

干旱胁迫对青藏高原4种灌木生理指标的影响

潘 昕, 李吉跃^{1*}, 王军辉^{2*}, 何 茜¹, 苏 艳¹, 马建伟³, 杜 坤³

(1. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;
3. 甘肃省小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022)

摘要:以江孜沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)、唐古特蕨(*Caryopteris tangutica*)4种青藏高原灌木树种为试材进行干旱胁迫模拟盆栽试验,通过对比干旱胁迫后4种灌木叶片中丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸含量、可溶性蛋白质含量的变化,对供选树种进行抗旱性能分析与评价,为青藏高原地区造林筛选优良耐旱灌木。研究表明,4种供试植物在轻度干旱时体内MDA含量缓慢升高,重度干旱时达到最大值,唐古特蕨MDA含量峰值和增幅较另3个树种最小,其次是锦鸡儿和江孜沙棘,而砂生槐的MDA峰值和增幅都最大。SOD和POD活性的变化规律都为“单峰曲线”,其中唐古特蕨和锦鸡儿遭受干旱胁迫时SOD活性峰值出现最迟,值也最大,SOD活性降低最少,充分反映出该2种树种对干旱环境有较强的适应性及自我调节能力,江孜沙棘和砂生槐则相反。在干旱胁迫过程中,唐古特蕨的POD活性始终维持在较低活性水平,而且增加的幅度最大,达到805.23%,增加幅度远高于另外3个供试树种,表现出超强的抗旱能力,而其余3个树种POD活性增幅较小,对干旱的适应性差。4树种的脯氨酸含量都呈增加趋势,唐古特蕨增幅最大,与正常水分条件相比增加了10.86倍。苗木可溶性蛋白质含量的变化规律为先增大后减小,其中唐古特蕨增幅最大为213.44%。通过综合评价结果表明,水分胁迫条件下,抗旱性强弱顺序均为:唐古特蕨>锦鸡儿>江孜沙棘>砂生槐。

关键词:干旱胁迫;青藏高原;生理指标

中图分类号:S718.43 文献标识码:A

The Impact of Drought Stress on Physiological Indicators of Four Shrub Species on the Qinghai-Tibet Plateau

PAN Xin¹, LI Ji-yue¹, WANG Jun-hui², HE Qian¹, SU Yan¹, MA Jian-wei³, DU Kun³

(1. College of Forestry, South China Agricultural University, Guanzhou 510642, Guangdong, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3. Xiaolongshan Forestry Science and Technology Research Institute, Tianshui 741022, Gansu, China)

Abstract: Four shrub species, *Hippophae rhamnoides*, *Caragana sinica*, *Sophora moorcroftiana*, and *Caryopteris tangutica* from Qinghai-Tibet Plateau were used to simulate the drought stress on potted seedlings. By comparing the changes of malondialdehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, praline content, and soluble protein content, the drought resistance performance of selected tree species were analyzed and evaluated in order to find the superior drought tolerant shrub species suitable for the afforestation on Qinghai-Tibet Plateau area. The results indicated that the MDA content rose slowly when the four selected plants were under light drought stress and reached the maximum when under heavy drought stress. Both the peak and increase of

收稿日期:2012-08-10

基金项目:科学技术部农业科技成果转化资金项目“青藏高原干旱区优良抗逆灌木树种中试与示范”合同编号(2011GB24320010)

