

大叶樟‘恨天高’对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价

曾艳¹, 金晓玲^{1,2}, 张亚平¹, 刘晓玲¹, 罗峰¹, 胡曼筠¹

(1. 中南林业科技大学风景园林学院, 长沙 410004; 2. 湖南省环境资源植物开发与利用工程技术研究中心, 长沙 410000)

摘要: 以大叶樟新品种‘恨天高’及普通大叶樟的幼苗为供试材料, 采用盆栽控水人工模拟轻度、中度和重度干旱胁迫环境的方法, 研究了供试材料对不同程度干旱胁迫的生理响应, 筛选出了适合评价大叶樟的抗旱性生理指标, 并结合隶属函数值对供试材料的抗旱性进行了综合评价。结果表明: (1) 随着干旱胁迫程度的加剧, 2 种供试材料的 Rec、MDA 含量、WSD 和 Pro 含量呈持续上升趋势, 2 种供试材料的 POD 活性、SOD 活性和 Chl 含量随着干旱胁迫程度的加深, 呈现先上升后下降的“抛物线”趋势; (2) ‘恨天高’其 SS 含量随着干旱胁迫的加剧而逐渐升高, 但普通大叶樟其 SS 含量呈先上升后下降的趋势; (3) Rec、MDA、WSD、Pro 和 POD 这 5 个生理指标的含量变化与大叶樟的抗旱性密切相关, 可以作为大叶樟抗旱性评价指标; 通过对大叶樟的 8 项抗旱生理指标的隶属函数值进行计算, 以及与主成分分析结果对各指标进行合成的综合指数表明‘恨天高’(0.58) 的抗旱性稍强于普通大叶樟(0.56); (4) ‘恨天高’其抗旱能力与侧柏等景观绿化树种相当, 从抗旱性来看符合城市景观绿化及高速公路绿化的应用要求。

关键词: 大叶樟; 干旱胁迫; 水分饱和和亏; 生理指标

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0280-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.044

Physiological Responses of *Zelkova schneideriana* ‘Hentiangao’ to Different Drought Stresses During Seedling Stage and Its Evaluation of Drought Resistance

ZENG Yan¹, JIN Xiaoling^{1,2}, ZHANG Yaping¹, LIU Xiaoling¹, LUO Feng¹, HU Manjun¹

(1. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; 2. Hunan Research Center of Engineering Technology for Utilization of Environmental and Resources Plant, Changsha 410000)

Abstract: To examine the physiological responses of *Z. schneideriana* seedlings to drought stress and to screen out the physiological indexes of drought resistance, a pot water control test was conducted. The drought resistance was also evaluated based on the membership function values. Two materials (*Z. schneideriana* ‘Hentiangao’ and common *Z. schneideriana* grafted seedlings) were studied under three water conditions: light drought (LD), moderate drought (MD) and severe drought (SD). The results showed that with the increase of drought stress, the contents of the relative electric conductivity (Rec), malondialdehyde (MDA), water saturation deficit (WSD) and free proline (Pro) of the two testing materials were increased. And their peroxidase (POD) activity, superoxide dismutase (SOD) activity and chlorophyll (Chl) contents also changed with the increasing drought stress, as a ‘parabola’ trend. The SS contents increased with the increase of drought stress for *Z. schneideriana* ‘Hentiangao’, but increased first and then decreased for *Z. schneideriana*. Principal component analysis based on 8 drought stress indexes hinted that Rec, MDA, WSD, Pro and POD had the close relationships with the drought resistance of *Z. schneideriana*, and could be used to evaluate its drought resistance. The calculated membership function values of the 8 physiological indexes and the comprehensive index from the principal component analysis indicted that the drought resistance of ‘Hentiangao’ (0.58) is stronger than the common *Z. schneideriana*’s (0.56). Considering the drought resistance of ‘Hentiangao’ is match with oriental arborvitae, it can meet the application requirements of urban landscape and highway greening from the point of drought resistance.

