

PEG-6000 模拟干旱胁迫 对大蓟叶片生理特性的影响

邓辉茗, 龙聪颖, 蔡仕珍*, 苏明洁, 王小梅

(四川农业大学 风景园林学院, 成都 611130)

摘要:以大蓟幼苗为试验材料, 采用梯度浓度的聚乙二醇(PEG-6000, 浓度为 5%、10%、15%、20%、25%、30%) 模拟干旱胁迫 24 h、48 h 和 72 h, 测定大蓟叶片相对含水量(RWC)、丙二醛(MDA)含量、渗透调节物质含量及保护酶活性随胁迫时间的变化, 探讨大蓟的耐旱性和抗旱生理机制。结果表明: (1) 随干旱胁迫时间的延长和 PEG-6000 浓度增加, 叶片 RWC 均呈降低趋势, 最大降幅为 55.86%, MDA 含量均大幅度增加, 最大增幅为 186.21%。(2) 随干旱胁迫时间延长, 叶片可溶性糖与游离脯氨酸含量在 PEG-6000 浓度 $\leq 10\%$ 时逐渐升高, 在大于 10% 时呈先升高后降低的变化趋势; 而随 PEG 浓度增加, 可溶性糖与游离脯氨酸含量在各时间点均呈先上升后下降趋势, 可溶性糖峰值在处理 24 h、48 h 和 72 h 依次出现在 PEG 浓度为 20%、20% 和 10% 时, 游离脯氨酸峰值则依次出现在 PEG 浓度为 20%、15% 和 15% 条件下, 两指标的最大增幅均出现在胁迫处理 48 h 时 PEG 浓度分别为 20% 和 15%, 且分别为 CK 的 4.7 和 10.7 倍。(3) 随 PEG 浓度增加, 叶片保护性酶(SOD、POD 和 CAT)活性除 SOD 在 24 h 时呈逐渐升高趋势外, 其余时间点下均呈先升高后下降趋势, 3 种酶最大增幅依次为 370.14%、248.91% 和 118.78%, 前二者均出现在胁迫 72 h、15% PEG 浓度下, 后者出现在胁迫 48 h、10% PEG 浓度下。研究认为, 长时间(72 h)、15% PEG-6000 浓度胁迫下, 大蓟具有较强的渗透调节能力和较高的酶活性, 表现出较强的耐旱能力; 若超过此胁迫浓度, 大蓟渗透调节能力降低, 酶活性减弱, 含水量持续降低, MDA 持续增加, 生理代谢受到明显抑制。

关键词: 大蓟; PEG-6000 胁迫; 叶片相对含水量; 丙二醛; 渗透调节; 保护酶

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effects of Physiological Characteristics of *Cirsium japonicum* Leaves on Simulated Drought Stress by PEG-6000

DENG Huiming, LONG Congying, CAI Shizhen*, SU Mingjie, WANG Xiaomei

(College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Take the seedlings of *Cirsium japonicum* as test materials, we studied the influence of relative water content (RWC), malondialdehyde (MDA) content, osmotic regulation substance contents and protective enzyme activities of leaves with PEG-6000 gradient concentrations (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) under the stress time of 24 h, 48 h and 72 h to study the drought resistance and drought resistance mechanism preliminarily in the paper. The results showed that: (1) at stress of 24 h, 48 h and 72 h, with the extension of stress time and the increase of treatment concentration, the relative water content showed a trend of decrease with the sharpest drop of 55.86%, while the MDA content significantly increased with

收稿日期: 2016-12-28; 修改稿收到日期: 2017-04-10

基金项目: 四川农业大学双支计划项目(2016-0367)

作者简介: 邓辉茗(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物生理生态及栽培应用研究。E-mail: 578128443@qq.com

