

5 种造林树种对干旱胁迫的抗性应答

洪震¹, 刘术新², 洪琮浩³, 雷小华⁴

(1. 华东药用植物园科研管理中心, 浙江 丽水 323000; 2. 丽水职业技术学院, 浙江 丽水 323000; 3. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 4. 丽水市莲都区城区林业工作中心站, 浙江 丽水 323000)

摘要:【目的】探究不同造林树种的抗旱性, 为科学配置乡土树种和外来树种及困难立地造林提供依据。【方法】以 5 个树种, 枫香(*Liquidambar formosana*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、长序榆(*Ulmus elongata*)、黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata*)和娜塔栎(*Quercus texana*) 1 年生实生苗为试验材料, 通过盆栽试验研究适宜水分、轻度干旱、中度干旱和重度干旱(即土壤含水量分别为田间持水量的 75%~80%、55%~60%、40%~45%和 30%~35%)条件下的生理响应及抗旱性差异。【结果】①随着干旱程度的增加, 5 个树种出现不同程度的干旱胁迫症状, 主要表现为叶片发黄、萎蔫, 严重时枝条顶端出现干枯。胁迫 30 d 时, 重度胁迫下, 长序榆和黄山栎树部分幼苗死亡, 黄连木整株叶片变黄或变红; 枫香和娜塔栎中下部叶片变黄干枯; ②5 个树种叶绿素总量与叶片相对含水量呈下降的趋势; 相对电导率和丙二醛(MDA)含量呈上升的趋势; 游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈增加的趋势; ③娜塔栎的超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性均升高; 枫香、黄连木、黄山栎树的 SOD、POD 和 CAT 活性均呈现先升高后降低的变化趋势; 长序榆的 SOD 和 CAT 活性呈现先升高后降低的变化趋势, 而 POD 活性则是随着胁迫程度的增加而升高; ④隶属函数分析表明, 中度和重度胁迫条件下, 5 个树种抗旱能力由强到弱依次是娜塔栎、枫香、黄连木、长序榆、黄山栎树。【结论】娜塔栎在 5 个树种中抗旱性最强, 可在干旱地区的造林中推广应用。

关键词:造林树种; 干旱胁迫; 生理响应; 抗旱性评价; 隶属函数法

中图分类号: S718.4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2021)02-0111-09



Resistance response of five afforestation tree species under drought stress

HONG Zhen¹, LIU Shuxin², HONG Conghao³, LEI Xiaohua⁴

(1. Scientific Research and Management Center of East China Pharmaceutical Botanical Garden, Lishui 323000, China; 2. Lishui Vocational & Technical College, Lishui 323000, China; 3. College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing 100083, China; 4. Center of Lishui City Liandu District Urban Forestry Working Station, Lishui 323000, China)

Abstract: 【Objective】To select species for afforestation in difficult sites by evaluating the drought resistance of five native and alien tree species. 【Methods】Pot experiments were conducted to study the physiological response and drought resistance of 1-year-old seedlings of *Liquidambar formosana*, *Pistacia chinensis*, *Ulmus elongata*, *Koelreuteria bipinnata*, and *Quercus texana* under conditions of appropriate humidity and light, moderate, and severe drought (75%–80%, 55%–60%, 40%–45% and 30%–35% of the soil field capacity). 【Result】With the increase of drought extent, five species showed different levels of symptoms of drought stress and major symptoms are yellow leaves and wilting. Severely affected branches' tops dried up with the increasing time of continuing drought. After severe drought stress for 30 days, partial seedlings of *U. elongata* and *K. bipinnata* died, whole leaves of *P. chinensis* turned yellow or red, and leaves in the middle and lower portions of *L. formosana* and *Q. texana* turned yellow and dry. The chlorophyll and relative water content in the leaves of the five tree species decreased; the relative conductance and malondialdehyde (MDA) concentration in leaves increased; the content of free proline, soluble sugar and protein in leaves increased. The SOD, POD, and CAT activities in the leaves of *Q. texana* increased, whereas it increased and then decreased in *L. formosana*, *P.*

收稿日期 Received: 2020-02-19 修回日期 Accepted: 2020-06-20
基金项目: 浙江省丽水市重点研发计划项目(2016ZDYF08)。
第一作者: 洪震(452451651@qq.com), 高级工程师, ORCID(0000-0003-3232-6622)。

引文格式: 洪震, 刘术新, 洪琮浩, 等. 5 种造林树种对干旱胁迫的抗性应答[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 111–119. HONG Z, LIU S X, HONG C H, et al. Resistance response of five afforestation tree species under drought stress[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(2): 111–119. DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202002019.

chinensis, and *K. bipinnata* trees. With the increasing drought extent, the SOD and CAT activities in the leaves of *U. elongate* increased at first and then decreased, while the activity of POD increased with the increasing drought stress. Membership function analysis showed that under moderate and severe drought stress, drought resistance levels were $Q. texana > L. formosana > P. chinensis > U. elongate > K. bipinnata$.【Conclusion】*Q. texana* has the strongest drought resistance among the five tree species, which provides a competitive advantage for afforestation usage in difficult sites.

Keywords: afforestation tree species; drought stress; physiological responses; evaluation of drought resistance; subordinate function method

水分是植物正常生存和代谢的基础,土壤含水量是影响植物体内水分状况的重要因素^[1]。植物在干旱胁迫下,不仅会在外观形态上表现出一系列的变化,还会在生理、形态特性方面产生响应,导致植物光合作用受抑、呼吸紊乱、代谢异常^[2-4]等,直接影响植物的生长发育和生存^[5-6]。不同的植物在干旱胁迫处理下表现出来的形态、生理代谢等特征变化情况差异,反映出各植物抗干旱的能力也不尽相同。