作者简介:潘 昕(1989—),女,在读硕士研究生,主要研究方向:林木栽培生理生态. E-mail:xiaowandaujia@126.com

* 通讯作者:李吉跃(1959—),教授,博士,主要研究方向:森林培育. E-mail:liyymy@vip.sina.com

* 通讯作者:王军辉(1972—),研究员,博士. E-mail:wangjh@caf.ac.cn

MDA content of *Caryopteris tangutica* were the least compared with the other three species, followed by *Caragana sinica* and *Hippophae rhamnoides*, and the peak and increase of MDA of *Sophora moorcroftiana* were the largest. The change rule of SOD and POD activity followed a single-peak curve, with *Caryopteris tangutica* and *Caragana sinica*'s SOD activity spiked the latest and the value was also the largest. The SOD activity decreased to the minimum, which fully reflected that the two species had stronger adaptability and self-regulation under drought environment, while the *Hippophae rhamnoides* and *Sophora moorcroftiana* were the opposite. During the process of drought stress, the POD activity of *Caryopteris tangutica* maintained at a low level, but with the greatest increase (up to 805.23%), the increase rate was much higher than that of the other three species, and showed a superior ability of drought tolerance. But for the rest three species, the increase rate of POD activity was small and the adaptability to drought proved to be bad. The proline content of the 4 species showed an increasing trend and the increase rate of *Caryopteris tangutica* was the highest, 10.86 times compared with that under normal water condition. The seedling's soluble protein content increased at initial and then decreased, the soluble protein's increase of *Caryopteris tangutica* was the largest which was up to 213.44%. The comprehensive evaluation results showed that under water stress, the seedlings' resistance strength sequences were *Caryopteris tangutica* > *Caragana sinica* > *Hippophae rhamnoides* > *Sophora moorcroftiana*.

Key words: drought stress; Qinghai-Tibet Plateau; physiological index

植物的水分胁迫抗性是在长期受到水分因子的胁迫后,通过自身的遗传变异和自然选择逐渐形成的。这种胁迫抗性与植物的内部结构、生理状况有密切的关系^[1]。青藏高原平均海拔4 000 m以上,被称为世界的第三极^[2],降水变化复杂,降水分布表现出明显的地域性和季节性差异,高原由东南至西北、由外缘至内部呈逐渐减少趋势^[3]。森林覆盖率只有4%,且近年来,青藏高原地区沙漠化现象突出,正不断扩展和蔓延^[4]。因此,通过栽植抗旱的固沙固土植物,结合水土保持工程措施是改造和利用干旱、半干旱地区土地,防治环境进一步恶化的有效手段。选择适宜在青藏高原环境下生长的耐旱树种具有重要意义。

干旱胁迫经常导致植物体内活性氧的积累,从而对植物造成氧化胁迫^[1,5]。为了保护自身免受氧化胁迫的伤害,植物进化过程中产生了有效的抗氧化系统来清除活性氧^[6],包括抗氧化酶和非酶抗氧化物质以及渗透调节物质如脯氨酸、可溶性蛋白质。自20世纪90年代以来,有关水分胁迫抗性生理评价研究已在灌木、乔木中广泛开展。研究认为:丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、脯氨酸、可溶性蛋白质可以作为植物抗性生理评价的重要指标^[7]。目前,对青藏高原抗旱树种的研究工作主要在资源调查、保护、资源利用、引种、选育等方面。宋维秀等^[8]以3种经济灌木为试验材料,测定其叶绿素含量、可溶性糖含量、丙二醛含量、游离脯氨酸含量,综合各抗旱指标比较分析其

抗旱性。朱春云等^[9]从国外引进灌木种子18科34属49种,筛选出适宜在青海及相似区生存的灌木11科20属27种,初步总结了在青藏高原引进国外灌木树种的引种策略。罗大庆等^[10-11]以西藏半干旱区分布的的两种豆科灌木砂生槐、锦鸡儿以及柏树为实验树种,采用盆栽控水干旱胁迫手段,比较和分析了各树种在持续水分胁迫条件下的几种渗透调节物质以及膜脂过氧化及保护酶含量变化,对柏树抗旱性进行综合评价。黄颜梅等^[12]采用人工干旱对比盆栽试验方法,探讨在水分胁迫下,西藏柏木生理生化指标变化规律及其抗旱机制。可见,青藏高原抗旱树种的基础研究还较为薄弱。

本实验以江孜沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buchoz) Rehd)、砂生槐(*Sophora moorcroftiana* (Grah.) Benth. Ex Baker)、唐古特蕯(*Caryopteris tangutica* Maxim.)4种青藏高原灌木树种为试材进行干旱胁迫模拟盆栽试验,通过对比干旱胁迫后4种灌木叶片中丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸含量、可溶性蛋白质含量的变化差异,对灌木树种的抗逆生态适应性进行系统研究和评价,为青藏高原干旱地区灌木树种抗耐旱评价指标的建立及抗旱树种的筛选提供基础数据和依据。