* 通信作者: 蔡仕珍, 高级实验师, 主要从事野生观赏植物驯化、栽培和应用研究。E-mail: 415455088@qq.com

the biggest increase of 186.21%. (2)With the extension of stress time, the soluble sugar and free proline contents of leaves increased under PEG-6000 $\leq 10\%$, while showed decrease trend after the first increase, and with the increase of treatment concentration the two indexes increased firstly and decreased afterward. The peak value of soluble sugar content appeared orderly at stress of 24 h, 48 h and 72 h on 20%, 20%, 10% of PEG-6000 concentration, and the free proline appeared orderly on 20%, 15%, 15% of PEG-6000 concentration. At the stress 48 h, the above two indexes get the maximum increased nearly 4.7 times and 10.7 times on 20% and 15% of PEG-6000 concentration respectively compared with CK. (3)Expect SOD activity increased at stress 24 h, the protective enzyme activities all showed a trend of increase firstly and then decreased. The maximum increase was 370.14%, 248.91% and 118.78% respectively for SOD, POD and CAT activities. SOD and POD both appeared on stress 72h, 15% of PEG-6000 concentration, while CAT appeared on 48 h, 10% of PEG-6000 concentration. Above all, the *C. japonicum* has a stronger osmotic adjustment ability and higher enzyme activity with 15% of PEG-6000 concentration on a long time (72 h) stress, which shows a strong ability to drought tolerance. If over the concentration, the osmotic adjustment ability would be down, the enzyme activity weaken, the relative water content continuously reduced and the MDA content continuously increased. The physiological metabolism of *C. japonicum* was restrained.

Key words: *Cirsium japonicum*; PEG-6000 stress; the relative water content of leaf; MDA; osmotic adjustment; protective enzyme

水分是限制植物生长发育的重要环境因子之一。中国约有 52.5% 的国土面积处于干旱、半干旱地区,在非干旱的地区,也常常受到旱灾的侵袭。近年来,干旱发生的频率和强度均有增加趋势,已经成为限制植物生长和影响生物多样性的主要逆境因素之一。干旱胁迫导致植物因水分亏缺而影响正常的生长^[1]和生理反应^[2-3]。研究表明,在遭受干旱逆境时,植物叶片相对含水量降低,体内新陈代谢因水分亏缺而发生紊乱,细胞内产生过量的自由基会引发或加剧膜脂过氧化作用而造成细胞膜系统的损伤^[4],植株生长速率受到显著抑制^[5]、叶面积减少、生物量降低^[6],甚至死亡。而植物往往通过气孔关闭、细胞代谢等方式缓解或者抵御干旱胁迫,适应水分逆境,例如通过积累渗透调节物质游离脯氨酸、可溶性糖等,增加细胞质浓度,降低水势,维持从外界吸水的能力,保持膨压^[7-8],并启动抗氧化酶系统对活性氧自由基进行清除,防止细胞膜脂受损,维持活性氧产生与清除之间的动态平衡^[4,9]。干旱胁迫下植物的生理反应和生长表现可以判断植物的抗旱性以及抗旱阈值。

大蓟(*Cirsium japonicum* Fisch. ex DC.)属菊科(Asteraceae)蓟属植物,分布于中国大部分地区,常生长在荒坡、路边等,是一种边坡植被自然修复的先锋植物。中国蓟属植物约有 50 余种,其中 10 余种可供入药,具有较高的药理价值,也可用于园林绿化,多作丛植或成片种植。大蓟适应性较强,生态范围较广,对土壤要求不严,在防风固土方面具有较强价值,部分地区已经开始人工栽培,但大多仍以野生

采集为主。目前,对大蓟的研究主要在化学成分^[10]和药用价值^[11-12]方面,其它仅见在种子特性萌发方面有零星报道^[13],而在大蓟抗逆性研究方面还未见报道。本试验讨论水分胁迫对大蓟幼苗生长及生理指标的影响,以明确大蓟的耐旱性和抗旱机理,为大蓟在干旱半干旱区域引种栽培和园林推广应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料与试剂

试验材料为大蓟种子,于 2015 年 5~6 月采于都江堰虹口山坡上,PEG-6000、Hoagland 营养液均购买于万科化学试剂中心。

1.2 试验设计

1.2.1 材料处理 选用颗粒饱满、大小均匀的健康种子播种。待长出幼苗以后,将其移栽至 30 cm×25 cm 的花盆里,每盆 1 株于室内培养,温度控制在 26~30 ℃,光照强度为 4 800~5 000 lx,相对湿度为 66%,每天光照 13 h,生长期间所有水肥管理一致。待播种苗生长 2 个月左右,将生长健康、生长状况较一致的幼苗移出花盆,用蒸馏水多次对其根系部分进行冲洗,直到洗净幼苗根系部分所有营养土和泥土,将洗净的幼苗放进 MS 营养液中进行为期 3 d 的恢复处理。