Keywords: *Zelkova schneideriana* ‘Hentiangao’; drought stress; water saturation deficit; physiological index

收稿日期: 2017-08-10

资助项目: 中央财政林业科技推广项目([2015]XT008); 国家林业局重点学科资助项目(林人发[2016]21 号); 湖南省“十二五”重点学科(风景园林学)(湘教发[2011]76 号); 国家林业局“十三五”重点学科项目([2015]44 号); 湖南省科技计划项目(2016TP2007)

第一作者: 曾艳(1992—)女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事园林植物育种研究。E-mail: 405069774@qq.com

通信作者: 金晓玲(1963—)女, 浙江东阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事园林植物优良新品种选育研究。E-mail: 121191638@qq.com

全球淡水资源缺乏且分布极不均匀,因此近年来关于植物响应干旱胁迫的研究已经成为热点^[1-2]。作为对植物伤害较大的逆境因子之一,干旱胁迫使植株正常生长代谢被抑制,相对电导率(Rec)和丙二醛(MDA)激增,水分饱和亏(WSD)增大,游离脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)含量升高,叶片内叶绿素(Chl)含量下降使得植物光合作用被抑制,而作为细胞酶促防御系统的重要组成部分,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等抗氧化酶活性降低^[3-4]。

大叶榉(*Zelkova schneideriana*)是国家的Ⅱ级重点保护野生植物,为榆科(Ulmaceae)榉属(*Zelkova*)高大落叶乔木,其树形优美、秋季叶色变化丰富、适应性强是重要的园林景观树种和用材树种。‘恨天高’(*Zelkova schneideriana* ‘Hentiangao’)是经实生苗变异选育而成的大叶榉新品种,具有树高生长速度慢、分支点低,分枝数多、叶间距短,秋季叶色变化时间晚、落叶迟等特性^[5],在城市景观绿化和高速公路绿化中应用前景很大。且目前大叶榉研究多聚焦于栽培育苗^[6]、组织培养^[7]、叶色^[8]、病虫害^[9]、耐盐碱胁迫^[10],很少涉及到大叶榉抗旱性方面的研究。因此对‘恨天高’的抗旱性进行研究试验,通过测定干旱胁迫下的生理指标结合隶属函数值,对‘恨天高’和普通大叶榉的抗旱性进行科学的综合评价,为‘恨天高’在城市景观绿化和高速公路绿化中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

供试材料选自中南林业科技大学苗圃(25.0909°N,114.0740°E,海拔108 m,属于亚热带季风气候)2016年3月繁殖的同批‘恨天高’、普通大叶榉嫁接苗。栽培基质为椰糠、泥炭土、珍珠岩、有机肥(体积比7:4:1:1),采用孔径27 cm,高25 cm的塑料花盆栽植,每一花盆种植1棵且基质同重。试验采取温室盆栽控水法,供试材料在室外进行正常的水肥管理,选取长势整齐且健康的植株各36棵,随机分成4组,每组9盆。其中对照(CK):每天浇水浇透,其含水量在35%以上;轻度干旱胁迫(SD):含水量日变化在28%~35%;中度干旱胁迫(MD):含水量日变化在18%~28%;重度干旱胁迫(HD):含水量日变化在8%~18%。其中SD、MD和HD组在正式进行试验前先设置好水分梯度,在此期间CK组则正常水分管理。试验期间分别在每天下午5:00用电子秤称重和高精度土壤水分测试仪TDR100(美Spectrum公司)直接测量两种方法同时对供试材料控水,测得其土壤含水量后及时补充水分,1 h后再次测其含水量。持续处理45 d后2种供试材料的HD处理的植株有很多叶片干枯,严重影响景观效果。于2016年7月15日开始试验,8月29日采摘各组植株中上部

成熟叶片进行生理指标的测定,试验重复3次。

1.2 生理指标测定

相对电导率(Rec)采用雷磁DJS-1D电导率仪测定;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑法(NBT)比色法测定;叶绿素含量采用丙酮提取法测定;游离脯氨酸(Pro)含量测定采用茚三酮显色法测定;可溶性糖(SS)含量的测定采用蒽酮比色法测定^[11];水分饱和亏(WSD)采用烘干称重法测定^[12]。

1.3 综合评价方法

采用模糊隶属函数法和主成分分析法^[13]对2种供试材料抗旱性进行综合评价。

(1)隶属函数值计算方法。将原始数据标准化若抗旱指标与抗旱性正相关,其公式为:

$$R(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

若抗旱指标与抗旱性负相关,其公式为:

$$R(X_i) = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

各指标隶属函数值计算公式为:

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

式中: $R(X_i)$ 为供试材料在干旱胁迫处理下对应指标的隶属度($0 < R(X_i) < 1$); X_i 、 $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别指试验材料对应指标的测试值、最大值和最小值; R_i 为供试材料的隶属函数值。

(2)抗旱性主成分分析权重系数计算方法

$$D_i = \sum_{j=1}^n (F_{ij} Y_{ij}) \quad (4)$$

$$W_i = D_i = \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

式中: D_i 为各抗旱指标对抗旱性作用的大小; W_i 为各抗旱指标的代表抗旱性主成分分析权重系数; n 为抗旱指标数; F_{ij} 为 i 抗旱指标在第 j 主成分上的负荷量; Y_{ij} 代表 i 抗旱指标在第 j 主成分上的贡献率。

(3)抗旱性综合指数计算方法

$$I = \sum_{i=1}^n [W_i R_i] \quad (6)$$

式中: I 为供试材料抗旱性综合指数, I 越大表示其抗旱性越强,反之则越弱。

1.4 数据处理

通过SPSS 19.0软件进行数据分析,Excel软件进行图表的绘制。

2 结果与分析

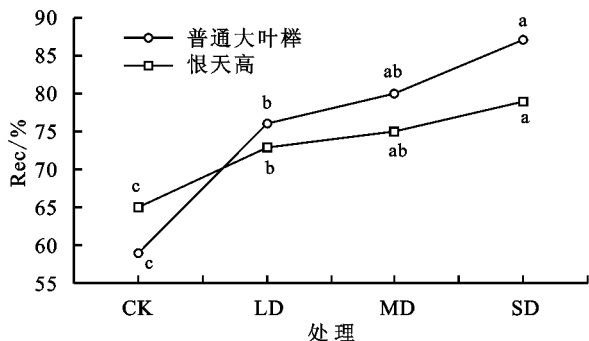
2.1 干旱胁迫对‘恨天高’和普通大叶榉生理指标的影响

2.1.1 干旱胁迫对细胞膜透性的影响 由图1可知,当细胞受到干旱胁迫时,最先受到破坏的是细胞

膜,其膜透性增加从而大量电解质外渗,最终表现为生理指标 Rec 增大。两种供试材料的 Rec 均随着干旱胁迫的加剧而增大。在 CK 组中‘恨天高’的值 65% 大于普通大叶桉的值 59%,但各干旱胁迫处理下的 Rec 均小于普通大叶桉且与 CK 存在显著性差异;随着水分亏缺程度的加深,普通大叶桉 Rec 变化较‘恨天高’剧烈,则普通大叶桉其细胞膜透性增大程度也比‘恨天高’强。

MDA 具有细胞毒性作为细胞膜脂过氧化的主要产物容易引起细胞膜功能的紊乱,其含量的变化是

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^[14]。干旱胁迫对两种供试材料 MDA 含量的影响如图 1 所示,其变化规律和 Rec 相同。LD 处理下,普通大叶桉的 MDA 含量与 CK 组不存在显著差异且其值小于‘恨天高’;但在 MD、SD 处理下,普通大叶桉的 MDA 含量急剧升高并与 CK 存在显著差异且其含量显著高于‘恨天高’;而‘恨天高’随着干旱胁迫的加重,MDA 含量逐渐增加。从而可以得出当加重干旱胁迫时,普通大叶桉其质膜损坏程度急剧增大并超过‘恨天高’质膜损坏程度。



注:不同小写字母表示‘恨天高’和普通大叶桉各生理指标变化在 0.05 水平下有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 干旱胁迫对供试材料细胞膜透性的影响

2.1.2 干旱胁迫对细胞渗透调节物质的影响 SS 和游离 Pro 均是植物体内的有效的亲和性渗透调节物质,当植物受到干旱胁迫时,其含量均会受到相应的影响。由图 2 可知,在 CK 组中‘恨天高’的 SS 含量高于普通大叶桉;‘恨天高’的 SS 含量随着水分亏缺程度的增加而上升且在 SD 处理下达到峰值为 5.38 mg/g;而普通大叶桉其 SS 含量随着水分亏缺程度的增加先上升后下降,在 MD 处理下达到峰值为 4.68 mg/g,从而在 SS 含量变化上表明同等干旱胁迫处理下,‘恨