1 材料与方 法

1.1 研究材料

选择青藏高原4个灌木树种:江孜沙棘、锦鸡儿、

砂生槐、唐古特莢的1年生播种苗,生长情况见表1。于2011年3月在30 cm×30 cm的花盆上进行盆栽,种植于甘肃天水市小陇山林科所大棚内(平均海拔1 100 m,年平均气温为11℃,年平均降水量491.7 mm),每个树种60盆,采用森林土:泥炭土:鸡粪7:2:1的土壤作为基质,其土壤密度为 $(0.89 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量为 $(57.11 \pm 4.11)\%$,待苗木恢复生长至6月下旬后进行试验处理。

表1 苗木生长情况

树种	地径/mm	苗高/cm
江孜沙棘	8.46 ± 1.25	58.11 ± 8.52
锦鸡儿	7.92 ± 1.00	64.78 ± 12.01
砂生槐	4.26 ± 1.15	52.56 ± 7.58
唐古特莢	8.40 ± 1.12	69.78 ± 6.59

1.2 研究方法

对苗木进行日常浇水管理,于2012年7月21

日对所有供试苗木浇透水后,选取长势良好、生长情况相近的4种苗木各30株,对花盆进行套袋处理,防止土壤水分蒸发而影响叶片蒸腾耗水的研究,并于当日第一次采样,作为供试苗木正常水分条件的对照,之后在干旱第2、4、7、10、17、22 d采样,同种树种每次分别取3株的挂牌叶片进行实验,共3个重复。随着干旱的进行,定期监测土壤含水量(见表2)并选用未取过叶片的植株进行取样,用以测定供试苗木的丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸含量以及可溶性蛋白质含量。一般认为土壤含水量占田间持水量80%以上为正常水平,50%~70%为轻度干旱,30%~50%为中度干旱,低于30%为重度干旱^[13-14]。

表2 苗木干旱胁迫各时期的土壤含水量与田间持水量的关系

土壤含水指标		0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
土壤体积含水量/%	江孜沙棘	53.98	48.85	37.89	28.01	21.02	14.12	4.15
	锦鸡儿	58.65	46.75	35.01	25.99	18.16	10.26	3.67
	砂生槐	52.27	47.85	38.49	30.85	19.85	10.47	4.88
	唐古特莢	56.06	45.65	36.51	29.63	22.60	13.64	3.96
占田间持水量的比例/%	江孜沙棘	106.20	96.11	74.55	55.11	41.36	27.78	8.16
	锦鸡儿	115.39	91.98	68.88	51.13	35.73	20.19	7.22
	砂生槐	102.84	94.14	75.73	60.70	39.05	20.60	9.60
	唐古特莢	110.29	89.81	71.83	58.29	44.46	26.84	7.79
水分梯度		CK	正常	轻度干旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	重度干旱

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤质量含水量 用土壤含水量快速测定仪 Easttest(美国)测定体积含水量。土壤质量含水量(%) = 体积含水量(%) / 土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) (通常认为1g水的体积就是1 cm^3)。

1.3.2 丙二醛(MDA)的测定 丙二醛含量的测定用硫代巴比妥酸(TBA)法^[15]。

1.3.3 超氧化物歧化酶(SOD)的测定 SOD活性测定用氮蓝四唑(NBT)法^[15]。

1.3.4 过氧化物酶(POD)的提取和测定 POD活性采用愈创木酚比色法测定^[16]。

1.3.5 脯氨酸含量的测定 脯氨酸含量的测定用酸性茚三酮法^[17]。

1.3.6 可溶性蛋白含量测定 利用考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白含量^[18]。

1.3.7 数据处理 试验中的数据使用SPSS软件中邓肯法的方差分析和多重比较方法进行处理。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苗木MDA的影响

从图1、表3可以看出,在正常水分条件下,4种植物间MDA含量差异显著。其中唐古特莢的MDA含量最低,为 $0.31 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,江孜沙棘次之,为 $1.31 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,其次是锦鸡儿 $1.96 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,砂生槐最高,为 $2.04 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。当苗木遭受干旱胁迫时,随着土壤含水量的减少,植物叶片中的MDA含量都表现出逐渐增加的规律。唐古特莢MDA含量的变化最小,最大值仅为 $0.51 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,只比对照增加了 $0.20 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;其余3个树种在轻度干

