

干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片渗透调节物质含量及保护酶活性的影响

陈丽培,刘瑞霞,杨玉珍,王国霞,雒红宇
(郑州师范学院 生命科学学院,河南 郑州 450044)

摘要:以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)与皂荚(*Gleditsia sinensis*)的1年生苗为材料,通过盆栽控水试验,研究干旱胁迫对2种苗木叶片中渗透调节物质含量、丙二醛(MDA)含量及保护酶活性的影响。结果表明:随着干旱胁迫强度的增大,2种苗木叶片的脯氨酸(Pro)含量、可溶性糖含量比正常水分时升高,相同水分梯度下刺槐Pro、可溶性糖含量升高幅度较大;皂荚叶片中可溶性蛋白含量增加,刺槐叶片中可溶性蛋白含量降低;MDA含量随水分胁迫程度的加剧均表现出升高趋势,且皂荚在相同水分梯度下增幅较大;超氧化物歧化酶(SOD)活性增加,但刺槐增加幅度大于皂荚;皂荚叶片中过氧化物酶(POD)活性增加、过氧化氢酶(CAT)活性降低,而刺槐叶片中CAT活性增加、POD活性降低。可知,2种苗木通过渗透调节物质的积累、抗氧化酶活性的升高来增强对干旱胁迫的适应性。总体来看,刺槐耐干旱能力大于皂荚。

关键词: 皂荚; 刺槐; 干旱胁迫; 渗透调节物质; 保护酶活性

中图分类号: S792.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2017)10-0122-06

Effects of Drought Stress on Osmotic Adjustment Substances Content and Activity of Protect Enzymes in the Leaves of *Robinia pseudoacacia* and *Gleditsia sinensis*

CHEN Lipei, LIU Ruixia, YANG Yuzhen, WANG Guoxia, LUO Hongyu
(School of Life Sciences, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: This paper studied the effects of drought stress on the content of osmotic adjustment substances, MDA and protective enzyme activity in the leaves of one-year-old *Gleditsia sinensis* and *Robinia pseudoacacia* through the experiment of controlling water by potted planting. The results indicated that with the aggravation of drought stress, the content of Pro and soluble sugar in the leaves of the two seedlings were higher than that of normal water, *Robinia pseudoacacia* had greater increasing amplitude under the same water gradient. The content of soluble protein in the leaves of *Gleditsia sinensis* increased, but in the leaves of *Robinia pseudoacacia* decreased. The content of MDA increased with the aggravation of water stress, but *Gleditsia sinensis* increased significantly under the same water gradient. The activity of SOD increased, however the increasing amplitude of *Robinia pseudoacacia* > *Gleditsia sinensis*. POD activity increased and CAT activity decreased in leaves of *Gleditsia sinensis*, while the *Robinia pseudoacacia* leaves were just the opposite. The results showed that the two seedlings enhanced the adaptability of drought stress through the accumulation of osmotic adjustment substance and the increase of antioxidant enzyme activity. Overall, the tolerance to drought of *Robinia pseudoacacia* > *Gleditsia sinensis*.

Key words: *Gleditsia sinensis*; *Robinia pseudoacacia*; drought stress; osmotic adjustment substances; protective enzyme activity

收稿日期:2017-05-20
基金项目:河南省高等学校重点科研项目计划(16A180054)
作者简介:陈丽培(1981-),女,河南郑州人,讲师,硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:chenlp0524@126.com
* 通讯作者:杨玉珍(1965-),女,河南郑州人,教授,博士,主要从事森林培育研究。E-mail:yzyang@163.com