天高’的细胞渗透调节能力强于普通大叶桉。两种供试材料的 Pro 含量变化趋势一致即与干旱胁迫程度呈正相关关系,两种供试材料在 CK 组和 LD 处理下差异不大,但普通大叶桉在 MD 处理下 Pro 含量急剧增加且其含量明显高于‘恨天高’;而‘恨天高’其 Pro 含量则在 SD 处理下急剧升高,且其含量与普通大叶桉差异不大,说明干旱胁迫处理可以促进大叶桉游离 Pro 的积累,但两种供试材料其 Pro 含量随干旱胁迫程度变化有所差异。

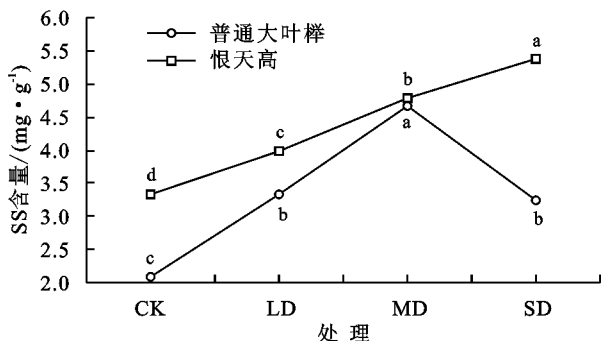
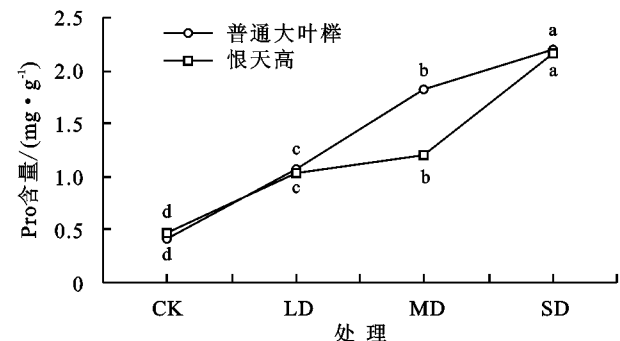


图 2 干旱胁迫对供试材料细胞膜渗透调节物质的影响

2.1.3 干旱胁迫对保护酶活性的影响 POD 是广泛存在于植物各个组织器官中的一种活性氧清除酶,它可以清除体内的 H_2O_2 ,在植物抗旱性中有非常重要的作用。由图 3 可知,随着干旱胁迫程度的加深 POD 活性呈现先上升后下降的趋势。其中‘恨天高’POD 活性在 LD 处理下急剧升高达到最大值 275 $\mu\text{g/g}$ 随后在 MD、SD 处理下又缓慢降低但均明显比 CK 高;普



通大叶桉 POD 活性在 LD、MD 处理下增加趋势缓慢达到最大值 139 $\mu\text{g/g}$ 后在 SD 处理下缓慢下降虽均比 CK 高,但其各值均低于‘恨天高’。因此在同等干旱胁迫下‘恨天高’的 POD 活性稍强于普通大叶桉。