1.2.2 PEG-6000 模拟干旱胁迫处理 试验共设有 7 个干旱胁迫浓度梯度处理,分别为 0%(CK)、5%、10%、15%、20%、25%和 30%,CK 用蒸馏水代替 PEG 溶液,每个浓度梯度下设置 3 组重复,每组

重复 5 株幼苗。每隔 24 h 为一个处理周期。在干旱胁迫处理 24 h、48 h、72 h 后分别对大蓟幼苗进行生理指标的测定,共测定 3 次。

1.3 测定指标及方法^[14]

每天上午 9:00~10:00 取样,每个处理随机取叶片 5 g 左右,3 个重复。将洗净吸干表面水分的大蓟叶片分成两部分:一部分进行脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定,另一部分用锡箔纸将采取的鲜样包裹好用液氮处理后置于-80℃超低温冰箱中,用于叶片相对含水量、可溶性糖(Ss)含量的测定。

叶片相对含水量(RWC)采用烘干称重法测定;Pro、Ss 含量分别采用茚三酮比色法和蒽酮比色法测定;MDA 含量、SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性分别采用硫代巴比妥酸法、氮蓝四唑(NBT)光化学还原法、愈创木酚法和紫外吸收法进行测定。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010 软件进行实验数据的录入和数据库的建立以及数据图表的制作,采用 SPSS 22.0 进行二因素方差分析和显著性检测。