水分是植物的重要组成部分,也是影响植物生长发育的重要因子之一^[1]。水分亏缺时,植物会自动开启保护酶体系及渗透调节功能来适应逆境。目前,我国对植物干旱胁迫的生理响应研究较多,主要针对水分不足时渗透调节物质及保护酶活性的变化。陈吉虎等^[2]通过研究干旱胁迫下 5 个树种苗木抗氧化酶活性的变化,确定它们的抗旱能力。项忠阳^[3]通过测定水分胁迫下刺槐和紫穗槐相对含水量、水分饱和亏缺、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化,揭示出紫穗槐的抗旱性强于刺槐。徐莲珍等^[4]研究 3 种苗木叶片在遭受干旱胁迫时渗透调节物质含量、保护酶活性的变化,探讨了生理指标与其抗旱性的关系。皂荚与刺槐同为豆科(Leguminosae)落叶乔木,为具有多种用途的生态经济林树木。它们根系发达,具有较强繁殖能力和耐干旱能力,为防护林及行道树的主要树种。在现有抗旱机制研究基础上,采用盆栽试验,以郑州市 1 年生皂荚与刺槐苗为供试材料,探讨干旱胁迫条件下其叶片渗透调节物质含量及抗氧化酶活性等的变化,为 2 种苗木的栽培和推广,以及北方干旱地区选取优良抗旱树种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料 with 处理

以皂荚(*Gleditsia sinensis*)、刺槐(*Robinia pseud-acacia*) 2 个树种 1 年生苗为试验材料。2016 年 3 月初将苗木移栽到外口直径 48 cm、内口直径 42 cm、高 33 cm、底部直径 27 cm 的塑料盆中,花盆土壤为营养土和校园苗圃表土 1:1 的混合土。将花盆放在防雨棚中遮雨并进行正常水管理。2016 年 5 月 4 日选取长势基本一致的苗木进行试验。试验前通过称质量的方法设定 4 个水分梯度,土壤含水量分别为 75%~80% (正常供水)、55%~60% (轻度胁迫)、40%~45% (中度胁迫)、30%~35% (重度胁迫)。每天 18:00 左右补充蒸发掉的水量,使土壤水分一直稳定在设定的范围内。控水处理 21 d 时,于 6:00—7:00 选取完整、无病虫害叶片,测定 Pro、可溶性蛋白、可溶性糖、MDA 含量及 SOD、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。测量时每个水分梯度的 2 种苗木随机各选取 8 株,进行 3 次重复。

1.2 测定指标及方法

Pro 含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量测定分别采用酸性茚三酮显色法^[5]、考马斯亮蓝 G-250

法^[6]、萘酮比色法^[7];MDA 含量测定采用 TBA 比色法^[8];SOD 活性、POD 活性、CAT 活性测定分别采用氮蓝四唑(NBT)比色法^[8]、愈创木酚显色法^[5]和紫外吸收法^[6]。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 2 种苗木叶片渗透调节物质的影响

2.1.1 Pro Pro 作为植物细胞内主要渗透调节物质,干旱条件下可以降低细胞渗透势,增强从周边环境吸水能力,提高植物抗旱性^[9]。由图 1 可知,2 种苗木叶片 Pro 含量随着干旱胁迫程度的加剧均呈升高趋势。水分轻度胁迫时,刺槐、皂荚 Pro 含量为 170.68、108.12 $\mu\text{g/g}$, 分别比正常水分升高了 69.60%、38.97%。水分中度胁迫时,皂荚 Pro 含量达到最大值(209.80 $\mu\text{g/g}$),比正常水分增加了 169.67%,之后缓慢降低,重度胁迫时 Pro 含量为 198.60 $\mu\text{g/g}$,仍比正常水分升高 155.27%。刺槐 Pro 含量中度胁迫时为 334.03 $\mu\text{g/g}$,比正常水分增加了 233.41%,之后缓慢上升,重度胁迫时达到最高值(343.9 $\mu\text{g/g}$),比正常水分增加了 241.75%。刺槐、皂荚由轻度胁迫至中度胁迫时增加的 Pro 含量为正常水分时的 162.34%、130.60%。可见,2 种苗木在水分亏缺时的 Pro 含量积累顺序为中度胁迫>轻度胁迫。重度胁迫时,Pro 合成受到抑制,变化不明显。另外,在相同水分梯度下,刺槐 Pro 含量升高幅度大于皂荚,刺槐 Pro 在干旱条件下渗透调节能力更强。