SOD 是膜脂过氧化防御系统的主要保护酶,能清除生物体内的自由基来维持机体内的动态平衡。由图 3 可知,干旱胁迫对两种供试材料 SOD 活性的影响变化

趋势与 POD 活性变化基本一致,随着干旱胁迫程度的加深其活性变化呈现先上升后下降的“抛物线”趋势。在 CK 组中两种供试材料的 POD 活性都很低,但在 LD

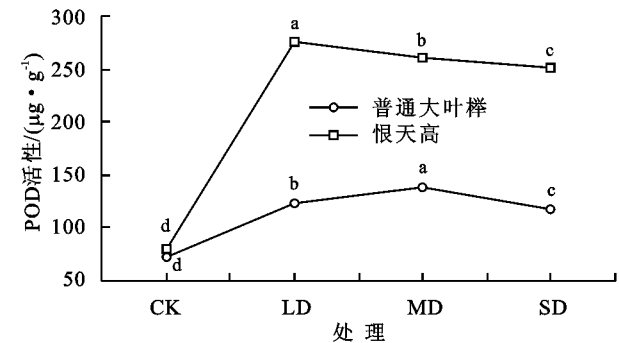
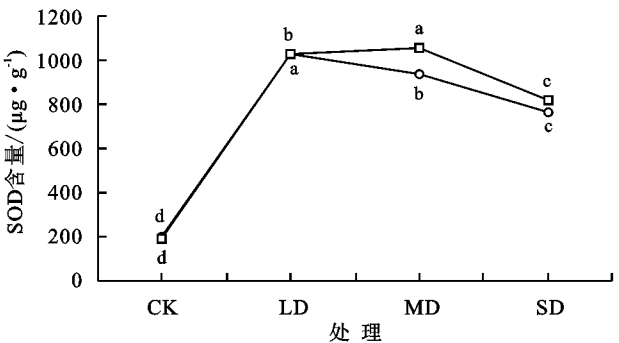


图 3 干旱胁迫对供试材料保护酶活性的影响

2.1.4 干旱胁迫对叶绿素的影响 叶绿素(Chl)的生物合成是一系列酶催化反应的结果。在干旱胁迫环境下,植物叶片合成叶绿素的含量被阻导致叶绿素含量的下降。由表 1 可知,随着干旱胁迫程度的加重,Chl 含量先急剧增大后又逐渐降低;从 CK 组可以看出‘恨天高’叶片的 Chl 含量比普通大叶榉

处理下其活性均急剧上升,普通大叶榉达到最大值1 031 μg/g 后缓慢下降;但‘恨天高’在 MD 处理下其活性继续升高并达到最大值 1 056 μg/g 后缓慢下降。



高,且均在 LD 处理下达到峰值;在 MD 处理下,两种供试材料的 Chl 含量都有所下降,其中‘恨天高’下降了10.5%,而普通大叶榉则下降了 27.7%;而在 SD 处理下两种材料的 Chl 含量进一步下降但普通大叶榉下降幅度更大,此时两种材料的叶片已经严重缺水失绿。

表 1 干旱胁迫对普通大叶榉和‘恨天高’叶绿素含量的变化 单位:mg/g

供试材料	CK	LD	MD	SD
普通大叶榉	2.28±0.03b	2.53±0.09a	1.83±0.07c	1.01±0.06d
‘恨天高’	3.43±0.03b	3.82±0.10a	3.42±0.03b	2.83±0.09c

注:不同小写字母表示‘恨天高’和普通大叶榉各生理指标变化在 0.05 水平下有显著差异(P<0.05)。下同。

2.1.5 干旱胁迫对水分饱和和亏的影响 植物组织含水量常用水分饱和和亏(WSD)来表示,植物的 WSD 可以表明其体内水分的亏缺程度,WSD 值越大其抗旱能力越弱^[15]。由表 2 可知,在 CK 组中两种供试

材料叶片的相对含水量差不多,其 WSD 也差不多;两种供试材料随着干旱胁迫程度的加深 WSD 的值逐渐增大,且在 SD 处理下普通大叶榉其 WSD 远大于‘恨天高’。

表 2 干旱胁迫对普通大叶榉和‘恨天高’叶水分饱和和亏的变化 单位:%

供试材料	CK	LD	MD	SD
普通大叶榉	15.3±1.1d	23.0±2.0c	32.0±3.6b	45.0±2.6ab
‘恨天高’	14.0±2.0b	21.0±4.4b	32.0±5.0a	38.0±6.0a

2.2 大叶榉抗旱生理指标筛选

对大叶榉的 8 项生理指标进行主成分分析,根据贡献率的大小得知各生理指标的重要性。由表 3 可知,这两个主成分的综合指标累积贡献率达到 87.538%,能够充分反映大叶榉的抗旱性情况。其中第 1 主成分的特征值为 4.821,贡献率为 60.261%,包含了 Rec、MDA、WSD、Chl 和 Pro 5 项生理指标,说明了第 1 主成分主要反映的是干旱胁迫对细胞膜透性、细胞渗透调节物质以及对光合色素的影响;第 2 主成分的特征值为 2.182,贡献率为 27.278%,包括 POD、SS 和 SOD 3 项生理指标,说明了第 2 主成分主要反映的是干旱胁迫对细胞保护酶活性的影响。通过对大叶榉各项抗旱性生理指标的相关性分析和主成分分析表明 8 项生理指标综合作用的结果对大叶榉的抗旱性影响显著,其中