2 结果与分析

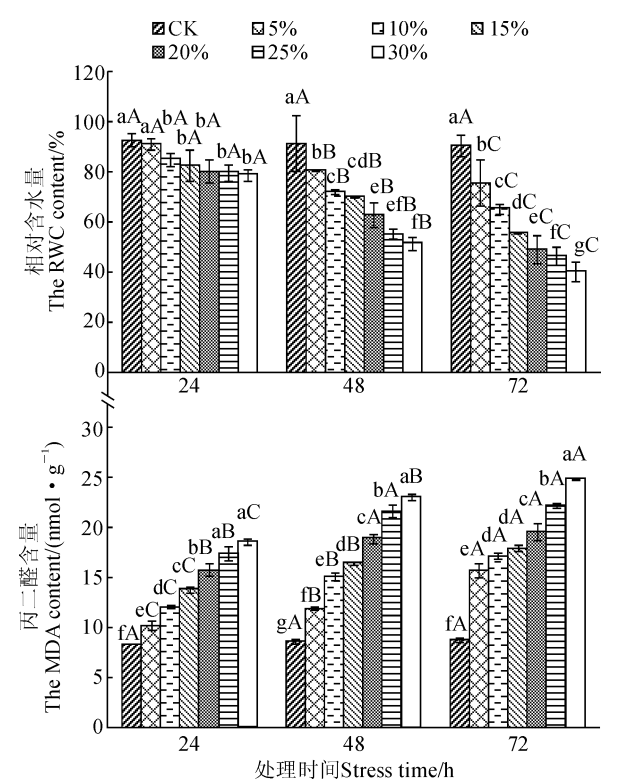
2.1 模拟干旱胁迫对大蓟叶片相对含水量及丙二醛含量的影响

叶片的相对含水量(RWC)可反映植物体在逆境环境下的水分亏缺程度,而丙二醛(MDA)是膜质过氧化的产物,其含量常作为脂质过氧化的重要指标。图 1 显示,随 PEG-6000 浓度的升高和胁迫时间的延长,大蓟叶片相对含水量均呈逐渐降低趋势,而其 MDA 含量则逐渐增加,且降低或者增加幅度随时间的延长而增加。其中,在胁迫 24 h 时,叶片相对含水量在 PEG-6000 浓度 $\geq 10\%$ 时就显著低于 CK($P < 0.05$),而在浓度 $10\% \sim 30\%$ 的处理之间差异不显著;在胁迫 48 h 和 72 h 时,各浓度处理的叶片相对含水量均显著低于 CK;当 30% PEG-6000 处理 24、48 和 72 h 时,叶片相对含水量分别比 CK 显著降低 14.99%、43.59%和 55.86%,且处理 72 h 时植株叶片已经萎蔫。同时,在模拟干旱胁迫 24、48 和 72 h 时,各 PEG-6000 浓度处理叶片内 MDA 含量均显著高于 CK;30%浓度处理的 MDA 含量在各时间节点均达最大值,其增幅分别为 122.89%、170.59%和 186.21%。表明干旱导致了大蓟叶片水分亏缺,叶片细胞产生了膜脂氧化,且干

旱胁迫越严重,持续时间越长,细胞膜脂氧化程度越剧烈,叶片伤害程度越大,甚至失水枯萎死亡。

2.2 模拟干旱胁迫对大蓟渗透调节物质含量的影响

可溶性糖和脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,在干旱胁迫条件下,渗透调节物质的积累有利于植物调节体内水分平衡,适应干旱环境。大蓟叶片中可溶性糖和脯氨酸含量随着 PEG-6000 浓度的升高均呈先升高后降低的趋势,而两者随处理时间延长的变化趋势不尽一致(图 2)。可溶性糖和脯氨酸含量在轻度干旱胁迫(PEG 浓度 = 10%)下随时间的延长而逐渐升高,而在中、重度干旱胁迫(PEG 浓度 $> 10\%$)下却随时间延长呈先升高后降低的变化趋势,且在各处理浓度和各时间节点下均显著高于



图中数据为平均值;不同小写字母表示同期不同浓度处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示相同 PEG 浓度各处理时间点间差异显著($P < 0.05$);下同

图 1 不同干旱胁迫处理下大蓟叶片含水量和丙二醛含量的变化

Data are means in the figure. Different normal letters within the same time indicate significant differences among PEG treatments at 0.05 level, while different capital letters within same PEG treatment indicate significant differences among stress time at 0.05 level. The same as below

Fig. 1 Changes of different drought stresses on leaf relative water content and MDA content of *Cirsium japonicum*

CK($P < 0.05$)。其中,叶片可溶性糖含量在处理 24 h 和 48 h 时均以 20% PEG 浓度最高,而在处理 72 h 时以 10% PEG 浓度最高,各峰值分别是同期 CK 的 3.1 倍、4.7 倍和 4.1 倍;叶片游离脯氨酸含量在处理 24 h 时以 20% PEG 浓度最高,而在处理 48 h 和 72 h 时均以 15% PEG 浓度最高,各峰值分别是同期 CK 的 5.3 倍、10.7 倍和 7.7 倍。说明大蓟在轻度干旱胁迫下能够较长时间积累渗透物质来较好地适应干旱环境,而在中、重度干旱胁迫下其可溶性糖与脯氨酸积累到一定程度后有下降趋势,但在长时间干旱胁迫下两指标仍显著高于 CK,揭示了