旱时期(0~7 d)缓慢增加,中度干旱和重度干旱时期(10~22 d)迅速增加,并达到最大值,分别为:江孜沙棘 $2.58 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿 $3.42 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,砂生槐 $4.22 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。4个树种的峰值与对照相比,增幅也有很大差异,从大到小依次为:砂生槐(107.33%) > 江孜沙棘(97.37%) > 锦鸡儿(74.40%) > 唐古特莢(62.75%)。可见干旱胁迫对不同苗木体内MDA含量有不同的影响,方差分析表明,干旱胁迫24 d后4种苗木的MDA含量差异显著($P < 0.05$),与正常水分条件相比差异显著($P < 0.05$)。

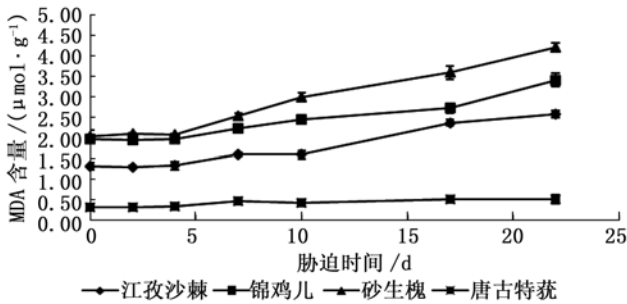


图1 干旱胁迫对苗木MDA含量的影响

表3 干旱胁迫对苗木MDA含量影响的多重比较

苗木	0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
江孜沙棘	c	c	c	c	c	c	c
锦鸡儿	b	b	b	b	b	b	b
砂生槐	a	a	a	a	a	a	a
唐古特莢	d	d	d	d	d	d	d

同列中,凡字母相同者表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's多重比较法)。

2.2 干旱胁迫对苗木SOD活性的影响

从图2、表4可以看出,在正常水分条件下,4种植物的SOD活性相差不大,从高到低依次为:唐古特莢($100.45 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > 锦鸡儿($93.25 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > 江孜沙棘($83.05 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > 砂生槐($73.53 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$)。在干旱胁迫条件下,供试植物体内SOD活性都表现出先增大后减小的规律,在中度干旱到重度干旱时期(10~17 d)达到峰值,其中江孜沙棘和砂生槐SOD活性峰值出现最早,在干旱胁迫的第10 d,分别为 $138.04 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $117.75 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿和唐古特莢出现峰值的时间稍晚,在干旱胁迫的第17 d达到峰值分别为 $158.96 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $188.67 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,唐古特莢的SOD活性最高。经方差分析,4种苗木在峰值时的SOD活性呈现极显著差异($P < 0.01$)。峰值过后,在重度干旱胁迫下,4种植物体内的SOD

活性都迅速下降,除砂生槐之外,其余的3个树种的SOD活性值仍然高于对照值,且与正常水分条件下相比,供试各苗木的SOD活性值差异显著($P < 0.05$)。总体而言,SOD活性的峰值与对照增幅从大到小顺序为:唐古特莢(87.82%)、锦鸡儿(70.47%)、江孜沙棘(66.22%)、砂生槐(60.15%)。

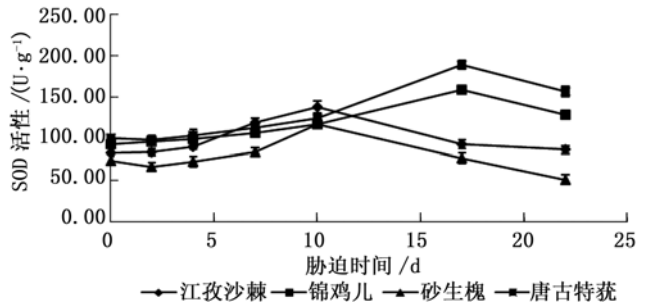


图2 干旱胁迫对苗木SOD活性的影响

表4 干旱胁迫对苗木SOD活性影响的多重比较

苗木	0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
江孜沙棘	c	b	c	c	a	c	c
锦鸡儿	b	a	b	b	c	b	b
砂生槐	d	c	d	d	c	d	d
唐古特莢	a	a	a	a	b	a	a

