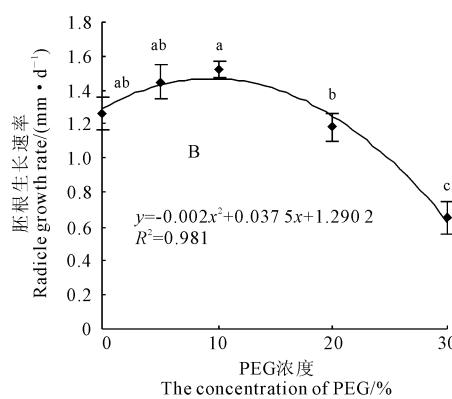
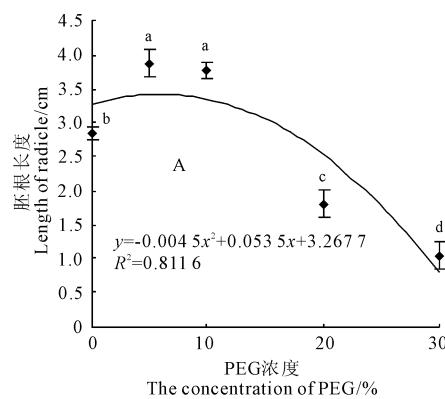


图3 不同浓度PEG胁迫下栓皮栎种子胚根长度及胚根生长速率的变化

Fig. 3 The radicle lengths and radicle growth rate of *Q. variabilis* under different PEG stress

2.2.2 相对干重含水量 栓皮栎种子相对干重含水量随 PEG 浓度升高而呈现抛物线升高趋势(图 4)。其中,栓皮栎种子相对干重含水量在 5% PEG 浓度下仅比对照降低 11.14%,且与对照无显著差异;之后有所上升,于 30% PEG 胁迫下达到最大,为对照的 1.55 倍,且与对照差异显著。说明低浓度 PEG 对栓皮栎种子萌发生长影响较小,种子在高浓度 PEG 胁迫下仍然可以保持较高的相对干重含水量。进一步的相关分析发现,种子相对干重含水量与 PEG 胁迫浓度呈显著正相关关系,其临界值和极限值分别为 36.45% 和 55.72%。

2.3 PEG 胁迫对栓皮栎种子保护酶活性的影响

保护酶系统包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等。萌发的栓皮栎种子 3 种保护酶活性对 PEG 模拟干旱胁迫的响应不尽相同(图 5)。其中,随 PEG 胁迫浓度的升高,栓皮栎种子 SOD 活性先降低后升高再降低(图 5,A)。5% PEG 胁迫下 SOD 活性下降到最低,为对照的 99.11%;10% PEG 浓度下 SOD 活性有所升高,升至对照的 1.02 倍,且与对照差异显著;20%~30% PEG 胁迫下 SOD 活性下降,但与对照无显著差异。同时,随着 PEG 浓度的升高,栓皮栎种子 POD 活性呈现不断升高的趋势。30% 浓度下升至最高,为对照的 6.35 倍,且与对照差异显著(图 5,B)。另外,在不同 PEG 浓度胁迫下,栓皮栎种子 CAT 活性均高于对照,且在低浓度(5%)下达到最大值,为对照的 2.00 倍(图 5,C)。由此可见,在 PEG 模拟水分胁迫条件下,栓皮栎种子可以通过增加体内保护酶活性来提高抵抗干旱环境的能力。