Rec、MDA、WSD、Pro 和 POD 的载荷量较大,可作为大叶榉抗旱性强弱鉴定的指标。

表 3 大叶榉各抗旱性生理指标主成分分析

指标	第 1 主成分	第 2 主成分	D_i	W_i
Rec	0.864	0.343	0.61421858	0.144318054
MDA	0.942	0.157	0.61048508	0.143440823
WSD	0.911	0.273	0.62344665	0.146486300
POD	0.030	0.956	0.27885598	0.065520572
SOD	0.379	0.751	0.43324697	0.101796595
Chl	-0.776	0.574	0.62420108	0.146663563
Pro	0.928	0.324	0.64760280	0.152162079
SS	0.326	0.834	0.42394938	0.099612014
特征根	4.821	2.182		
贡献率/%	60.261	27.278		
累积贡献率/%	60.261	87.538		

2.3 ‘恨天高’大叶榉抗旱性综合评价

2.3.1 ‘恨天高’与普通大叶榉的抗旱性综合评价 通过对大叶榉的 Rec、MDA、WSD、Pro、SOD 等 8 项生理指标的抗旱性隶属函数值进行计算,并根据主成分分析结果对各指标进行合成,获得大叶榉的抗旱性综合指数(表 4)。“恨天高”的综合指数为 0.58,普通大叶榉的综合指数为 0.56,说明“恨天高”抗旱性稍强

表 4 大叶榉各抗旱性生理指标隶属函数值

供试材料	Rec	MDA	WSD	POD	SOD	Chl	Pro	SS	综合指数	排名
普通大叶榉	0.51	0.63	0.55	0.61	0.64	0.56	0.47	0.56	0.56	2
‘恨天高’	0.53	0.62	0.55	0.70	0.67	0.54	0.56	0.52	0.58	1

3 讨论

不同的植物其适应干旱胁迫的机理主要有避旱性、低水势忍耐脱水耐旱和高水势延迟脱水耐旱等 3 种。沙漠中的一些短生植物属于避旱性植物;油橄榄和无花果是低水势忍耐脱水耐旱植物^[17];黄枝槐属于高水势延迟脱水耐旱类植物^[18];大叶榉属于高水势延迟脱水耐旱类植物,主要通过加快植株叶片衰老致死脱落而降低叶面积的方法来减少水分损失从而适应干旱胁迫的恶劣环境。

细胞渗透调节物质如 Pro 含量和 SS 含量在干旱胁迫的耐受范围内呈逐渐上升趋势,超出耐受范围就呈下降趋势^[19]。本研究发现,随着干旱胁迫的加剧普通大叶榉和“恨天高”的 Pro 含量都呈逐渐增加趋势,说明干旱胁迫处理可以促进大叶榉游离 Pro 的积累。这与范苏鲁等^[20]关于在大丽花的抗旱性研究结果一致。但本研究表明,“恨天高”在干旱胁迫试验中,SS 含量一直呈上升趋势,而普通大叶榉则在重度干旱胁迫下出现下降趋势,说明“恨天高”对于干旱的耐受性比普通榉树强。赵湘等^[21]在研究生长调节剂对榉树生长特性时发现 Chl 能够为植物的生长提供原动力,能够促进 SS 的合成从而可以增加其抗旱性。本试验中大叶榉的 Chl 含量在整个胁迫过程中先增加后减少的变化趋势,则可能是 SS 含量受到 Chl 的影响,导致普通大叶榉的 SS 含量出现先上升后下降的原因。王东清等^[22]关于罗布麻抗旱性时发现,随着干旱胁迫的加剧保护酶活性如 POD 活性和 SOD 活性变化趋势均先升高后降低,在大叶榉中也得到了类似的结果。同时发现同等干旱胁迫处理下“恨天高”POD 活性均大于普通大叶榉。