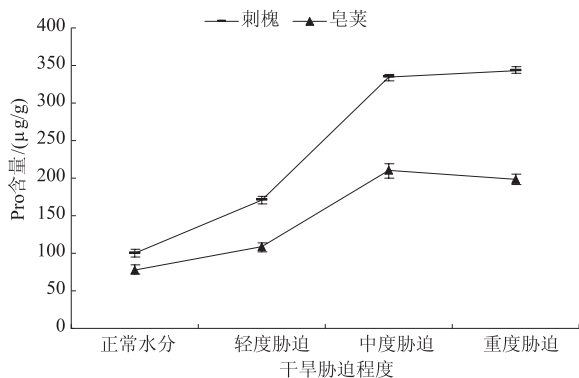


图 1 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片 Pro 含量的影响

2.1.2 可溶性糖 可溶性糖主要包括葡萄糖、蔗糖、海藻糖等,它们不仅为植物的生长代谢提供物质和能量,还在苗木抵抗干旱时起着重要的调节作用。在干旱胁迫下,2 种苗木叶片可溶性糖的含量均高于正常供水情况,且都表现出先升高再降低的趋势(图 2)。刺槐、皂荚轻度胁迫时可溶性糖含量分别

为 71.74、58.28 mg/g,比正常水分时升高了 70.24%、52.85%。随着胁迫程度加剧,2 种苗木的可溶性糖含量在中度胁迫时均达到峰值 87.15 mg/g 和 66.83 mg/g,比正常水分时增加了 106.81%、75.27%。重度胁迫时刺槐、皂荚可溶性糖含量下降为 79.36、53.96 mg/g,仍比正常水分时升高 88.32%、41.52%。刺槐、皂荚由轻度胁迫至中度胁迫时增加的可溶性糖含量为正常水分的 37.05%、22.42%。由此可知,2 种苗木干旱胁迫时可溶性糖含量在轻度胁迫时积累最多,这与 Pro 相反。相同的胁迫程度时,刺槐可溶性糖含量升高幅度明显大于皂荚,这与 Pro 相似。总的来说,可溶性糖作为渗透调节物质,其含量的增加,提高了刺槐、皂荚水分亏缺时的渗透调节能力。

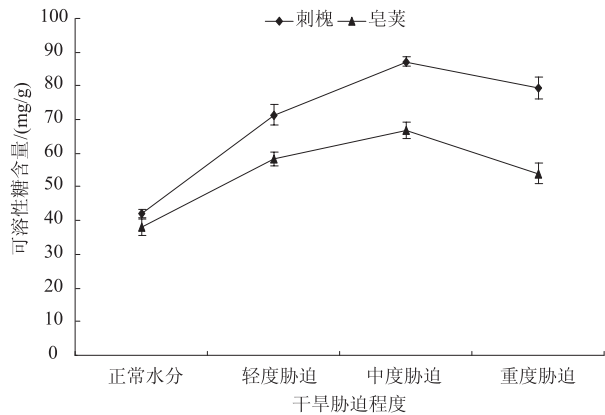


图 2 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片可溶性糖含量的影响

2.1.3 可溶性蛋白 可溶性蛋白是构成生命的基础物质^[10]。植物受到干旱胁迫时,可溶性蛋白含量的升高,有利于增加细胞渗透物质含量,稳定细胞体内渗透平衡,保护植物细胞不受伤害。图 3 表明,刺槐叶片的可溶性蛋白含量随土壤含水量的降低呈不同程度的下降趋势。水分轻度胁迫时,可溶性蛋白含量由 29.40 mg/g 降为 28.20 mg/g,变化较小。从中度胁迫开始,降幅增大,到重度胁迫时降为最低值。中度胁迫、重度胁迫时可溶性蛋白含量分别比正常水分时降低了 18.23%、44.86%。这可能是由于植物在水分胁迫时 mRNA 转录及翻译过程受到破坏^[11],新的蛋白质合成受抑制,同时原来蛋白质分解速度加快所致。皂荚叶片可溶性蛋白含量表现出升高的趋势。轻度胁迫时可溶性蛋白含量为 26.29 mg/g,比正常水分升高了 10.76%。由轻度胁迫至中度胁迫时增加的可溶性蛋白含量为正常水分时的 30.43%,而由中度胁迫至重度胁迫时增加的可溶性蛋白含量为正常水分时的 14.00%。由此得出,由轻度胁迫至中度胁迫时皂荚可溶性蛋白累