枫香(*Liquidambar formosana*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、长序榆(*Ulmus elongata*)、黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata*)是我国优良的乡土树种。娜塔栎(*Quercus texana*)原产于北美,由于其适应性强和观赏价值得到人们的关注,近年来在我国市场上备受欢迎。目前,国内外对枫香、黄连木、长序榆、黄山栎树和娜塔栎的研究主要集中于苗木培育^[7-9]、栽培技术^[10-12]、品种选育^[13-16]等方面,而对5个造林树种干旱胁迫方面的比较研究还未见报道。本研究通过盆栽控制试验研究了枫香、黄连木、长序榆、黄山栎树和娜塔栎1年生实生苗在不同干旱胁迫下的生理响应,以探讨5个造林树种对不同土壤水分条件的适应能力,旨在为苗木培育、城乡绿化美化及困难立地造林和生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为枫香、黄连木、长序榆、黄山栎树和娜塔栎1年生实生苗,材料来自浙江省丽水市林业科学研究院碧湖竹溪苗圃(119°54′13.27″E, 28°28′41.26″N)。试验地设在丽水职业技术学院的温室大棚,海拔为100 m,属中亚热带季风气候,温暖湿润,雨水充沛。棚内温度为20~30℃,相对湿度60%~80%^[17]。栽培基质为壤土和泥炭,体积比为3:1,有机质含量为2.135 mg/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为165.42、60.58、75.24 mg/kg, pH为5.92。

1.2 试验方法

采用盆栽控水试验,盆栽容器规格为高17 cm、上口口径14 cm、下口径19 cm,装入基质3.5 kg,选用植株生长状况良好、无病虫害、大小基本一致的5种植物的苗木,于2018年3月将其无损移栽到花盆中,每盆1株。5种苗木设置4个土壤水分处理,即CK(对照,适宜水分,土壤含水量为田间持水量的75%~80%)、T1(轻度干旱,土壤含水量为田间持水量的55%~60%)、T2(中度干旱,土壤含水量为田间持水量的40%~45%)和T3(重度干旱,土壤含水量为田间持水量的30%~35%),每个处理5株,3次重复。控水处理30 d后采集植株中部叶片进行测定。

1.3 相关指标测定

相对电导率(relative electrical conductivity, REC)、叶片相对含水量(LRWC)、叶绿素含量的测定采用分光光度比色法,丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸比色法,游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法,可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法,可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝比色法,过氧化氢酶(CAT)活性测定紫外吸收法测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[18]。

1.4 隶属函数法综合评价植物的抗旱性

抗旱性综合评价采用模糊数学隶属函数值法^[19],将各项抗旱生理指标换算成隶属函数值,然后对各项指标的隶属函数值求平均值。平均值越大,说明抗旱性越强。隶属函数计算公式如下:

若指标与抗旱性成正相关,则

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{i \min}) / (X_{i \max} - X_{i \min});$$

若指标与抗旱性成负相关,则

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{i \min}) / (X_{i \max} - X_{i \min})。$$

式中: Z_{ij} 表示*i*树种*j*指标的抗旱隶属函数值; X_{ij} 表示*i*树种*j*指标的测定值; $X_{i \min}$ 和 $X_{i \max}$ 分别表示各树种中对应指标的最小值和最大值。

1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 17.0软件对数据统计分析,采用Duncan法进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对5个树种苗木形态特征的影响

干旱胁迫对苗木形态特征的影响见表1。由表1可知,胁迫至第10天时,枫香各处理均表现正常,黄连木T1和T2处理表现正常;娜塔栎、长序榆、黄山栾树以及黄连木的T3处理均出现了叶片萎蔫、失绿变色及焦边等症状,并随胁迫程度的增加而加深,受害范围也不断扩大。胁迫至第20天时,枫香T1处理老叶出现黄斑,T2和T3处理叶片萎蔫下垂,顶部叶片脉间褶皱;黄连木各处理出现老叶变黄的症状;长序榆T1处理两株出现老叶叶缘干枯,T2处理5株叶片全部黄化叶斑,叶片不完整,T3处理5株老叶全部脱落,顶部叶片萎蔫;黄山栾树T1处理6株叶片失绿出现黄色叶斑,T2处

理叶片脉间失绿严重,叶斑增多,T3处理下部叶片出现干枯;娜塔栎T1处理下部老叶叶缘失绿,T2处理3株下部老叶叶枯黄,T3处理4株中下部叶片变黄,下部老叶干枯。胁迫第30天时,5个树种各处理受害范围进一步扩大,黄连木T1处理两株全部叶片变黄,T2处理4株全部叶片变黄变红,T3处理1株枝条顶端干枯;长序榆T1处理两株叶片全部黄化,T2处理两株死亡,T3处理3株死亡;黄山栾树T1处理全部植株脉间失绿出现黄斑,T2处理两株死亡,T3处理4株死亡。T2条件下,长序榆和黄山栾树各有两株死亡,其余树种均未死亡;而在T3条件下,长序榆、黄山栾树分别有3株、4株死亡。死亡数最多的是黄山栾树;其次是长序榆;黄连木出现全部叶片变黄变红,没有整株死亡;枫香和娜塔栎中下部叶片黄化干枯,没有整株叶片变黄。

表1 干旱胁迫对5个树种苗木形态特征的影响
Table 1 Effects of drought stress on morphological characteristics of five tree species

树种 species	处理 treatments	形态特征 morphological characteristics		
		10 d	20 d	30 d
枫香 <i>L. formosana</i>	T1	正常	3株老叶出现黄斑	6株老叶出现焦边
	T2	正常	4株叶片萎蔫下垂, 顶部叶片脉间褶皱	9株叶片萎蔫下垂, 上部叶片脉间褶皱
	T3	正常	6株叶片萎蔫下垂, 顶部叶片脉间褶皱	9株老叶失绿黄化,叶缘出现坏死斑, 上部叶片脉间褶皱
黄连木 <i>P. chinensis</i>	T1	正常	1株老叶变黄	3株下部叶片变黄,2株叶片全部变黄
	T2	正常	2株老叶变黄	6株中下部叶片变黄变红, 4株全部叶片变黄变红
	T3	2株下部老叶出现萎蔫, 下部叶片开始变黄	2株中下部叶片全部变黄	全部株中下部叶片变黄,6株全部 叶片变黄变红,1株顶端干枯
长序榆 <i>U. elongata</i>	T1	1株老叶出现黄化叶斑	2株老叶叶缘干枯	2株叶片全部黄化, 其余株全部叶片有黄化叶斑
	T2	1株大部分老叶出现黄化叶斑	5株叶片全部出现 黄化叶斑,叶片不完整	2株死亡,其余株叶片黄化斑增多
	T3	2株下部老叶变黄,1株下部老叶 干枯,1株下部老叶出现黄化叶斑	5株老叶全部脱落, 顶部叶片萎蔫	3株死亡,其余株叶片黄斑焦灼
黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	T1	3株中上部成熟叶片出现黄色 叶斑,其中1株全部叶片萎蔫	6株叶片失绿出现黄色叶斑	全部植株脉间失绿出现黄斑
	T2	3株成熟叶片全部出现黄色 叶斑,并且新叶焦边	7株叶片脉间失绿严重, 叶斑数量增多	2株死亡,其余株叶片脉间 失绿黄斑增多
	T3	2株叶片全部变黄, 1株成熟叶片焦灼	8株叶片脉间失绿黄色叶斑多, 4株叶片全部变黄,下部叶片干枯	4株死亡,其余株叶片萎蔫, 中下部叶片变黄
娜塔栎 <i>Q. texana</i>	T1	1株下部老叶萎蔫	1株下部老叶叶缘失绿	2株老叶叶缘焦边
	T2	1株下部老叶萎蔫叶缘失绿	3株下部老叶枯黄	3株下部老叶干枯面积加大
	T3	1株下部老叶萎蔫失绿, 1株下部老叶边缘焦边	4株中下部叶片变黄, 下部老叶干枯,2株下部叶片焦边	6株中下部叶片变红, 下部老叶干枯