Li 等^[23]发现在干旱胁迫下能导致植物的光合作用减弱和叶片含水量下降,光合作用减弱会导致叶片 Chl 含量下降,而叶片含水量引起单位鲜重的 Chl 含量相对升高,过度缺水会降解叶片中的 Chl,但适度的干旱能刺激叶片 Chl 含量增加。这与本试验中发现大叶榉 Chl 含量在 LD 处理下均有所增加但随着胁迫程度的加剧 Chl 含量呈下降趋势的结论一致,这

于普通大叶榉。

2.3.2 ‘恨天高’与常用景观绿化树种的抗旱性综合评价 参考李禄军等^[16]的研究结果,根据供试材料其抗旱性综合指数值(I)划分, $1 \geq I \geq 0.6$,高度抗旱, $0.6 \geq I \geq 0.4$,中度抗旱; $0.4 \geq I \geq 0.2$,弱抗; $I \leq 0.2$,不抗旱。而“恨天高”其隶属函数值属于中度抗旱,且与侧柏等的抗旱程度等同。

表明在日常灌溉时若能使植株保持适度干旱则能使得植株 Chl 含量稳定甚至增加,从而有利于植株的生长代谢。另外,本试验发现,在重度干旱胁迫持续 60 d,供试材料的植株叶片均干枯脱落,再对其进行复水处理时发现,“恨天高”长出新叶的速度要明显快于普通大叶榉,也可从另一个侧面说明“恨天高”的抗旱能力要强于普通大叶榉。在试验期间也发现随着干旱胁迫的持续时间加长和胁迫程度的加剧,两种供试材料的叶片颜色均比其对照要黄,但是持续的干旱胁迫是否有利于大叶榉秋色叶变黄及其中具体生理变化还有待进一步研究。且相关研究表明,脱落酸^[24]、内生真菌^[25]等物质可适当提高植物的抗旱能力,这些物质对大叶榉是否也有类似的作用,还有待进一步的研究。

4 结论

(1)Rec、MDA、WSD、Pro 和 POD 这 5 个生理指标的含量变化与大叶榉的抗旱性密切相关,可以作为大叶榉抗旱性评价指标。

(2)通过对大叶榉的 8 项抗旱生理指标的隶属函数值进行计算,以及与主成分分析结果对各指标进行合成的综合指数表明,“恨天高”(0.58)的抗旱性稍强于普通大叶榉(0.56)。

(3)“恨天高”其抗旱能力与侧柏等景观绿化树种相当,从抗旱性来看符合城市景观绿化及高速公路绿化的应用要求。

参考文献:

- [1] 冯慧芳,薛立,任向荣,等. 4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报,2011,31(2):371-382.
- [2] Sun F L, Guo G H, Du J K, et al. Whole-genome discovery of miRNAs and their targets in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. BMC Plant Biology, 2014, 14: 142.
- [3] Farman A, Asghari B, Aliya F. Recent methods of drought stress tolerance in plants [J]. BMC Biotechnology, 2017, 82 (3): 363-375.
- [4] Forni, C, Duca, D, Glick, B R. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria[J]. Plant and Soil, 2017, 410(1/2): 335-356.