积量最多。皂荚叶片可溶性蛋白含量的升高,提高了皂荚叶片的保水力。

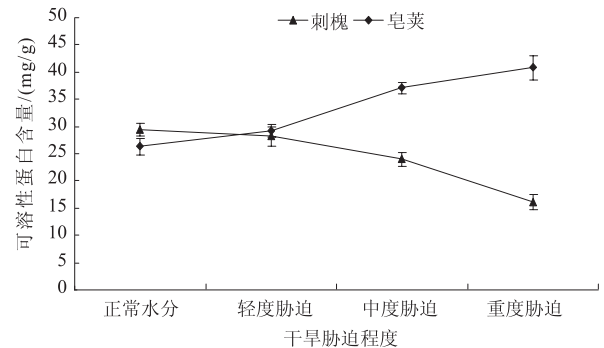


图 3 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片可溶性蛋白含量的影响

2.2 干旱胁迫对 2 种苗木叶片保护酶活性的影响

2.2.1 SOD SOD 为自由基清除剂,广泛存在植物体中,能清除干旱胁迫下产生的有害物质,减轻活性氧对细胞膜脂的伤害,保证植物各种代谢活动的正常进行^[12]。从干旱胁迫下 2 种苗木叶片 SOD 活性测定结果(图 4)可看出,干旱胁迫下,刺槐和皂荚幼苗叶片 SOD 活性均高于正常水分时活性,且均表现出先升高再降低的趋势。轻度胁迫时 2 种苗木 SOD 活性分别为 980.46、607.03 U/(g·h),分别比正常水分时升高了 74.20%、50.70%。中度胁迫时 SOD 活性变化较小,缓慢上升为 1 080.08、608.56 U/(g·h),增加的 SOD 活性分别为正常水分时的 17.70%、0.38%。重度胁迫下,刺槐和皂荚 SOD 活性迅速下降,重度胁迫时降低的 SOD 活性为正常水分时的 38.61%、47.55%。可知,在一定干旱范围内植物会主动产生 SOD,有效地清除活性氧,对细胞起保护作用。但超过一定范围时,SOD 活性下降。另外,虽然 2 种苗木 SOD 活性变化趋势一致,但变化幅度却有差异。在轻度胁迫时,SOD 活性升高幅度为刺槐大于皂荚,重度胁迫时刺槐 SOD 活性降低幅度小于皂荚,重度胁迫两者变化都不明显。总的来说,干旱胁迫下刺槐 SOD 活性强于皂荚。