同列中,凡字母相同者表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's多重比较法)。

2.3 干旱胁迫对苗木POD活性的影响

从图3、表5可以看出,在正常水分条件下,3种供试植物的POD活性差异很大,从小到大依次为:唐古特莢 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,江孜沙棘 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,砂生槐 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,锦鸡儿 $1.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当植物遭受干旱胁迫时,供试苗木体内的POD活性总体表现出先增大后减小的变化规律。砂生槐在干旱胁迫第10 d(中度干旱)最先达到峰值,为 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。其余3个树种都在干旱胁迫第17 d(重度干旱)达到峰值,分别为:锦鸡儿 $3.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,唐古特莢 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,江孜沙棘 $0.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。之后随着干旱胁迫的发展,4种供试植物体内的POD活性都逐渐下降,除砂生槐降低了 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 外,其余3个树种POD活性仍高于正常水分条件水平,经方差分析可知,3种供试苗木的POD活性峰值差异显著($P < 0.05$)。最大峰值与对照的增幅从大到小顺序为:唐古特莢(805.23%)、锦鸡儿(216.26%)、江孜沙棘(197.16%)、砂生槐(37.37%)。

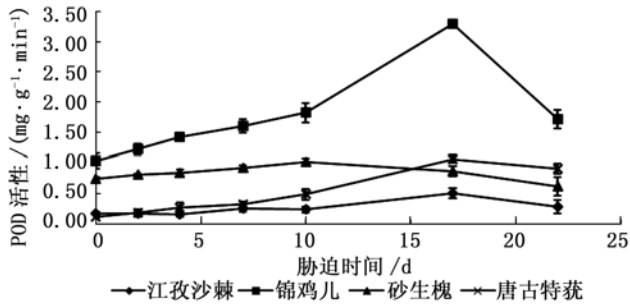


图3 干旱胁迫对苗木POD活性的影响

表5 干旱胁迫对苗木POD活性影响的多重比较

苗木	0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
江孜沙棘	c	c	d	d	d	d	d
锦鸡儿	a	a	a	a	a	a	a
砂生槐	b	b	c	c	c	c	c
唐古特菴	c	c	b	b	b	b	b

同列中,凡字母相同者表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's多重比较法)。

2.4 干旱胁迫对苗木脯氨酸含量的影响

由图4、表6表明,在正常水分条件下,唐古特菴的脯氨酸含量明显高于另外3个树种,分别为:唐古特菴 3 337.71 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿 727.44 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,江孜沙棘 270.96 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,砂生槐 134.14 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。随着土壤含水量的减少,4种苗木叶片中脯氨酸含量都呈明显上升的趋势,种间差异显著。在轻度干旱(4 d)之后,唐古特菴的脯氨酸含量就有明显的增加且始终高于其他树种,而另3个树种的脯氨酸含量则呈缓慢增长趋势。4个树种都在重度干旱胁迫时期(22 d)达到最大值,从大到小依次为:唐古特菴 39 573.94 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿 6 342.94 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,江孜沙棘 2 076.66 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,砂生槐 739.26 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。脯氨酸含量峰值与对照值相比,唐古特菴增加最多为10.86倍,其次是锦鸡儿7.72倍,江孜沙棘6.66倍,砂生槐最小为4.51倍。方差分析结果表明,水分胁迫22 d后种间差异极显著($P < 0.01$),与正常水分比较差异极显著($P < 0.01$),可知水分胁迫对苗木叶片中脯氨酸含量有较大影响。

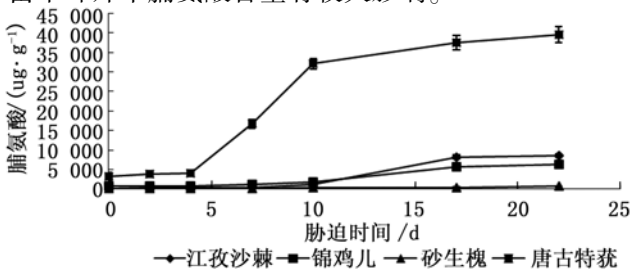


图4 干旱胁迫对苗木脯氨酸含量的影响

表6 干旱胁迫对苗木脯氨酸含量多重比较

苗木	0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
江孜沙棘	c	c	c	c	c	c	c
锦鸡儿	b	b	b	b	b	b	b
砂生槐	d	d	d	d	d	d	d
唐古特菴	a	a	a	a	a	a	a