- [5] 金晓玲,汪晓丽,刘雪梅,等. 桦树新品种‘恨天高’[J]. 林业科学,2016,52(4):147.
- [6] 陈学斌. 不同播种量对桦树生长影响的探讨[J]. 中国林业产业,2017,16(3):388-389.
- [7] 钟飞霞. 桦树无性繁殖技术研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2010.
- [8] 刘雪梅,胡希军,罗雪梅,等. 桦树秋季叶色变化类型和生长特性[J]. 经济林研究,2014,32(1):121-125,179.
- [9] 刘侃诚,许伟,郁世军,等. 防治桦树枯萎病室内杀菌剂的筛选[J]. 林业科技开发,2015,31(2):127-129.
- [10] 汪晓丽,谭彦,伍江波,等. 大叶桦幼苗对 NaHCO_3 胁迫的生理响应[J]. 江苏农业学报,2016,32(2):448-453.
- [11] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2012.
- [12] 赵晶怡. 9 种园林树木抗旱性生理指标的测定及评价[D]. 山西 临汾:山西师范大学,2012.
- [13] 汪晓丽. 大叶桦新品种‘恨天高’对盐碱胁迫的生理生化响应[D]. 长沙:中南林业科技大学,2016.
- [14] Li Y, Liu S, Xu L. Efficiency evaluation method for product cooperative development based on grey incidence analysis and DEA [C]// IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics Conference Proceedings. San Diego, CA: IEEE, 2014:1670-1674.
- [15] 胡宏远,王振平. 干旱胁迫对赤霞珠葡萄叶片水分及叶绿素荧光参数的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(4):124-130.
- [16] 李禄军,蒋志荣,李正平,等. 3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究,2006,13(6):253-254,259.
- [17] 户连荣,郎南军,郑科. 植物抗旱性研究进展及其发展趋势[J]. 安徽农业科学,2008,36(7):2652-2654.
- [18] 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.
- [19] 李州,王晓娟,彭丹丹,等. Na^+ 对水分胁迫下白三叶抗氧化防御和有机渗透调节物质的影响[J]. 草业学报,2014,23(5):175-183.
- [20] 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.
- [21] 赵湘,李超,芦建国. 2 种植物生长调节剂对桦树容器苗生理特性的影响[J]. 浙江林业科技,2015,35(1):23-29.
- [22] 王东清,李国旗,苏德喜. 干旱胁迫对两种罗布麻渗透调节物质积累和保护酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(12):177-181.
- [23] Li Y F, Zheng Y, Jagadeeswaran G, et al. Characterization of small RNAs and their target genes in wheat seedlings using sequencing-based approaches [J]. Plant Science, 2013, 203(10): 17-24.
- [24] 曹家佳,吕滢,胡博,等. 花生响应水分胁迫过程中叶片 AhCYP707A1 蛋白和 ABA 分布的变化[J]. 植物生理学报,2016,52(4):436-444.
- [25] Zhang Y, Yao Q, Li J, et al. Contributions of an arbuscular mycorrhizal fungus to growth and physiology of loquat (*Eriobotrya japonica*) plants subjected to drought stress [J]. Mycol Progress, 2015, 14(10): 14-84.
- [11] 云雅如,方修琦,王媛,等. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景[J]. 自然资源学报,2005,20(5):697-705.
- [12] 刘正茂. 近 50 年来挠力河流域径流演变及驱动机制研究[D]. 长春:东北师范大学,2012.
- [13] 刘贵花. 三江平原挠力河流域水文要素变化特征及其影响研究[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2013.
- [14] 宋晓林. 1950s 挠力河流域径流特征变化及其影响因素[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2012.
- [15] 聂娟,孙瑞志,曹振丽,等. 精准农业信息物理融合系统的事件模型研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):285-291.
- [16] 刘焱选,白慧东,蒋桂英. 中国精准农业的研究现状和发展方向[J]. 中国农学通报,2007,23(7):577-582.
- [17] 程涛,崔英,鱼京善,等. 全国水资源分区社会经济及用水量数据汇总系统设计与实践[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(5):515-522.
- [18] 陈彦,吕新. 基于模糊 C—均值聚类法的绿洲农田精确管理分区研究[J]. 生态学报,2008,8(7):3067-3074.
- [19] 郭燕,田延峰,吴宏海,等. 基于多源数据和模糊 K—均值方法的农田土壤管理分区研究[J]. 土壤学报,2013,50(3):441-447.
- [20] 周浩,雷国平,张博,等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J]. 农业工程学报,2015,31(1):272-280.
- [21] Chen Y M, Li X, Liu X P, et al. An agent-based model for optimal land allocation (AgentLA) with a contiguity constraint [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(8): 1269-1288.
- [22] 陈逸敏,黎夏,刘小平,等. 基于耦合地理模拟优化系统 GeoSOS 的农田保护区预警[J]. 地理学报,2010,65(9):1137-1145.
- [23] 王韶华,刘文朝,刘群昌. 三江平原农业需水量及适宜水稻种植面积的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(4):50-53.
- [24] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学,1981,5(1):23-31.
- [25] 张瑞钢,莫兴国,林忠辉. 滦沱河上游山区近 50 年蒸散变化及主要影响因素分析[J]. 地理科学,2012,32(5):628-634.
- [26] 张士锋,王翠翠,孟秀敬,等. 永定河北京段蒸散发研究[J]. 地理科学进展,2013,32(4):580-586.

(上接第 279 页)