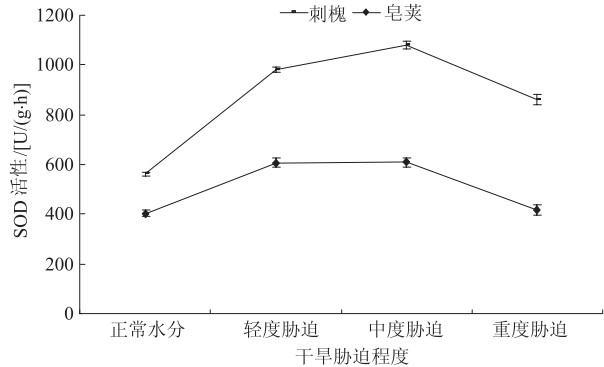


图 4 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片 SOD 活性的影响

2.2.2 POD POD 是一种活性较高的酶,干旱条件

下,植物体内 POD 活性的升高有利于提高细胞的抗氧化能力。水分胁迫下,刺槐叶片 POD 活性呈不同程度下降趋势(图 5)。其中,轻度胁迫时,POD 活性下降较小,由 881.16 U/(g·min)降低为 868.58 U/(g·min),降低了 1.43%。从中度胁迫开始下降明显,中度胁迫、重度胁迫时 POD 活性分别比正常水分降低了 14.17%、40.48%。皂荚叶片 POD 活性表现出先升高再降低的趋势,但是干旱胁迫下的 POD 活性始终高于正常水分时活性。轻度胁迫时,POD 活性由 917.43 U/(g·min)升高为 1 018.70 U/(g·min),升高了 11.04%,之后迅速升高,中度胁迫时达到最大值 1 385.28 U/(g·min),比正常水分时升高了 51.00%。中度胁迫增加的 POD 活性为正常水分的 39.96%。重度胁迫时 POD 活性有所下降,但仍比正常水分时增加了 32.10%。表明 POD 在皂荚叶片中发挥着重要保护作用。水分亏缺时,POD 活性增加幅度顺序为中度胁迫大于轻度胁迫。

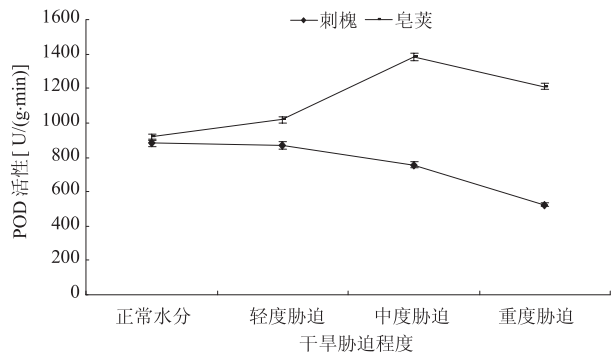


图 5 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片 POD 活性的影响

2.2.3 CAT CAT 作为一种末端氧化酶,在干旱胁迫时和 POD 作用一致,催化植物细胞中的 H₂O₂ 使其分解,保护细胞免受高含量 H₂O₂ 的伤害。图 6 表明,随着干旱胁迫程度的加剧,刺槐、皂荚叶片 CAT 活性均呈先升高再降低的趋势。其中,刺槐叶片在轻度胁迫时,CAT 活性增加了 25.73%,之后迅速升高,中度胁迫时达到峰值[646.23 U/(g·min)],比正常水分时升高了 67.90%。中度胁迫 CAT 活性增加量为正常水分时的 42.13%。重度胁迫时,CAT 活性降低为 596.06 U/(g·min),仍比正常水分时增加了 54.86%。皂荚 CAT 活性在轻度胁迫时最高[262.92 U/(g·min)],比正常水分升高了 1.88%。之后呈不同程度下降趋势。重度胁迫时降为最低值 206.57 U/(g·min),比正常水分降低了 19.96%。皂荚叶片 CAT 活性在干旱情况下变化较小,基本保持在 206.57~262.92 U/(g·min)。刺槐叶片 CAT

活性变化趋势明显,干旱条件下,CAT 活性增加幅度顺序为中度胁迫>轻度胁迫,这与皂荚叶片 POD 活性变化一致。虽然刺槐 CAT 活性在重度胁迫时下降,但仍然高于正常水分活性。可见,刺槐叶片 CAT 在干旱条件下起着重要的抗氧化作用。