2.2 干旱胁迫对5个树种叶片相对含水量、相对电导率和叶绿素含量的影响

干旱胁迫对叶片相对含水量、相对电导率和叶绿素含量的影响见表2。由表2可知,胁迫处理

30 d时,T3处理下枫香、黄连木、长序榆、黄山栾树和娜塔栎叶片相对含水量分别为67.40%、58.84%、63.03%、59.23%和54.26%,与各自CK相比分别下降了5.67%、11.56%、8.48%、12.95%和9.36%,5

个树种叶片相对含水量较 CK 处理下降幅度大小 由此可推断出枫香叶片保水能力最好。
依次为:枫香<长序榆<娜塔栎<黄连木<黄山栾树,

表 2 干旱胁迫对 5 个树种叶片相对含水量、相对电导率和叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of drought stress on leaf relative water content, relative conductivity and chlorophyll content of five tree species				
树种 species	处理 treatments	叶片相对含水量/% LRWC	相对电导率/% REC	叶绿素总含量/ (mg·g ⁻¹) total chlorophyll content
枫香 <i>L. formosana</i>	CK	71.45±0.93 a	28.90±0.60 c	4.45±0.14 a
	T1	70.87±0.74 a	30.94±1.80 c	3.97±0.27 b
	T2	69.37±1.17 ab	34.76±0.72 b	3.62±0.15 c
	T3	67.40±1.77 b	39.83±1.03 a	3.20±0.24 d
黄连木 <i>P. chinensis</i>	CK	66.53±1.85 a	25.77±0.67 d	5.80±0.11 a
	T1	61.40±2.62 ab	32.29±0.52 c	5.32±0.18 b
	T2	60.53±3.20 b	34.36±0.59 b	4.34±0.11 c
	T3	58.84±3.76 c	36.06±0.55 a	3.12±0.40 d
长序榆 <i>U. elongata</i>	CK	68.87±0.91 a	43.13±2.26 c	5.72±0.19 a
	T1	67.16±1.04 a	47.85±2.33 b	5.36±0.09 b
	T2	63.92±0.59 c	61.21±1.09 a	5.03±0.12 c
	T3	63.03±0.74 c	62.01±0.71 a	3.20±0.23 d
黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	CK	68.04±0.67 a	23.55±1.12 d	5.86±0.12 a
	T1	66.83±0.82 a	27.64±1.32 c	4.07±0.08 b
	T2	61.57±1.91 b	30.16±0.45 a	3.87±0.12 b
	T3	59.23±2.50 b	32.99±1.59 b	3.45±0.19 c
娜塔栎 <i>Q. texana</i>	CK	59.86±0.91 a	35.10±0.80 c	5.34±0.18 a
	T1	56.74±1.51 b	38.39±0.75 b	4.91±0.26 b
	T2	55.23±2.63 b	38.50±0.57 b	4.90±0.04 b
	T3	54.26±1.09 b	50.54±2.17 a	3.99±0.20 c

注:同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。Different letters in the table indicate significant differences between processing of uniform tree species ($P < 0.05$). The same below.

5 个树种叶片相对电导率均随干旱胁迫程度的加剧而上升($P < 0.05$)。胁迫处理 30 d,T3 处理下 5 个树种叶片细胞膜透性增幅由小到大排序为:枫香(37.82%)<黄连木(39.93%)<黄山栾树(40.10%)<长序榆(43.78%)<娜塔栎(43.96%)。

5 个树种叶绿素总含量随干旱胁迫程度的加深而下降,与叶片相对含水量的变化趋势一致。胁迫处理 30 d,T3 处理 5 个树种叶片叶绿素总含量降幅由小到大排序为:娜塔栎(25.31%)<枫香(28.07%)<黄山栾树(41.06%)<长序榆(44.03%)<黄连木(46.14%),其中娜塔栎的降幅最小,为 25.31%,黄连木的幅度最大,达到 46.14%。

2.3 干旱胁迫对 5 个树种叶片渗透调节物质的影响

干旱胁迫对叶片渗透调节物质的影响见表 3。从表 3 可以看出,5 个树种叶片游离脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖的含量均随干旱胁迫程度的加剧而增加,其中黄山栾树游离脯氨酸含量随着胁迫程度的加剧表现出先升后降的趋势。