同列中,凡字母相同者表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's多重比较法)。

2.5 干旱胁迫对苗木可溶性蛋白质含量的影响

从图5、表7可知,4个树种在正常水分条件下叶片中可溶性蛋白质含量相差较大,依次为:砂生槐 4.27 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿 3.61 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,江孜沙棘 2.61 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,唐古特菴 2.41 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在干旱胁迫逐渐加深的情况下,苗木叶片中可溶性蛋白质含量总体表现出先增大后减小的规律,且所有测定值都高于正常水分条件下的可溶性蛋白质含量。随着土壤含水量的减少,植物叶片中可溶性蛋白质含量逐渐增加,都在重度干旱开始时(17 d)达到最大值,之后又缓慢降低。各树种间峰值含量差异显著($P < 0.05$)分别为:唐古特菴 7.43 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,锦鸡儿 6.52 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,砂生槐 5.10 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,江孜沙棘 2.93 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。唐古特菴和锦鸡儿2个树种可溶性蛋白质的增幅(213.44%、105.72%)明显高于砂生槐(38.85%)和江孜沙棘(48.32%)。

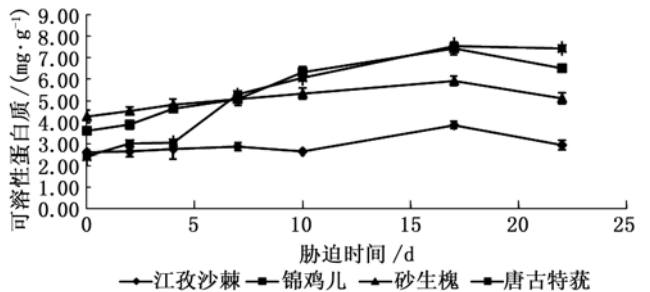


图5 干旱胁迫对苗木可溶性蛋白含量的影响

表7 干旱胁迫对苗木可溶性蛋白质含量多重比较

苗木	0 d	2 d	4 d	7 d	10 d	17 d	22 d
江孜沙棘	c	d	d	d	d	d	d
锦鸡儿	b	b	b	b	a	b	b
砂生槐	a	a	a	c	c	c	c
唐古特菴	d	c	c	a	b	a	a

同列中,凡字母相同者表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's多重比较法)。

3 结论与讨论

3.1 干旱胁迫对植物叶片中MDA含量的影响

植物在逆境下往往发生膜质过氧化作用,而

MDA 是膜质过氧化作用的最终分解产物,其含量与植物遭受逆境伤害的程度成正比^[19-21]。丙二醛的积累是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标,也是鉴定植物抗旱性强弱的重要指标,在相同干旱胁迫强度下,丙二醛含量增幅小的品种较耐旱,增幅大的品种耐旱性差^[22]。本试验中,4种供试植物在轻度干旱时体内 MDA 含量缓慢升高,重度干旱时达到最大值,正常水分条件下唐古特菴 MDA 含量最少,且峰值和增幅也较另3个树种最小,表现出较强的抗旱能力,其次是锦鸡儿和江孜沙棘,而砂生槐的 MDA 峰值和增幅都最大,说明其对干旱胁迫的适应性差。这与华南地区2个树种、云杉抗旱和玉米自交系抗旱性的 MDA 含量的变化情况一致^[23-25]。

3.2 干旱胁迫对植物叶片中 SOD 活性的影响

随着干旱胁迫时间的延长,在中度和重度胁迫下,植物体内的代谢趋于混乱,从而抑制其基因表达,SOD 活性在中度胁迫下开始下降^[26]。在干旱胁迫初期,植物体内的 SOD 会剧烈上升,水分亏缺的加重,SOD 活性下降,下降的程度因植物耐旱能力的不同而不同^[27]。本试验中供试树种唐古特菴及锦鸡儿表现出较强的适应干旱胁迫的能力,当其遭受干旱胁迫时能够迅速适应胁迫环境,增加体内的 SOD 活性,加速分解体内产生的超氧自由基,减缓膜脂过氧化速度,表现出 SOD 活性峰值出现最迟,值也最大,SOD 活性降低最少,充分反映出该树种对干旱环境有较强的适应性及自我调节能力。而抗旱性较弱的江孜沙棘和砂生槐在干旱初期 SOD 活性快速增加,峰值后又迅速下降,表现出较弱的适应能力。这与柴薇薇等^[28]和李秀玲等^[29]的试验结果一致。