大蓟受到胁迫时能有效积累渗透物质,长时间保持或者缓解水分胁迫的生理机制。

2.3 模拟干旱胁迫对大蓟抗氧化酶活性的影响

干旱胁迫会破坏植物细胞内活性氧产生与清除之间的动态平衡,SOD、POD、CAT 作为植物活性氧清除系统中重要的酶类,在植物受到干旱胁迫损害时能有效清除超氧离子,防止细胞膜脂受损。表 1 显示,随 PEG 处理浓度增加和处理时间延长,大蓟叶片中三大酶活性变化趋势不尽一致。随处理浓度增加,除胁迫 24 h 时的 SOD 活性呈逐渐增加趋势外,其他时间节点的 SOD 活性以及 3 个时间节点的 POD 和 CAT 活性均呈先升后降趋势;随胁迫时间延长,叶片 SOD 和 POD 活性均呈上升趋势,而 CAT 活性则呈先升高再降低趋势。其中,胁迫 24 h 时,各浓度处理 SOD 活性均显著高于 CK,如 30% PEG 浓度处理 SOD 活性比 CK 显著增加了 108.03%,而同期 POD、CAT 活性均在 20% PEG 浓度条件下最高,分别比 CK 显著增加 39.85%和 28.07%。胁迫 48 h 和 72 h 时,各浓度处理的 3 种酶活性均显著高于 CK,SOD 活性分别在 25%和 15%PEG 浓度处理下达到最大值,此时分别比 CK 显著增加 170.78%、370.14%;POD 活性峰值均在 15%PEG 浓度处理时达到最大值,分别比 CK 显著增加 203.34%和 248.91%;CAT 活性均在 10% PEG 浓度时达到最大值,分别比 CK 显著增加 118.78%和 46.89%。另外,在相同 PEG 浓度处理下,POD、CAT 活性随处理时间的延长而逐渐显著升高,均在处理 72 h 达最大值,而 SOD 活性随时间的延长先增加后降低,并在处理 48 h 时达最大值。可见,在干旱胁迫条件下,大蓟叶片中三大抗氧化酶活性峰值出现的时间节点和处理浓度值不一致,但所有处理的酶活性均高于 CK,即大蓟中 3 种酶均发挥着缓解干旱胁迫的重要作用,并且存在协同抵御胁迫的作用。

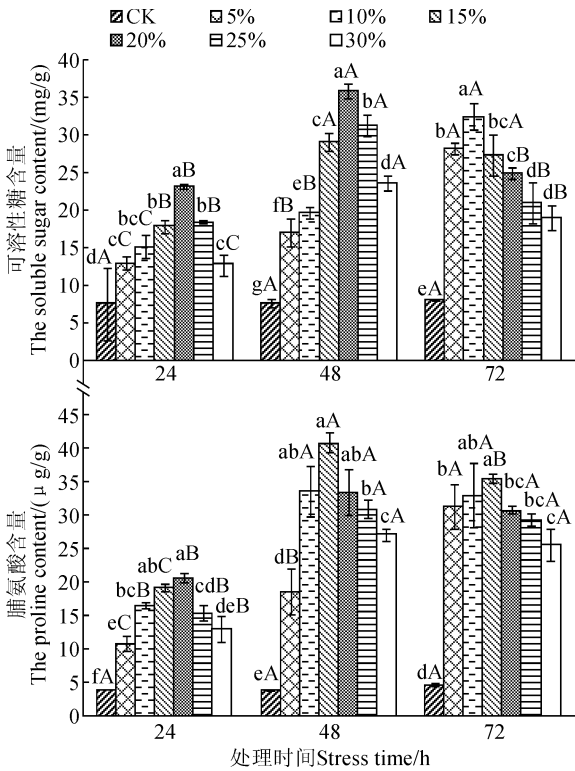


图 2 不同干旱胁迫处理下大蓟可溶性糖和脯氨酸含量的变化

Fig. 2 Changes of different drought stresses on the soluble sugar and the proline contents of *C. japonicum*

表 1 不同干旱胁迫处理下大蓟 SOD、POD 和 CAT 活性的变化									
Table 1 Changes of different drought stresses on the SOD,POD and CAT activities of <i>C. japonicum</i>									
处理 Treatment	SOD(U/g)			POD(U/g)			CAT(U/g)		
	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
CK	60.13±0.42cC	84.54±0.12dB	117.52±0.58dA	119.61±0.58cC	172.14±0.76eB	196.56±0.34cA	87.29±0.58cC	111.26±0.53dAB	126.54±0.98cA
5%	69.27±0.16bcC	151.33±0.22cB	349.14±1.08cA	125.46±0.26bcC	300.25±1.01dB	549.41±0.73bA	90.14±0.53cC	229.28±1.08abA	172.54±0.53abB
10%	73.13±0.18bcC	183.61±0.38bcB	378.47±1.53bcA	136.69±0.42bcC	353.60±0.52cdB	601.29±1.08abA	96.87±0.34bcC	243.41±0.87aA	185.87±1.16aB
15%	83.67±0.27bC	195.74±0.53bcB	552.51±1.01aA	155.33±0.61abC	522.17±1.53aB	685.83±2.01aA	103.57±1.09abC	235.26±0.52aA	176.56±0.31abB
20%	117.81±0.53aC	204.72±0.53bB	409.87±0.42bA	167.28±0.52aC	423.41±0.27bB	642.89±1.06abA	111.79±0.52aC	214.54±1.25bA	170.69±0.73abB
25%	121.24±0.26aC	228.92±0.76aB	382.59±1.31bcA	153.25±0.65abC	384.39±1.23bcB	603.57±0.54abA	106.54±1.08abC	203.21±0.58bcA	159.81±0.53bB
30%	125.09±0.39aC	209.52±0.21bB	376.57±1.21bcA	146.04±0.31bC	372.93±0.43cdB	514.26±1.73bA	104.23±1.06abC	197.65±1.53cA	155.38±0.89bB