表 3 干旱胁迫对 5 个树种渗透调节物质含量的影响

Table 3 Effects of drought stress on contents of osmolyte of five tree species					mg/g
树种 species	处理 treatments	游离脯氨酸 freeproline	可溶性糖 soluble sugar	可溶性蛋白 soluble protein	
枫香 <i>L. formosana</i>	CK	0.05±0.00 c	40.38±0.14 c	17.05±1.93 c	
	T1	0.08±0.00 c	43.75±0.50 c	20.64±1.08 b	
	T2	0.12±0.03 b	55.70±1.46 b	29.17±0.96 a	
	T3	0.18±0.01 a	79.62±3.74 a	29.75±2.17 a	
黄连木 <i>P. chinensis</i>	CK	0.95±0.02 b	49.86±2.89 c	24.05±3.07 d	
	T1	0.96±0.00 ab	57.43±0.56 b	30.10±0.92 c	
	T2	0.97±0.00 ab	58.45±0.34 b	37.04±0.88 b	
	T3	0.98±0.01 a	63.52±0.77 a	42.09±2.92 a	
长序榆 <i>U. elongata</i>	CK	0.68±0.01 c	26.44±0.81 c	42.27±1.04 b	
	T1	0.95±0.19 b	28.77±4.14 c	47.61±6.89 ab	
	T2	0.96±0.00 b	65.72±2.49 b	51.12±5.12 ab	
	T3	1.04±0.19 a	84.82±4.59 a	53.38±4.13 a	
黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	CK	0.16±0.00 c	21.93±1.11 a	39.64±5.41 c	
	T1	0.21±0.01 b	25.35±1.58 c	47.64±2.14 b	
	T2	0.26±0.03 a	34.79±2.29 b	51.77±0.88 ab	
	T3	0.25±0.01 a	53.83±0.24 a	55.51±4.07 a	
娜塔栎 <i>Q. texana</i>	CK	0.09±0.02 d	50.00±4.53 b	41.49±1.33 c	
	T1	0.15±0.03 c	50.15±1.32 b	45.76±0.60 b	
	T2	0.22±0.01 b	57.08±4.33 b	46.54±1.51 b	
	T3	0.27±0.01 a	67.76±9.30 a	51.35±2.05 a	

T3 处理下,枫香和娜塔栎两个树种的渗透调节物质以游离脯氨酸含量增幅最大,分别是适宜水分处理下的 3.35 倍和 3.03 倍,可溶性糖含量增幅分别是适宜水分处理下的 1.97 倍和 1.36 倍,可溶性蛋白含量增幅最小,增幅分别为 1.74 倍和 1.24 倍;长序榆和黄山栎树两个树种的渗透调节物质以可溶性糖含量增幅最大,分别是适宜水分处理下的 3.21、2.46 倍,游离脯氨酸含量增幅分别是适宜水分处理下的 1.52、1.56 倍,可溶性蛋白含量增幅分别为 1.26、1.40 倍;黄连木的渗透调节物质以可溶性蛋白含量增幅最大,是适宜水分处理下的 1.75 倍,可溶性糖含量增幅次之,是适宜水分处理下的 1.27 倍,游离脯氨酸含量增幅最小,是适宜水分处理下的 1.03 倍。

综上可知,不同植物种类抵御干旱胁迫的最敏感渗透调节物质不同,枫香和娜塔栎两个树种抵御干旱最敏感的渗透调节物质是游离脯氨酸,长序榆和黄山栎树两个树种抵御干旱最敏感的渗透调节物质是可溶性糖,黄连木抵御干旱最敏感的渗透调

节物质是可溶性蛋白。
2.4 干旱胁迫对 5 个树种叶片丙二醛含量和保护酶活性的影响

干旱胁迫对叶片丙二醛含量及保护酶活性的影响见表 4。由表 4 可知,在干旱胁迫下,5 个树种叶片 MDA 含量均随着干旱胁迫程度的增加而升高。重度干旱胁迫下,5 个树种叶片 MDA 含量分别是适宜水分处理下的 2.29、1.89、2.85、9.52 和 1.98 倍。说明随着干旱胁迫程度增加,5 个树种叶片的膜脂过氧化作用均显著加剧,黄山栎树膜系统受到破坏的相对程度最大,其次是长序榆。随干旱胁迫程度的增加,枫香、黄连木、黄山栎树 3 个树种的保护酶活性均呈现先升高后降低的变化趋势,长序榆的 SOD 和 CAT 活性呈现先升高后降低的变化趋势,而 POD 活性则是随着胁迫程度的增加而升高。娜塔栎的保护酶活性则持续升高,说明娜塔栎保护酶系统对干旱胁迫的主动适应能力较强,其余 4 个树种保护酶系统在重度干旱胁迫下先达到能调节的极限值,随后抗氧化能力减弱。

表 4 干旱胁迫对 5 个树种叶片保护酶活性和丙二醛含量的影响
Table 4 Effects of drought stress on protective enzyme activity and MDA content of five tree species

树种 species	处理 treatments	丙二醛含量/ (mmol·g ⁻¹) MDA content	超氧化物歧化酶活性/ (U·g ⁻¹) SOD activity	过氧化物酶活性/ (μg·g ⁻¹ ·min ⁻¹) POD activity	过氧化氢酶活性/ (U·g ⁻¹) CAT activity
枫香 <i>L. formosana</i>	CK	4.65±0.96 c	446.88±11.76 a	3.27 ±0.19 c	129.91±6.98 d
	T1	7.84±0.87 b	475.90±10.81 a	5.81±1.16 a	140.35±4.38 c
	T2	10.57±0.85 a	301.96±37.82 b	5.26 ±0.53 ab	164.78±2.21 a
	T3	10.62±0.50 a	270.80±36.28 b	4.26 ±0.60 bc	152.47±0.71b
黄连木 <i>P. chinensis</i>	CK	3.59±0.23 b	709.80±24.49 c	3.67± 0.17 b	60.83±0.29 c
	T1	4.42±0.36 b	854.73±42.24 b	4.32±0.86 b	137.58±2.64 b
	T2	5.78±1.23 ab	1352.13±43.57 a	5.87±1.07 a	179.32±2.84 a
	T3	6.79±1.89 a	1287.30±24.51 a	5.68±0.39 a	168.61±22.19 a
长序榆 <i>U. elongata</i>	CK	15.31±1.34 c	388.62±23.55 b	17.49±2.38 b	40.45±2.00 c
	T1	16.74±2.07 c	411.23±33.76 b	20.43±6.68 ab	49.26±2.38 b
	T2	33.11±2.70 b	560.64±47.62 a	27.80±3.50 a	59.65±4.00 a
	T3	43.62±2.13 a	510.08±46.63 a	28.16±1.12 a	57.39±3.71 a
黄山栎树 <i>K. bipinnata</i>	CK	5.32±0.58 b	1 007.64±58.02 c	17.26±1.19 c	250.30±23.70 b
	T1	7.95±2.80 b	1 079.29±41.35 bc	23.12±3.24 b	284.21±14.36 a
	T2	19.09±4.25 a	1 264.01±119.46 a	34.56±2.42 a	287.16±18.56 a
	T3	25.33±5.56 a	1 173.25±24.50 ab	26.23±1.48 b	239.93±5.01b
娜塔栎 <i>Q. texana</i>	CK	9.60±1.29 b	608.33±89.93 c	15.10±4.34 b	26.54±2.45 c
	T1	12.55±3.50 ab	781.17±45.60 b	20.96±2.07b	41.03±1.50 b
	T2	12.99±3.48 ab	784.31±58.03 b	32.14±6.66 a	45.13±3.07 b
	T3	19.03±6.41 a	827.62±78.35 a	34.16±1.96 a	53.80±1.12 a