3.3 干旱胁迫对植物叶片中 POD 活性的影响

POD 为细胞膜保护酶系统中的主要成员之一,它与 SOD、过氧化氢酶(CAT)联合作用参与清除活性氧及过氧化物自由基的活动,以防止超氧化自由基对细胞膜系统的伤害,提高了苗木适应干旱胁迫的能力^[30-31]。干旱可诱导叶片内 POD 活性升高,4个树种中,唐古特菴在干旱初期的 POD 活性缓慢增长,随着水分胁迫程度的增加,POD 活性不断增加,但仍维持在较低活性水平,而且增加的幅度最大,达到 805.23%,增加幅度远高于另外3个供试树种,表现出更强的抗旱能力。而砂生槐在整个水分胁迫过程中,POD 活性变化较小,增幅仅为 37.37%,对

干旱的适应性差。这与张仁和等^[32]在对玉米进行的干旱胁迫试验和覃鹏等^[33]烟草干旱处理中的发现一致。

3.4 干旱胁迫对植物叶片中脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物体内对干旱胁迫反应敏感的一种重要的渗透调节物质,并在很多实验中证实可作为植物抗旱的重要生理指标,脯氨酸含量与植物抗旱能力成正比^[34-36]。本试验中,4种植物面对干旱胁迫都表现出脯氨酸逐渐增加的变化趋势,在重度干旱时期达到最大值,唐古特菴的脯氨酸含量远高于另外3个树种,与对照组相比增加最多为 10.86 倍,说明该树种对于干旱条件有更好的自我调节能力与适应性,抗旱能力强。

3.5 干旱胁迫对植物叶片中可溶性蛋白质含量的影响

可溶性蛋白质也是植物在干旱胁迫条件下产生的一种维持植物细胞较低渗透势,抵抗水分胁迫伤害的渗透调节物质,经证实抗旱性强的植物在干旱胁迫条件下可溶性蛋白质含量高^[37-38]。本试验中,4个树种的可溶性蛋白质含量都呈先增加后减少的趋势,且都高于正常水分条件下的值,在重度干旱时期达到峰值,随后由于植物代谢受阻蛋白质降解,可溶性蛋白质的含量又缓慢降低。唐古特菴叶片中可溶性蛋白质在正常水分条件下含量最低,干旱胁迫 17 d 后就始终高于另外3个树种,且增幅达到 213.44%,也远高于其他树种,表现出了较好的调节能力和抗旱性。

3.6 干旱胁迫对植物形态特征的影响

此外,干旱胁迫对植物的形态也有很大的影响。轻度干旱时期4种苗木的形态没有很大的变化,顶端还有嫩叶缓慢生长,中度干旱时期江孜沙棘和砂生槐底端叶片出现卷曲、变黄的现象,顶端叶片基本停止生长。重度干旱时期4种苗木的叶片都出现部分萎蔫、干枯,底端叶片变黄、掉落的现象,唐古特菴的情况略好于另外3种苗木,基本没有黄叶。在干旱胁迫 22 d 时,锦鸡儿、江孜沙棘、砂生槐出现植株倾斜的现象,萎蔫、掉落叶片继续增加,唐古特菴保留叶片较多,萎蔫情况较另3种苗木轻。

综上所述,在干旱胁迫下,唐古特菴具有较强的抗旱特性,其次是锦鸡儿、江孜沙棘,而砂生槐的抗旱能力相对较差。因此,在青藏高原地区造林可选用唐古特菴、锦鸡儿和江孜沙棘树种。

参考文献:

- [1] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 373 - 399
- [2] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 627 - 634
- [3] 邹燕, 赵平. 青藏高原年代际气候变化研究进展[J]. *气象科技*, 2008, 36(2): 168 - 173
- [4] 梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等. 青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 311 - 318
- [5] Srivalli B, Sharma G, Khanna - Chopra R. Antioxidative defense system in an upland rice cultivar subjected to increasing intensity of water stress followed by recovery[J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119(4): 503 - 512
- [6] Papadakis A K, Roubelakis - Angelakis K A. Polyamines inhibit NADPH oxidase - mediated superoxide generation and putrescine prevents programmed cell death induced by polyamine oxidase - generated hydrogen peroxide[J]. *Planta*, 2005, 220(6): 826 - 837
- [7] 王焯军, 廖万有, 朱振. 茶树抗性生理评价研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(2): 79 - 83
- [8] 宋维秀, 王志涛, 马正华. 青藏高原区3种经济灌木的抗旱生理研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(9): 28 - 31
- [9] 朱春云, 赵越, 王志涛. 国外灌木树种在青藏高原的适生性研究[J]. *河北林业科技*, 2005(6): 14 - 15
- [10] 罗大庆, 薛会英, 权红, 等. 干旱胁迫下砂生槐、锦鸡儿的生理生化特性与抗旱性[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(9): 122 - 127
- [11] 罗大庆, 方江平, 权红, 等. 西藏半干旱区三种柏树抗旱性研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(8): 1601 - 1607
- [12] 黄颜梅, 张健, 罗承德. 西藏柏木抗旱生理研究[J]. *四川林业科技*, 1998, 19(4): 31 - 36
- [13] 陈晓远, 高志红, 罗远培, 等. 不同土壤水分冬小麦根、冠关系及其对叶片水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2): 134 - 137
- [14] 蒲金涌, 姚小英, 贾海源, 等. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 483 - 486
- [15] 邹琪. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 98 - 100
- [16] 张志良. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 123 - 124
- [17] 张宪政, 陈凤玉. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994
- [18] 汪家政, 范明. 蛋白质技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [19] 郝冉彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理试验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 130 - 133
- [20] 王韶唐. 植物生理学试验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987: 133 - 135
- [21] 邹琦, 李德全, 郑国生, 等. 作物抗旱生理生态研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994: 24 - 29
- [22] 陆国盈, 劳丽萍, 韩世健, 等. 5个甘蔗新品种(系)的抗旱性研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(3): 1341 - 1345
- [23] 潘昕, 李吉跃, 苏艳, 等. 干旱胁迫对华南地区三种苗木膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. *广东林业科技*, 2012, 28(1): 13 - 18
- [24] 冯祥元, 于柱英, 种培芳. 不同种源地云杉的苗期抗旱性评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(1): 95 - 102
- [25] 李凤海, 朱敏, 吕香玲. 常用玉米自交系抗旱性及抗旱性鉴定指标研究[J]. *种子*, 2011, 30(1): 31 - 34
- [26] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 651 - 657
- [27] 李秀玲, 刘开强, 杨志民, 等. 干旱胁迫对4种观赏草枯叶率及生理指标的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(1): 76 - 82
- [28] 柴薇薇, 蒋志荣, 孔东升, 等. 3种灌木幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(5): 1273 - 1274, 1289
- [29] 李秀玲, 刘开强, 杨志民, 等. 干旱胁迫对4种观赏草枯叶率及生理指标的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(1): 76 - 82
- [30] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134 - 200
- [31] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(1): 0109 - 0115
- [32] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1303 - 1311
- [33] 覃鹏, 刘叶菊, 刘飞虎. 干旱处理对烟草叶片SOD和POD活性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2005(2): 28 - 30
- [34] 律秀娜, 任丽娜, 黄真真, 等. 干旱胁迫对月见草体内游离脯氨酸含量的影响[J]. *高师理科学刊*, 2007(27): 66 - 68
- [35] 李波, 贾秀峰, 白庆武, 等. 干旱胁迫对苜蓿脯氨酸累积的影响[J]. *植物研究*, 2003(23): 189 - 191
- [36] 马双艳, 姜远茂, 彭福田, 等. 干旱胁迫对苹果叶片中甜菜碱和丙二醛及脯氨酸含量的影响[J]. *落叶果树*, 2003(5): 1 - 4
- [37] XIONG Li - ming, Schumaker K S, ZHU Jian - kang. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. *Plant Cell*, 2002, 14: 165 - 183
- [38] 吴志华, 曾富华, 马生健. ABA对PEG胁迫下狗牙根可溶性蛋白质的影响[J]. *草业学报*, 2004, 13(5): 75 - 78