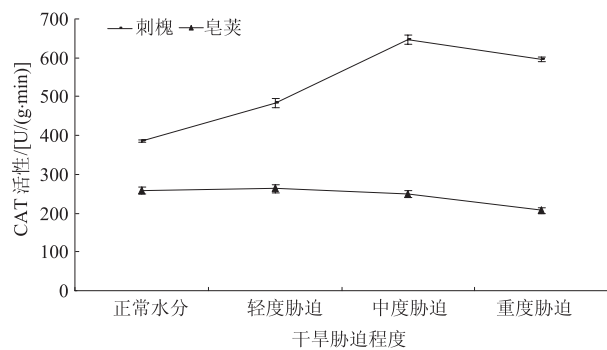


图 6 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片 CAT 活性的影响

2.3 干旱胁迫对 2 种苗木叶片 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化产物之一,对细胞膜破坏性很强^[13]。干旱胁迫时,MDA 含量的变化可作为反映植物受胁迫严重程度的重要指标。由图 7 可知,随着干旱胁迫程度的加剧,2 种苗木叶片 MDA 含量均表现出上升的趋势,但变化幅度有所差异。刺槐、皂荚在轻度胁迫时 MDA 含量分别为 7.64、10.96 nmol/g,比正常水分时升高了 6.11%、11.04%。从中度胁迫起 MDA 含量升高幅度变大,2 种苗木中度胁迫时增加的 MDA 含量为正常水分的 17.08%、30.40%。重度胁迫时刺槐、皂荚苗木 MDA 含量均达到最大值 11.06、19.20 nmol/g,增加的 MDA 含量为正常水分的 30.42%、53.00%。可见,在干旱条件下 2 种苗木 MDA 含量的增幅顺序为重度胁迫>中度胁迫>轻度胁迫,这与 SOD 活性增幅顺序相反(图 4)。另外,在相同水分梯度时,皂荚苗木 MDA 含量升高幅度大于刺槐,皂荚膜脂过氧化程度强于刺槐。

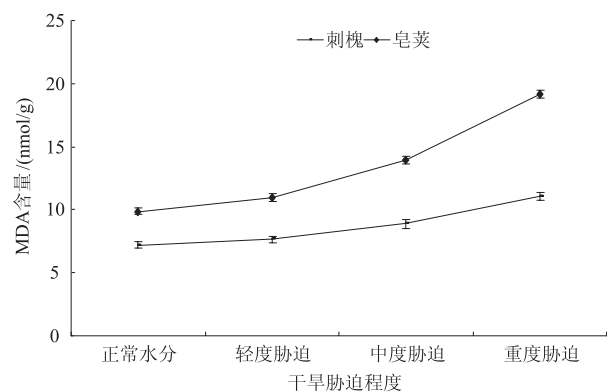


图 7 干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片 MDA 含量的影响

3 结论与讨论

渗透调节是植物长期进化的一种干旱适应机制。植物遭受水分胁迫时,通过主动产生一些渗透调节物质来降低渗透势,增强植物的抗干旱能力。Pro、可溶性糖、可溶性蛋白作为干旱胁迫的渗透调节物质,其含量是衡量植物抗旱性的重要生理指标。关于干旱胁迫对渗透调节物质的影响研究较多,一般认为,植物缺水时,Pro、可溶性糖、可溶性蛋白含量均表现一定程度的升高,从而增加植物的干旱适应性。王海珍等^[14]研究干旱胁迫对灰胡杨(*Populus pruinosa* Schrenk)和胡杨(*Populus euphratica* Oliv)幼苗渗透调节物质影响时发现,干旱胁迫下灰胡杨、胡杨幼苗通过渗透调节物质的积累来抵御水分胁迫;李燕等^[15]认为,皂角幼苗表现出一定的抗旱性,可能与渗透调节物质含量的升高有关;李州等^[16]、刘晓东等^[17]研究发现,白三叶(*Trifolium repens*)、玉带草(*Phalaris arundinacea* var. *picta*)叶片随着水分胁迫程度的加剧,叶片内游离 Pro 含量呈升高趋势,从而使叶片保持相对较高的渗透调节能力,以保证水分的合理利用;包卓等^[18]对 5 种园林绿化植物研究表明,干旱胁迫下,具有较强抗旱能力的蛇莓(*Duchesnea indica*)和蛇莓委陵菜(*Potentilla centigrana*)叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量增加。本研究中,刺槐、皂荚在土壤含水量降低过程中,叶片 Pro 含量表现出升高的趋势。可溶性糖含量随着干旱胁迫程度的增强均呈先升高再降低的趋势。重度胁迫后 2 种苗木可溶性糖含量有所下降,但仍比正常水分升高了 88.32%、41.52%。说明 Pro 和可溶性糖在刺槐、皂荚干旱时均具有较强的调节作用。但是水分亏缺时不同植物对 Pro 和可溶性糖的敏感程度不同。由试验结果可知,在相同干旱梯度下,刺槐的 Pro、可溶性糖含量升高幅度均大于皂荚,可见干旱胁迫对 Pro、可溶性糖含量的影响顺序为刺槐大于皂荚。另外,2 种苗木在水分不足时 Pro 大量积累发生在中度胁迫,而可溶性糖在轻度胁迫时大量积累。可以得出,可溶性糖积累早于 Pro,可溶性糖对于干旱胁迫的敏感度大于 Pro。可溶性蛋白作为植物正常情况下催化各种生理生化过程的酶类,在干旱情况下参与植物的渗透调节。本研究中,刺槐可溶性蛋白含量在干旱情况下逐渐降低,重度胁迫降为最低值,显著低于正常水分。皂荚叶片可溶性蛋白含量变化趋势刚好相反,随土壤含水量的降低而升高。说明不同树种遭受干旱胁迫时参与渗透调