2.5 5 个树种抗旱性的综合评价
植物对干旱胁迫的响应是一个由多因素控制

的复杂性状,利用某一指标单独评价树种的抗旱能力有很大的局限性。利用模糊数学隶属函数法是

目前被普遍应用于树种抗旱性评价的一种方法。通过对上述 10 个生理指标的隶属函数加权平均,综合评价了 5 个树种的抗旱性(表 5)。T1 处理下,耐旱性强弱顺序:娜塔栎>枫香=黄连木>黄山栾树>长序榆。T2 处理下。耐旱性强弱顺序为:娜

塔栎>枫香>黄连木>长序榆>黄山栾树,T3 处理下,耐旱性强弱顺序为:娜塔栎=枫香>黄连木>长序榆>黄山栾树。娜塔栎干旱条件下耐旱性最强;黄山栾树在中度和重度干旱胁迫下的综合隶属函数值分别为 0.46 和 0.47,耐旱性较差。

表 5 5 个造林树种隶属函数值比较及综合评价

Table 5 Comparison and comprehensive evaluation of the subordinate function values of five afforestation tree species													
处理 treatments	树种 species	叶片相对 含水量+ leaf relative water content +	相对 电导率- relative conductivity -	叶绿素+ chloro- phyll +	脯氨酸+ free pro- line+	可溶性糖+ soluble sugar +	可溶性 蛋白质+ soluble protein+	过氧化物 酶活性+ POD activity+	超氧化物 歧化酶 活性+ SOD activity+	过氧化氢 酶活性+ CAT activity+	丙二醛- MDA-	综合隶属 函数值 subordinate function values	抗旱性 drought resistance
T1	枫香 <i>L. formosana</i>	0.45	0.51	0.59	0.49	0.40	0.48	0.50	0.56	0.67	0.56	0.52	2
	黄连木 <i>P. chinensis</i>	0.46	0.44	0.38	0.33	0.62	0.59	0.60	0.60	0.59	0.55	0.52	2
	长序榆 <i>U. elongata</i>	0.58	0.45	0.58	0.39	0.40	0.63	0.35	0.35	0.40	0.46	0.46	5
	黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	0.49	0.37	0.35	0.42	0.64	0.47	0.42	0.52	0.53	0.62	0.48	4
	娜塔栎 <i>Q. texana</i>	0.51	0.50	0.64	0.54	0.38	0.49	0.59	0.58	0.59	0.65	0.55	1
T2	枫香 <i>L. formosana</i>	0.41	0.55	0.56	0.51	0.66	0.37	0.66	0.61	0.60	0.54	0.55	2
	黄连木 <i>P. chinensis</i>	0.43	0.55	0.58	0.61	0.36	0.52	0.62	0.57	0.65	0.38	0.53	3
	长序榆 <i>U. elongata</i>	0.44	0.64	0.59	0.60	0.49	0.39	0.45	0.42	0.46	0.47	0.49	4
	黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	0.51	0.34	0.43	0.55	0.34	0.46	0.58	0.49	0.44	0.50	0.46	5
	娜塔栎 <i>Q. texana</i>	0.43	0.50	0.58	0.51	0.64	0.47	0.53	0.63	0.65	0.65	0.56	1
T3	枫香 <i>L. formosana</i>	0.38	0.44	0.48	0.53	0.61	0.53	0.59	0.64	0.67	0.54	0.54	1
	黄连木 <i>P. chinensis</i>	0.42	0.52	0.63	0.45	0.49	0.56	0.56	0.58	0.50	0.56	0.53	3
	长序榆 <i>U. elongata</i>	0.49	0.36	0.34	0.65	0.53	0.59	0.51	0.48	0.34	0.49	0.48	4
	黄山栾树 <i>K. bipinnata</i>	0.51	0.58	0.47	0.54	0.51	0.41	0.40	0.42	0.38	0.52	0.47	5
	娜塔栎 <i>Q. texana</i>	0.43	0.48	0.65	0.59	0.52	0.48	0.55	0.56	0.56	0.63	0.54	1

注:“+”表示该指标与抗旱性成正相关,“-”表示该指标与抗旱性成负相关。“+” indicates that the indicator is positively related to drought resistance, and “-” indicates that the indicator is negatively related to drought resistance.

3 讨 论

干旱胁迫导致植物形态发生变化,生长受到抑制,严重的导致死亡,随着胁迫强度的加剧,受抑制现象越显著。本研究的结果表明,随着干旱胁迫程度的增加,5 个树种地上部形态特征出现不同程度的变化,叶片脉间失绿变黄出现黄斑,叶片萎蔫下垂,枝条顶端干枯,严重的死亡。通过对胁迫 30 d 后的 5 种植物的叶片出现症状情况、死亡数及出现死亡现象的时间分析,娜塔栎的抗旱能力要比其他树种更强。

水分是植物活细胞的重要组成成分,是各种代谢活动的重要物质,抗旱性强的树种其叶片结构特征更有利于减少水分损失。因此,叶片的保水力直接体现植株的抗旱能力^[20-21]。研究表明,叶片相

对含水量的下降幅度与植物叶片保水能力有重要的关系,叶片相对含水量降幅越小,其叶片保水能力越强,植物的抗旱性越强^[22]。5 个树种叶片相对含水量随着胁迫程度的加深而逐渐减小。在胁迫处理 30 d 时,T3 重度干旱处理下各树种叶片相对含水量达最小值,5 个树种叶片相对含水量较 CK 处理下降幅度大小顺序为:枫香<长序榆<娜塔栎<黄连木<黄山栾树,由此可推断出枫香叶片保水能力最好。

树种在干旱胁迫下,由于细胞膜功能受损或结构破坏使其透性增大,细胞内的水溶性物质有不同程度的外渗^[23],耐旱性强的植物,胁迫时其质膜相对透性增加的幅度相对较小^[24]。植物受干旱胁迫下,会发生膜脂过氧化作用,MDA 是膜脂过化的产物之一。植物体内 MDA 越多,说明过氧化作用越