2.4 PEG 胁迫对栓皮栎种子有机渗透调节物质含量的影响

栓皮栎种子 3 种有机渗透调节物质含量对干旱

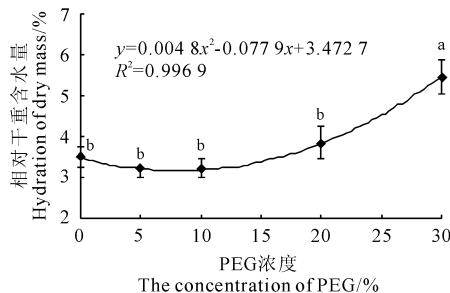


图 4 不同浓度 PEG 胁迫下栓皮栎种子相对干重含水量的变化

Fig. 4 The dry mass hydration of *Q. variabilis* under PEG stress

胁迫的响应特征不尽相同(图 6)。其中,可溶性蛋

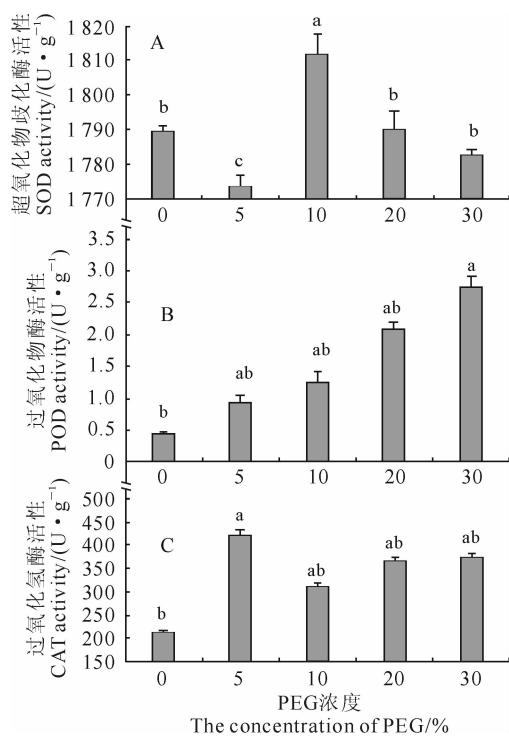


图 5 不同浓度 PEG 胁迫下栓皮栎种子 SOD、POD 和 CAT 活性的变化

Fig. 5 The seed SOD, POD and CAT activities of *Q. variabilis* under PEG stress

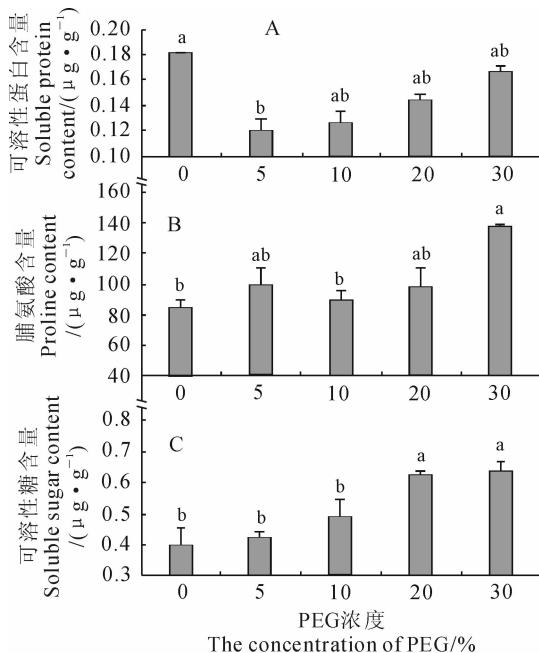


图 6 不同浓度 PEG 胁迫下栓皮栎种子可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的变化

Fig. 6 The seed soluble protein, soluble sugar and proline contents of *Q. variabilis* under PEG stress

白含量在不同 PEG 胁迫下呈现先下降后升高的趋势,并在 5% PEG 浓度时下降到最低,为对照的 66.29% ($P<0.05$);之后有所上升,但均低于对照,且与对照无显著差异(图 6,A)。脯氨酸含量在不同 PEG 胁迫度下均高于对照,且在 30% PEG 胁迫下达到最大值,为对照的 1.63 倍,且与对照差异显著 ($P<0.05$)(图 6,B)。可溶性糖含量在不同浓度胁迫下持续上升,且在 30% PEG 浓度下达到最大值,比对照显著增加 58.55%(图 6,C)。以上结果说明在 PEG 胁迫下栓皮栎种子可以通过增加自身渗透调节物质的含量来增强其抵御干旱环境的能力。

3 讨 论

本研究发现,低浓度 PEG 对栓皮栎种子萌发具有显著促进作用,表现为发芽率提高、发芽整齐度增加、发芽速度加快,而高浓度则有抑制作用。在 5% 和 10% PEG 胁迫下,栓皮栎种子的发芽率、发芽指数和活力指数均高于对照,而在 20% 和 30% 胁迫下均低于对照,这与姚晓华等^[12]对青稞种子、麦苗苗等^[26]对连香树种子的研究结果一致。而且有大量的研究表明,聚乙二醇处理对促进种子萌发和出苗,提高种子活力和抗逆性有一定的作用^[27-28],因此可通过一定浓度的 PEG 处理来提高栓皮栎种子的发芽率,促进林业生产。

根系是植物吸收水分、养分及合成多种生理活性物质的重要器官,根系的生长发育状况直接影响着其生长与产量的形成。在低浓度(5% 和 10%) PEG 胁迫下,本研究的栓皮栎种子的胚根长和胚根生长速率均高于对照,可能适度的胁迫可以使同化物更多地向根系分配,促使根系的分枝和下扎^[29]。说明低浓度 PEG 模拟干旱胁迫有助于栓皮栎种子胚根生长,而在高浓度(20% 和 30%) 下胚根生长和生长速率受到抑制。相对含水量能有效鉴别植物的抗旱能力,一般认为能在干旱胁迫下维持较高相对含水量的品种抗旱性较强^[30]。本研究中,栓皮栎种子的相对干重含水量随干旱胁迫强度的提高呈抛物线型升高,能在较高 PEG 胁迫下使栓皮栎幼苗维持较高的相对含水量,表现出一定的抗旱性。同时,根据耐旱临界值的比较分析可以发现,胚根生长对盐胁迫最为敏感,其次为生长速率,萌发率最不敏感。由于胚根生长受到最为强烈的抑制,因此,由胚根生长速率得到的耐旱临界值(最小耐旱临界值)最能反