3 讨 论

渗透调节是植物适应干旱环境的重要调节机制,可溶性糖与脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,大量研究表明,植物体内可溶性糖与脯氨酸含量在干旱胁迫下会显著升高^[8,15]。本研究也表明,随干旱胁迫浓度升高和时间的延长,大蓟体内可溶性糖和脯氨酸积累量升高,并在胁迫 48 h 处理浓度分别为 20%、15%时达到峰值。说明在轻、中度干旱胁迫下,大蓟能够通过自身代谢活动刺激体内可溶性糖和脯氨酸的积累来降低细胞渗透势,维持一定的细胞膨压^[2],在胁迫 48 h 内能够良好地适应干旱环境。但随着胁迫程度的加重和时间持续,大蓟体内可溶性糖和脯氨酸含量积累到一定程度后变化不大或显著下降,但二指标的含量仍远远高于 CK,说明即使在重度干旱胁迫下大蓟体内的渗透调节同样发挥着重要作用,但可能受水分亏缺的限制而不能发挥到最大水平;从胁迫时间来看,在轻度干旱下,长时间胁迫可以激发更多可溶性糖和游离脯氨酸的产生,渗透调节没有受到限制,但中度和重度胁迫下,尤其是重度胁迫下大蓟渗透调节会受到水分限制而影响渗透调节物质的积累,导致渗透调节物质含量出现降低趋势,但其含量依然显著高于 CK,表明大蓟能承受干旱胁迫的时间也是有一定限度的。即在一定时间内植物可通过调节渗透物质较好地适应干旱环境,超过时间限度之后渗透调节不能充分发挥作用甚至受到抑制,在叶片脱水严重时,植株将受到损伤^[16]。

丙二醛作为膜脂氧化的最终产物之一,其含量可用于衡量植物受逆境伤害程度。研究发现,荠菜幼苗中 MDA 含量随干旱程度的加深而显著增加^[17],本实验也得出了相似的结论,表明在干旱胁迫下大蓟叶片细胞膜系统受到了损伤,且随胁迫时间延长,MDA 积累越多,损害越重,抗旱性越弱^[18]。SOD、POD 和 CAT 是植物膜系统的三大保护酶,在清除超氧自由基、过氧化氢、过氧化物等方面起着重要作用^[19]。同时,SOD 是植物清除活性氧系统的关键酶,它能有效地将 O_2^- 清除氧化成 H_2O_2 和 O_2 ,

保护酶 POD 和 CAT 则会进一步将 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 ^[20]。本研究发现,同一 PEG 浓度下,随胁迫时间的延长,大蓟叶片 SOD、POD 活性逐步增大,CAT 活性先升高后降低。中度干旱胁迫下 SOD 和 CAT 活性在胁迫初期迅速升高,直到胁迫结束仍保持较高活性,说明大蓟有一定的抗旱适应能力;重度干旱胁迫下,因胁迫程度加剧,超过了其忍耐极限,SOD 和 CAT 保护酶活性下降,表明大蓟忍耐干旱胁迫的能力是有限的。另外,在同一时间段,大蓟叶片 SOD、CAT 和 POD 活性随胁迫程度的加深先增加后降低。SOD 在整个胁迫过程中均表现出较高的活性,对清除活性氧发挥了积极作用;POD 在初期活性表现不明显,于胁迫中、后期(48 h、72 h)则一致维持较高的活性;CAT 对干旱胁迫的响应相对迟缓,这与刘汉玄等^[21]的研究结果一致。说明大蓟在受到干旱胁迫时,体内迅速启动 SOD 将 O_2^- 氧化成 H_2O_2 和 O_2 ^[22],随着 H_2O_2 的积累刺激启动 POD 和 CAT 将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 ^[20],在此过程中 POD 对清除 H_2O_2 起到了积极的作用,而 CAT 只在胁迫中期表现出较高的活性,后随着胁迫的持续而受到干旱胁迫伤害,酶活性降低。