节的物质不同,可溶性蛋白是皂荚叶片的渗透调节物质之一。有学者发现,干旱胁迫时可溶性蛋白含量的升高与植物合成新的蛋白质有关^[12]。孙国荣等^[19]也认为,干旱胁迫下可溶性蛋白含量变化常常伴随其组分的变化。本研究中皂荚苗木蛋白质含量的增加是否与合成新的逆境蛋白质有关,尚需进一步研究。总的来说,因刺槐、皂荚树种的差异,Pro、可溶性糖、可溶性蛋白等参与渗透调节的物质、调节强度存在差别。2 种苗木叶片中主要渗透调节物质 Pro、可溶性糖的调节能力顺序为刺槐大于皂荚。

SOD、POD、CAT 是植物细胞抗氧化系统的主要酶类。SOD 将干旱胁迫下产生的 $O_2\cdot$ 清除形成 H_2O_2 ,POD 和 CAT 再将 H_2O_2 变为 H_2O ,以保护植物细胞膜不受损伤。一般情况下,植物在水分胁迫时保护酶活性的升高可以有效清除活性氧,增强植物的干旱胁迫耐受能力^[20]。本研究中,随着干旱胁迫程度的加剧,2 种苗木叶片 SOD 活性呈现先升后降的趋势。刺槐、皂荚叶片的 SOD 活性均在中度胁迫时达到最大值 [$1\ 080.08$ 、 $608.56\ U/(g\cdot h)$],之后有所降低,但仍高于正常水分时活性。另外,刺槐 SOD 活性在同一水分梯度下升高幅度大于皂荚,降低幅度小于皂荚,且干旱条件下,刺槐 SOD 活性整体高于皂荚,说明刺槐 SOD 抗氧化能力强于皂荚。皂荚 POD 活性呈现先升高再降低的趋势,在中度胁迫时达到最大值 [$1\ 385.28\ U/(g\cdot min)$]。刺槐 POD 活性表现出下降趋势,在重度胁迫时比正常水分下降了 40.48%。说明 POD 在刺槐叶片中作用不明显,在皂荚叶片中起着重要保护作用。2 种苗木叶片 CAT 活性均呈先升高后降低的趋势。皂荚 CAT 活性在轻度胁迫时仅升高了 1.88%,重度胁迫时降至最低,比正常水分降低了 19.96%。刺槐 CAT 活性和皂荚 POD 活性变化趋势一致,与 2 种苗木 SOD 活性变化呈正相关。可知,CAT 是刺槐干旱胁迫时的重要抗氧化酶。总的来说,刺槐在水分亏缺时主要依靠 SOD 和 CAT 的协调作用减轻细胞膜的伤害,而皂荚则主要靠 SOD 和 POD 协同作用清除活性氧。说明不同植物在干旱胁迫时产生的抗氧化酶种类也不同。另外,在同一水分梯度下,刺槐 CAT 活性升高幅度大于皂荚 POD 活性,而刺槐 SOD 抗氧化能力强于皂荚,可以得出,干旱胁迫下刺槐的抗氧化能力大于皂荚。