强,从而造成植物体伤害的程度越高^[25]。抗旱性强的植物MDA含量增幅小^[26]。本研究表明,随着干旱胁迫程度的增强,5个树种叶片细胞膜透性和MDA含量均呈现逐步上升的趋势,这与小叶蚊母(*Distylium buxifolium*)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)和轮叶蒲桃(*Syzygium grijsii*)^[1]、木本滨藜(努塌滨藜 *Atriplex gardneri*、三角滨藜 *A. tridentata*、四翅滨藜 *A. canescens*)^[27]、黄枝槐(*Sophora japonica*)^[28]、柏木(*Cupressus funebris*)^[29]等的研究结果一致。胁迫处理30 d时,T3处理下5个树种叶片细胞膜透性较CK处理增幅由小到大排序为:枫香<黄连木<黄山栎树<长序榆<娜塔栎。叶片MDA含量较CK处理增加幅度大小依次为:黄连木<娜塔栎<枫香<长序榆<黄山栎树。黄连木膜质过氧化程度为5个树种中最弱,抗旱性较强,在抗旱性综合评价的结果中也体现了黄连木在5个树种中属于较强抗旱性的树种之一。

干旱环境下会抑制植物体合成叶绿素,随着干旱程度的加深,抗旱能力越强的植物,叶绿素总含量的下降幅度会随之变小^[21]。5个树种叶绿素总含量随干旱胁迫程度的加深而呈现下降的趋势,当含水量达到重度干旱时,各树种叶绿素含量达到最低值。游离脯氨酸是植物对胁迫有较敏感反应的渗透调节物质之一,脯氨酸的含量与植物的抗旱能力成正比^[30-31]。本研究结果表明,枫香、娜塔栎、黄连木、长序榆体内游离脯氨酸含量会随着干旱程度的加剧逐渐增加,这与润楠(*Machilus nanmu*)^[32]、欧李(*Cerasus humilis*)^[33]、侧柏(*Platycladus orientalis*)^[34]、江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*)^[20]等树种的研究结果一致。当干旱胁迫达到重度时,各树种的游离脯氨酸含量达到最大值,其中黄连木的游离脯氨酸含量增幅最小。可溶性糖具有降低细胞水势的作用,与植物在逆境下的渗透调节具有较大关系,可提高植物吸水 and 保水能力,有利于增强植物的抗逆性^[35]。在干旱胁迫下,可溶性蛋白质能够提高细胞内原生质渗透压,维持原生质胶体的稳定^[32]。本研究中,5个树种的可溶性糖和可溶性蛋白的含量均随干旱胁迫程度的加剧而呈现升高的趋势,水分胁迫使各树种缺水严重,可溶性糖和可溶性蛋白含量的增加可引起其他生理代谢的响应,如原生质黏度增大等,从而提高植物的保水能力和吸水能力,有利于适应缺水的环境,维持水解类酶如蛋白酶等的稳定性,进而保持原生质体结构^[36]。

SOD、POD 和 CAT 是进行植物体内活性氧代

谢主要的酶,具有清除植物体内因胁迫积累的活性氧,对细胞膜结构起到保护的作用,以缓解胁迫环境对植物的损伤,SOD、POD 和 CAT 活性的变化能较好地反映植物对逆境的适应能力^[37]。娜塔栎3种保护酶活性均在重度胁迫时达峰值,枫香、黄连木、黄山栎树3树种的3种保护酶活性在中度胁迫时达峰值,长序榆的SOD和CAT活性在在中度胁迫时达峰值,POD活性在重度胁迫时达峰值。本研究表明,干旱胁迫下,膜脂过氧化物MDA含量增加,但是酶促防御系统的SOD、POD和CAT活性提高。在重度胁迫下,枫香、黄连木、黄山栎树3个树种叶片SOD、POD和CAT保护酶活性下降与MDA积累有关,一方面,由于树种叶片SOD、POD和CAT活性下降,使有害自由基积累,当超过伤害阈值时,可能直接或间接地启动膜脂过氧化作用使MDA含量增加,膜完整性被破坏;另一方面,随着MDA含量的增加又抑制了植物叶片SOD、POD和CAT的活性,从而丧失了保护酶系统的功能,进一步导致膜系受损加重。而娜塔栎在重度胁迫下,SOD、POD和CAT3种保护酶活性达峰值,表明娜塔栎保护酶系统对干旱胁迫的主动适应能力较强。

植物抗旱性是植物体内复杂的抵抗逆境的生理过程,而且不同树种间抗旱机理不同,因而不能用单一的指标指标反映植物抗旱性的状况,应对多个生理生化指标进行综合分析评价,以对植物抗旱性进行全面系统的研究^[38]。本研究采用模糊数学的方法,对所测定的各项指标进行隶属函数分析,结果表明:中度胁迫下耐旱性强弱顺序为娜塔栎>枫香>黄连木>长序榆>黄山栎树;重度胁迫下耐旱性强弱顺序为娜塔栎=枫香>黄连木>长序榆>黄山栎树。

植物抗旱特性是一个综合且复杂的生理过程,本研究的试验苗圃属于开放式环境,无法精确对温度、空气湿度等环境因子进行控制,试验过程中可能存在较短时间的干旱和高温的复合胁迫,需要在下一步的研究中对环境因子尽可能地进行精确控制,以期对5个树种繁育、水肥管理与造林困难地的推广应用提供理论参考。

参考文献(reference):

[1] 洪震,练发良,刘术新,等. 3种乡土园林地被植物对干旱胁迫的生理响应[J]. 浙江农林大学学报,2016, 33(4): 636-642. HONG Z, LIAN F L, LIU S X, et al. Physiological response of three native garden ground cover plant seedlings to increasing drought stress[J]. J Zhejiang A & F Univ, 2016, 33(4): 636-642. DOI:10.11833/j.issn.2095-0756.2016.04.012.