综上所述,本试验结果表明,长时间(72 h)、15%PEG-6000 浓度模拟干旱胁迫下,大蓟可通过增加体内可溶性糖与脯氨酸含量来降低渗透势,维持一定的相对含水量,同时提高 SOD、POD 活性清除体内过多的活性氧自由基,减轻细胞膜损伤,即在此胁迫程度和时间节点下,大蓟能主动增加可溶性糖和游离脯氨酸,启动渗透调节机制,同时增加三大保护性酶的活性有效活性氧,保护植株正常生理代谢。超过此胁迫浓度,其渗透调节能力降低,保护酶活性减弱,叶片含水量持续降低,MDA 持续增加,大蓟叶片的生理代谢受到一定限制,植株开始表现伤害症状,尤其在 30% PEG-6000 胁迫 72 h 时,植株脱水严重而萎蔫,故推测大蓟叶片在轻度干旱(15% PEG-6000 浓度)时生存和生长不受影响,而在重度干旱(30% PEG-6000)胁迫下只能度过小于 72 h 的短暂干旱。

参考文献:

[1] 魏云霞,王晓庆,黄 洁. PEG 胁迫对木薯叶片形态、生理及根系解剖结构的影响[J]. 热带作物学报,2016,**37**(2):292-297.

WEI Y X, WANG X Q, HUANG J. Influence of PEG stress on the morphology and physiology of leaf and anatomical structure of root of Cassava[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016,**37**(2):292-297.

[2] 李丽霞,刘济明,池 馨,等. 艾纳香幼苗对夏季干旱胁迫生理响应[J]. 东北农业大学学报,2016,**47**(6):18-25.
LI L X, LIU J M, CHI X, *et al.* Response on physiological of *Blumea balsamifera* L. DC. seedling to drought in summer[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, **47**(6): 18-25.

[3] 陈兰兰,郭圣茂,李桂凤,等. 干旱胁迫对桔梗光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 江西农业大学学报,2015,**37**(5):867-873.
CHEN L L, GUO SH M, LI G F, *et al.* Effects of drought stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Platycodon grandiflorus* [J]. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 2015, **37**(5):867-873.

[4] 赵宏伟,王新鹏,于美芳,等. 分蘖期干旱胁迫及复水对水稻抗氧化系统及脯氨酸影响[J]. 东北农业大学学报,2016,**47**(2):1-7.
ZHAO H W, WANG X P, YU M F, *et al.* Effect of drought stress and rewatering on antioxidant system and proline in rice during tillering stage[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, **47**(2):1-7.

[5] 王智威. 水分胁迫下玉米苗期的生长及生理响应[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2013.

[6] 闫海霞,方路斌,黄大庄. 干旱胁迫对条墩桑生物量分配和光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2011,**22**(12):3 365-3 370.
YAN H X, FANG L B, HUANG D Z. Effects of drought stress on the distribution and photosynthetic characteristics of cluster mulberry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(12):3 365-3 370.

[7] 李静怡,姜寒玉,李书波,吴凌波,杨晓栋,冯永萍等. NaCl 和 PEG 胁迫对天仙子幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中药材, 2016,**39**(2):254-257.
LI J Y, JIANG H Y, LI SH B, *et al.* Effects of NaCl and PEG stress on the growth and physiological of *Hyoscyamus niger*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, **39**(2): 254-257.

[8] 杨传宝,姚俊修,等. 白杨派无性系苗期对干旱胁迫的生长生理响应及抗旱性综合评价[J]. 北京林业大学学报,2016,**38** (5):58-66.
YANG C B, YAO J X, *et al.* Growth and physiological responses to drought stress and comprehensive evaluation on drought tolerance in *Leuce* clones at nursery stage. [J]*Journal of Beijing Forestry University*, 2016, **38**(5):58-66.