植物在干旱条件下会发生细胞膜过氧化作用而受到损伤,MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,其含量的升高,使细胞膜透性增加,影响细胞的正常代谢过程^[13]。本研究中,随着土壤含水量的降低,

2 种苗木叶片的 MDA 含量持续上升,且重度胁迫时增幅最大,轻度胁迫增幅最小。这可能是由于重度胁迫时 SOD 活性较低,清除活性氧能力弱,MDA 含量升高较多。反之,轻度胁迫时 SOD 活性大幅度升高,有效清除了细胞中的自由基,使细胞膜脂过氧化程度降低,MDA 含量增加较少。SOD 活性与 MDA 含量呈一定负相关性。另外,在相同水分梯度下,皂荚 MDA 含量升高幅度大于刺槐。说明干旱条件下皂荚细胞膜受损程度大于刺槐,刺槐叶片的抗氧化能力强于皂荚。

本研究对 2 种苗木的渗透调节物质、保护酶活性进行了初步探讨,仅这些方面来说,刺槐苗木叶片的耐旱性大于皂荚。但是影响植物耐旱性的指标是多方面的,其复杂的机制尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙映波,尤毅,朱根发,等. 干旱胁迫对文心兰抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(11):1675-1680.
- [2] 陈吉虎,余新晓,孙明高,等. 北方旱区不同树种抗氧化酶活性变化及与抗旱性的关系[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(5):120-124.
- [3] 项忠阳. 刺槐和紫穗槐抗旱性比较试验[J]. 防护林科技,2014(4):25-27.
- [4] 徐莲珍,蔡靖,姜在民,等. 水分胁迫对 3 种苗木叶片渗透调节物质与保护酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):12-16.
- [5] 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,2001.
- [6] 高俊凤. 植物生理学试验技术[M]. 西安:世界图书出版社,2000:137-202.
- [7] 西北农业大学植物生理生化教研室. 植物生理实验指导[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1987:51-55.
- [8] 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 邹原东,韩振芹,陈秀新,等. 干旱胁迫对蓝羊草渗透调节物质和抗氧化酶活性的影响[J]. 北方园艺,2013(23):71-75.
- [10] 茹广欣,郝绍菊,茹桃勤,等. 干旱梯度下刺槐无性系生理指标的变化与品种抗旱性关系的研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2006,34(1):37-40.
- [11] 史玉炜,王燕凌,李文兵,等. 水分胁迫对刚毛怪柳可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量变化的影响[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(2):5-8.
- [12] 史胜青. 四种树种苗木抗旱机制的研究[D]. 保定:河北农业大学,2003.
- [13] 郭智涛. 四种刺篱植物的抗旱性研究[D]. 保定:河北农业大学,2014.
- [14] 王海珍,徐雅丽,张翠丽,等. 干旱胁迫对胡杨和灰胡杨幼苗渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(12):125-130.
- [15] 李燕,孙明高,孔艳菊,等. 皂角苗木对干旱胁迫的生理生化反应[J]. 华南农业大学学报,2006,27(3):66-69.
- [16] 李州,彭燕,苏星源,等. 不同叶型白三叶抗氧化保护及渗透调节生理对干旱胁迫的响应[J]. 草业学报,2013,22(2):257-263.
- [17] 刘晓东,李洋洋,何森,等. PEG 模拟干旱胁迫对玉带草生理特性的影响[J]. 草业学报,2012,29(5):687-693.
- [18] 包卓,孟祥英,张晓松,等. 干旱胁迫对 5 种园林绿化植物光合速率和渗透调节的影响[J]. 江苏农业科学,2010(3):225-227.
- [19] 孙国荣,张睿,姜丽芬,等. 干旱胁迫下白桦实生苗叶片的水分代谢与部分渗透调节物质的变化[J]. 植物研究,2001,21(3):413-415.
- [20] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002:415-419.