- [2] 何小三,徐林初,龚春,等. 干旱胁迫对‘赣无12’苗期光合特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 52-61. HE X S, XU L C, GONG C, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* seedlings of ‘GanWu 12’ [J]. J Central South For Univ, 2018, 38(12): 52-61. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.12.007.
- [3] 邓辉茗,龙聪颖,蔡仕珍,等. 不同水分胁迫对绵毛水苏幼苗形态和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(6): 1099-1108. DENG H M, LONG C Y, CAI S Z, et al. Morphology and physiological characteristics of *Stachys lanata* seedling under water stress[J]. Acta Bot Boreali-Occidentalia Sin, 2018, 38(6): 1099-1108. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.06.1099.
- [4] 郑鹏丽,黄晓蓉,费永俊,等. 水分胁迫对桢楠幼树光合生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 64-70. ZHENG P L, HUANG X R, FEI Y J, et al. Effects of water stress on photosynthetic physiology characteristics of *Phoebe zhen-nan* seedlings[J]. J Central South Univ For Technol, 2019, 39(10): 64-70. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.10.010.
- [5] LIPIEC J, DOUSSAN C, NOSALEWICZ A, et al. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review [J]. International Agrophysics, 2013, 27(4): 463-477. DOI: 10.2478/ntag-2013-0017.
- [6] FATHI A, TARI D B. Effect of drought stress and its mechanism in plants [J]. International Journal of Life Sciences, 2016, 10(1): 1-6. DOI:10.3126/jils.v10i1.14509.
- [7] 刘盼盼,许冲勇,孙红梅,等. 枫香优良无性系组织培养研究[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 14-19. LIU P P, XU C Y, SUN H M, et al. Tissue culture of superior clone of *Liquidambar formosana* [J]. For Environ Sci, 2019, 35(2): 14-19. DOI:10.3969/j.issn.1006-4427.2019.02.003.
- [8] 庞宏东,胡兴宜,胡文杰,等. 淹水胁迫对枫杨等3个树种生理生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 15-20, 26. PANG H D, HU X Y, HU W J, et al. Effects of waterlogging stress on the physiological and biochemical characteristics of three tree species [J]. J Central South Univ For Technol, 2018, 38(10): 15-20, 26. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.10.003.
- [9] 胡文杰,庞宏东,胡兴宜,等. 9年生枫香种源变异及优良种源选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 40-46. HU W J, PANG H D, HU X Y, et al. Variation and selection of *Liquidambar formosana* based on a nine-year-old provenance test [J]. J Central South Univ For Technol, 2019, 39(3): 40-46. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.03.007.
- [10] 郭欢欢,刘勇,姚飞,等. 黄连木苗期年生长节律、生物量分配及养分积累[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(7): 71-75. GUO H H, LIU Y, YAO F, et al. Seedling growth rhythm, biomass allocation and nutrient accumulation of *Pistacia chinensis* [J]. J Central South Univ For Technol, 2018, 38(7): 71-75. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.07.012.
- [11] 丁锡珍. 彩叶树种娜塔栎的繁育与栽培技术[J]. 现代园艺, 2017(16): 38. DING X Z. Breeding and cultivation techniques of *Quercus texana* with colorful leaves [J]. Xiandai Horticulture, 2017(16): 38. DOI: CNKI:SUN:JXYA.O.2017-16-029.
- [12] 李峰卿,王秀花,楚秀丽,等. 缓释肥 N/P 比及加载量对浙江楠等5种珍贵树种1年生容器苗生长和养分库构建的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 72-80. LI F Q, WANG X H, CHU X L, et al. Effects of N/P ratio and loading on growth and construction of nutrients reserves of one-year-old seedlings for five kinds of precious tree species [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(1): 72-80. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201902007.
- [13] 罗喻才,陈琳,彭巧华,等. 我国极小种群野生植物长序榆(*Ulmus elongate*)的分布格局和群落调查[J]. 南方林业科学, 2018, 46(1): 1-4. LUO Y C, CHEN L, PENG Q H, et al. Distribution pattern and community survey of *Ulmus elongate*, one of plant species with extremely small populations in China [J]. Jiangxi For Sci Technol, 2018, 46(1): 1-4. DOI:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2018.01.001.
- [14] 陈琳,余泽平,聂堂杰,等. 江西官山8种珍贵野生植物资源及保护策略[J]. 中国野生植物资源, 2018, 37(6): 63-67. CHEN L, YU Z P, NIE T J, et al. Eight kinds of precious wild plant resources and protection strategies in Guanshan Nature Reserve, Jiangxi [J]. Chin Wild Plant Resour, 2018, 37(6): 63-67. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9690.2018.06.016.
- [15] 黄利斌,梁珍海,窦全琴,等. 观赏栎树新品种‘金焰彩栎’[J]. 林业科学, 2015, 51(5): 165. HUANG L B, LIANG Z H, DOU Q Q, et al. A new variety of ornamental *Koelreuteria bipinnata* var. *integrifoliola* ‘Jinyan’ [J]. Sci Silvae Sin, 2015, 51(5): 165. DOI:10.11707/j.1001-7488.20150520.
- [16] 吕运舟,董筱韵,黄利斌. 黄山栎树实时荧光定量PCR内参基因的筛选[J]. 分子植物育种, 2019, 17(2): 553-560. LYU Y Z, DONG X Y, HUANG L B. The screening of reference genes for real-time fluorescent quantitative PCR of *Koelreuteria bipinnata* [J]. Mol Plant Breed, 2019, 17(2): 553-560. DOI:10.13271/j.mpb.017.000553.
- [17] 洪震,刘术新,练发良,等. 4个小叶蚊母树无性系幼苗在不同土壤类型上的生长差异[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 380-386. HONG Z, LIU S X, LIAN F L, et al. Growth difference of four *Distylium buxifolium* clone seedlings in different soil types [J]. J Zhejiang For Coll, 2018, 35(2): 380-386. DOI:10.11833/j.issn.2095-0756.2018.02.025.
- [18] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009. LI L. Plant physiology module lab guide [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [19] 姜晓瑞. 干旱胁迫对10种不同种源地墨西哥柏的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2012. LOU X R. The effect of drought stress on 10 different provenances Mexican cypress [D]. Nanjing: Nanjing Forest University, 2012.
- [20] 刘菲,周隆腾,蒋焱,等. 不同种源江南油杉幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 35-45. LIU F, ZHOU L T, JIANG Y, et al. Physiological response from different provenances of *Keteleeria fortunei* seedlings to drought stress [J]. J Central South Univ For Technol, 2018, 38(11): 35-45. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.11.006.
- [21] 赵琳,郎南军,温绍龙,等. 云南干热河谷4种植物抗旱机理的研究[J]. 西部林业科学, 2006, 35(2): 9-16. ZHAO L, LANG N J, WEN S L, et al. A study on drought resistance mechanism of four kinds of plants in dry and hot valley of Yunnan Province [J]. J West China For Sci, 2006, 35(2): 9-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8246.2006.02.002.
- [22] 蒋志荣,杨占彪,汪君,等. 兰州九州台四种绿化树种抗旱性机理比较研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 553-558. JIANG Z R, YANG Z B, WANG J, et al. Comparison of drought resistant mechanism between four virecence species in Jiuzhoutai of Lanzhou City [J]. J Desert Res, 2006, 26(4): 553-558. DOI:

- 10.3321/j.issn: 1000-694X.2006.04.009.
- [23] 马书尚,杨淑慎. 不良环境对植物细胞膜的伤害[J]. 植物生理实验技术, 2000, 1(1): 199-201. MA S S, YANG S S. Damage to plant cell membrane by adverse environment[J]. Experimental techniques in plant physiology, 2000, 1(1): 199-201.
- [24] 张海燕,李贵全. 大豆抗旱性与生理生态指标关系的研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 140-142. ZHANG H Y, LI G Q. Study on the relationships between soybean drought-resistance and physiological and ecological indicators[J]. Chin Agric Sci Bull, 2005, 21(8): 140-142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6850.2005.08.040.
- [25] 王爱国,邵从本,罗广华,等. 丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J]. 植物生理学通讯, 1986, 22(2): 55-57. WANG A G, SHAO C B, LUO G H, et al. Study on malondialdehyde as a lipid peroxidation index in plants[J]. Plant Physiology Communications. 1986, 22(2): 55-57. DOI: CNKI:SUN:ZWSL.0.1986-02-034.
- [26] GOMEZDEL CAMPO M, RUIZ C, LISSARRAGUE J R. Effect of water stress on leaf area development, photosynthesis, and productivity in Chardonnay and Airén grapevines[J]. American Journal of Enology & Viticulture, 2002, 53(2): 138-143. DOI: 10.1016/S0304-4238(01)00277-1.
- [27] 王宇超,王得祥,彭少兵,等. 干旱胁迫对木本滨藜生理特性的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(1): 61-67. WANG Y C, WANG D X, PENG S B, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of woody saltbush[J]. Sci Silvae Sin, 2010, 46(1): 61-67. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20100110.
- [28] 文瑛,廖飞勇,刘智慧. 不同水分胁迫对黄枝槐生理特性的影响研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 47-52. WEN Y, LIAO F Y, LIU Z H. The effect of water stress on the physiology of *Sophora japonica* 'Golden stem' [J]. Chin Agric Sci Bull, 2012, 28(13): 47-52. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.13.008.
- [29] 刘锦春,钟章成,何跃军. 干旱胁迫及复水对喀斯特地区柏木幼苗活性氧清除系统的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2836-2840. LIU J C, ZHONG Z C, HE Y J. Effects of drought stress and re-watering on the active oxygen scavenging system of *Cupressus funebris* seedlings in Karst area[J]. Chin J App Ecol, 2011, 22(11): 2836-2840. DOI: CN KI: SUN: YYSB.0.2011-11-009.
- [30] 任文伟,钱吉,马骏,等. 不同地理种群羊草在聚乙二醇胁迫下含水量和游离脯氨酸含量的比较[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 349-352. REN W W, QIAN J, MA J, et al. Comparative study of *Leymus chinensis*'s water content and free proline of different geographic populations under the force of different consistency PEG[J]. Acta Ecol Sin, 2000, 20(2): 349-352. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2000.02.028.
- [31] VERBRUGGEN N, HERMANS C. Proline accumulation in plants: a review [J]. Amino Acids, 2008, 35(4): 753-759. DOI: 10.1007/s00726-008-0061-6.
- [32] 罗杰,周光良,胡庭兴,等. 干旱胁迫对润楠幼苗生长和生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(3): 563-570. LUO J, ZHOU G L, HU T X, et al. Effects of drought stress on growth and physiological parameters of drought stress on growth and physiological parameters of *Machilus achilus pingii* seedlings[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2015, 21(3): 563-570. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.11005.
- [33] 姜英淑,陈书明,王秋玉,等. 干旱胁迫对2个欧李种源生理特征的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(6): 6-10. JIANG Y S, CHEN S M, WANG Q Y, et al. Effects of the drought stress on physiological characteristics of two *Cerasus humilis* provenances [J]. Sci Silvae Sin, 2009, 45(6): 6-10. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7488.2009.06.002. <https://doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6>.
- [34] 刘方春,邢尚军,马海林,等. 干旱对侧柏容器苗和裸根苗生长、营养及生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 68-73. LIU F C, XING S J, MA H L, et al. Effects of drought stress on growth, nutrition and physiological characteristics of *Platycladus orientalis* container and bareroot seedlings[J]. J Beijing For Univ, 2014, 36(5): 68-73. DOI: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.05.020.
- [35] 崔晓茹,于慧敏,李会彬,等. 干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 788-793. CUI T R, YU H M, LI H B, et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Pennisetum alopecuroides* seedlings[J]. Pratacultural Sci, 2017, 34(4): 788-793. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0535.
- [36] 冯晓敏,张永清. 水分胁迫下不同耐旱性糜子叶片保护酶活性及膜脂过氧化特性[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 200-207. FENG X M, ZHANG Y Q. Characteristics of protective enzyme activities and lipid peroxidation in broomcorn millet leaves under soil water stress[J]. Agric Res Arid Areas, 2019, 37(1): 200-207. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.28.
- [37] 刘遵春,包东娥. 水分胁迫对金光杏梅幼苗生长及其生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(5): 28-31, 88. LIU Z C, BAO D E. Effect of water stress on growth and physiological indexes in Jinguang plum seedlings[J]. J Agric Univ Hebei, 2007, 30(5): 28-31, 88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1573.2007.05.008.
- [38] 赵兰,邢新婷,聂庆娟,等. 4种地被观赏竹抗旱性综合评价研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 18-21. ZHAO L, XING X T, NIE Q J, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of four dwarf ornamental bamboo species [J]. J North-west For Univ, 2011, 26(1): 18-21.

(责任编辑 吴祝华 袁佳秋)