[9] 俞晓凤,徐志坚,章省琴,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对广丰药薯试管苗生理特性的影响[J]. 中药材,2016,**39**(1):11-15.
YU X F, XU Z J, ZHANG S Q, *et al.* Effect of PEG-6000 simulation drought stress on physiological characteristics of Guangfeng Medicinal Yam Plantlets[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, **39**(1):11-15.

[10] 陈 泣,龚千锋. 大蓟的化学成分综述[J]. 广州化工,2013, **41**(14):1-2+5.
CHEN Q, GONG Q F. Summary of chemical compositions of *Cirsium japonicum* DC. [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, **41**(14):1-2+5.

[11] 王振飞,李 煜,戴宝贞,等. 大蓟对 5 种癌细胞抑制作用的研究[J]. 中华中医药学刊,2008,**26**(4):761-762.
WANG Z F, LI Y, DAI B Z, *et al.* Study on inhibitory effects of *Cirsium Japonicum* Fisch. DC on five kinds of Human Carcinoma Cells[J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2008, **26**(4):761-762.

[12] 史礼貌,解成喜. 新疆大蓟总黄酮的超声提取及抗氧化性研究[J]. 食品科学,2011,**32**(6):120-123.
SHI L M, XIE C X. Ultrasonic extraction and antioxidant activity of total flavonoids from *Cirsium japonicum* [J]. *Food Science*, 2011, **32**(6):120-123.

[13] 刘路芳,马绍宾. 滇大蓟种子特性和影响萌发因素研究[J]. 种子,2005,**24**(12):57-59.

[14] 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,2006:182-260.

[15] 肖姣娣. 不同强度干旱胁迫对刺槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2015,**35**(8):23-26.
XIAO J D. Physiological and biochemical influences of different drought stress on *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Journal of Central South University of Forestry Technology*, 2015, **35**(8):23-26.

[16] 陈郡雯,吴 卫,等. 聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱条件下白芷苗期抗旱性研究[J]. 中国中药杂志,2010, **35**(2):149-153.
CHEN J W, WU W, *et al.* Drought resistance of *Angelica dahurica* during seedling stage under polyethyleneglycol (PEG-6000) simulated drought stress[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2010, **35**(2):149-153.

[17] 李卫芬,刘发万,林丽飞,等. PEG 模拟干旱胁迫对芥菜苗期的影响[J]. 西南农业学报,2015,**28**(2):738-742.
LI W F, LIU F W, LIN L F, *et al.* Effects of drought stress simulated by PEG on seedling stage of different mustard Varieties[J]. *Southwest China Journal of Agriculture Science*, 2015, **28**(2):738-742.

[18] 张寅媛,刘 英,白 龙. 干旱胁迫对 4 种景天科植物生理生化指标的影响[J]. 草业科学,2014,**41**(4):724-731.
ZHANG Y Y, LIU Y, BAI L. Effect of drought stress on physiological indexes of 4 Crassulaceae species[J]. *Pratacutural Science*, 2014, **41**(4):724-731.

[19] 吴银明,王 平,刘洪升,等. 分根 PEG 胁迫对羊草幼苗植物量、活性氧代谢及脯氨酸含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2008,**43**(2):114-119.
WU Y M, WANG P, LIU H S, *et al.* Effects of PEG stress on phytomass, active oxygen metabolism and proline content of *Leymus chinensis* seedlings under split-root condition[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2008, **43**(2): 114-119.

[20] 裴忠孝. 春石斛生理生化特性对不同梯度干旱胁迫的响应[D]. 武汉:华中农业大学,2013.

[21] 刘汉玄,吴沿友,孙卫红,等. 干旱对番茄幼苗光合和某些生理指标的影响[J]. 广西植物,2016,**36**(3):303-307.
LIU H X, WU Y Y, SUN W H, *et al.* Effects of drought on photosynthesis and the physiological indices in tomato[J]. *Guihaia*, 2016, **36**(3):303-307.

[22] 路雪梅. 干旱胁迫对获生理特性的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.

(编辑:裴阿卫)