映种子萌发期的耐旱性,其最小临界值为 30.1%。

植物在水分胁迫下,活性氧自由基的生产能力增强,酶促活性氧自由基清除系统开启。本研究中,栓皮栎种子 3 种保护酶(SOD、POD、CAT)活性在 PEG 胁迫下响应不同,随 PEG 浓度的升高,SOD 活性先下降,可能是 5% PEG 预处理受伤害程度低不足以激发 SOD 保护机制,导致 O_2^- 产生而消耗了一部分 SOD^[31],这有待于进一步研究,之后 SOD 活性显著升高以清除过量的自由基,30% PEG 浓度下栓皮栎受到伤害导致 SOD 活性下降;POD 活性不断升高,CAT 活性表现则与 SOD 相反。可见,栓皮栎种子具有较高活性的膜保护酶系统,在较低浓度(5%、10%) 干旱胁迫下,其幼苗主要靠 3 种保护酶协同作用,共同清除自由基,而在较高浓度(20%、30%) 胁迫下,则主要靠提高 POD 和 CAT 活性来抵御干旱环境。

水分胁迫时植物体内积累各种有机物质以提高细胞液浓度,渗透势下降,使植物生理过程正常进行^[32]。渗透调节在植物抗旱中起着至关重要的作用,而可溶性蛋白、可溶性糖及脯氨酸的含量在渗透调节中起着重要的作用。本研究中,栓皮栎种子中可溶性蛋白含量先下降可能是干旱胁迫使蛋白质合成酶钝化或能源(ATP)减少,之后开始上升以提高体内渗透势。脯氨酸增加能降低渗透势,缓解胁迫对植物细胞的伤害,起到维持细胞渗透平衡的作用^[33]。本研究中,栓皮栎种子中脯氨酸含量先升高后下降再升高,这与程嘉翎等^[34]对桑树种子萌发和生理特性的研究一致。可溶性糖含量随胁迫浓度增加而不断升高,可以降低植物体内的渗透势,有利于植物体在干旱逆境中维持体内正常所需的水分,提高植物的抗逆适应性。由此可见,在 PEG 渗透胁迫下,为了维持种子的正常萌发与生长,栓皮栎自身能够积累较多的有机渗透调节物质,来抵御干旱环境维持正常的生理代谢。

综上所述,本研究从多个指标综合分析了栓皮栎种子萌发期的抗旱性特征,具有可行性和可靠性。但由于该研究是在实验室控制其他环境因子的情况下单独对 PEG 胁迫进行的栓皮栎种子萌发期的研究,不能完全代表大田育苗的实际情况,因此还有待于进一步进行大田出苗期耐旱实验,使其在天津市干旱地区大面积推广种植。

参考文献:

- [1] LIU G L(刘公棣). Drought conditions in Tianjin area[J]. *Haihe Water Resources*(海河水利), 1994; 47.
- [2] BOYER J S. Plant productivity and environment[J]. *Science*, 1982, 218: 443—448.
- [3] WU M Z(吴明作). Research studys on *Quercus variabilis*[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*(陕西林业科技), 1998, (4): 65—69 (in Chinese).
- [4] ZHOU J Y(周建云), LIN J(林军), ZHANG W H(张文辉). Review and perspective on *Quercus variabilis* research[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报), 2010, 25(3): 43—49(in Chinese).
- [5] CUI Y CH(崔豫川), ZHANG W H(张文辉), WANG X F(王校锋). Physiological responses of *Quercus variabilis* seedlings to soil drought stress[J]. *Acta Bot. Boreali.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2013, 33(2): 364—370(in Chinese).
- [6] SUN J W(孙军伟), JI T H(冀天会), YANG Z G(杨子光), et al. Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2009, 25(3): 104—107(in Chinese).
- [7] CHEN X ZH(陈学珍), XIE H(谢皓), HAO D D(郝丹丹), et al. Drought resistance evaluation of 20 soybean at bud stage[J]. *Journal of Beijing Agricultural College*(北京农学院学报), 2005, 20(3): 56—57(in Chinese).
- [8] LI ZH(李震), YANG CH J(杨春杰), ZHANG X K(张学昆), et al. Evaluation of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination under PEG-6000 stress[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*(中国油料作物学报), 2008, 30(4): 438—442(in Chinese).
- [9] ZHANG J(张剑), CHI B L(池宝亮), HUANG X F(黄学芳). Drought resistance in corn at germination stage[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*(山西农业科学), 2007, 35(2): 34—38(in Chinese).
- [10] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版,2003.
- [11] WEI Y(魏媛), YU L F(喻理飞). Response of *Boussonetia papyrifera* seeds germination to watet stress[J]. *Guizhou Science*(贵州科学), 2004, 22(2): 57—60(in Chinese).
- [12] YAO X H(姚晓华), WU K L(吴昆仑). Effect of PEG pretreatment on germination and growth physiology of Hullless Barley[J]. *Acta Bot. Boreali.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2012, 32(7): 1 403—1 411(in Chinese).
- [13] BURLYN M, MERRILL R, KAUFMANN. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. *Plant Physiology*, 1973, 51: 914—916.
- [14] 国际种子检验协会(ISTA). 国际种子检验规程[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [15] 孙时轩.造林学[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [16] 郑光华.种子生理研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [17] AHMED D, KARIM B H, CLAUDE G S, et al. Alinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima*[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262(1): 179—189.
- [18] LI H(李宏), CHENG P(程平), ZHENG CH H(郑朝晖). Seeds germination of three common afforestating trees under salt and drought stress in Xinjiang[J]. *Acta Bot. Boreali.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2011, 31(7): 1 466—1 473(in Chinese).
- [19] CHEN Y Y(陈月艳), SUN G R(孙国荣), LI J X(李景信). Effects of sodium carbonate on germination of *Puccinellia tenuiflora* seeds [J]. *Heilongjiang Journal of Animal Science and Technology*(黑龙江畜牧科技), 1997, 30(1): 4—7(in Chinese).
- [20] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [21] 薛应龙.植物生理学实验手册[M].上海:上海科学技术出版社,1985.
- [22] 朱广廉,钟海文,张爱琴.植物生理学实验[M].北京:北京大学出版社,1990.
- [23] 王晶英,敖红,张杰.植物生理生化实验技术与原理[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2003; 135—136.
- [24] WANG J J(王娟娟), ZHANG W H(张文辉), LIU X CH(刘新成). Effects of seed germination in three different treatments' *Atriplex canescens* under NaCl stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2010, 19(1): 104—111(in Chinese).
- [25] XU X M(徐秀梅), ZHANG X H(张新华). Research of *Atriplex canescens* seed germination ecology[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*(宁夏农林科技), 2002, (6): 19—20(in Chinese).
- [26] MAI M M(麦苗苗), SHI D X(石大兴), WANG M L(王米力), et al. Seed germination and seedling growth of *Cercidiphyllum japonicum* with PEG treatment[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2009, 45(10): 96—98(in Chinese).
- [27] ZHENG H B(郑淮兵), DONG L(董丽), ZHENG C X(郑彩霞). Improving germination of *Photinia* seed by low temperature and PEG pretreatment[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2005, 41(3): 54—57(in Chinese).
- [28] AZARNIVAND H, SOURI M, ETEMAD V. Effect of water stress on seed germination of *Artemisia spicigera* *Artemisia fragrans*[J]. *Biaban*, 2007, 12: 17—21.
- [29] WANG W F(王文帆), LIANG S Y(梁素钰), LIU B F(刘滨凡), et al. Effect of polyethyleneglycol(PEG) on seedling growth and seed germination of *Echinochloa crusgalli*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2010, 26(12): 122—125(in Chinese).
- [30] SCHONFELD M A, JOHNSON R C, CARVER B F, et al. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators[J]. *Crop Science*, 1988, 28(3): 526—531.
- [31] 胡国霞. PEG 预处理对水分胁迫下水稻抗氧化系统的影响[D].沈阳:沈阳师范大学,2011.
- [32] TANG ZH CH(汤章城). Responses and adaptation of plants to water stress[J]. *Plant Physiology Communications*(植物生理学通讯), 1983, (4): 1—7(in Chinese).
- [33] SUN J Y(孙金月), ZHAO Y T(赵玉田), CHANG R ZH(常汝镇), et al. Study on the protective function and mechanism of cell wall glycoproteins in salt tolerance of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*(中国农业科学), 1997, 30(4): 9—15(in Chinese).
- [34] CHENG J L(程嘉翎), DUAN J L(段建丽), WANG N(王娜). Effects of polyethylene glycol(PEG) simulated drought stress on Mulberry seed germination and physiology[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*(安徽农业科学), 2006, 34(24): 6 420—6 422(in Chinese).