

伊犁地区 5 个引种白蜡对干旱胁迫的响应

张志刚^{1,4}, 李 斌², 史开奇², 杨建军³,
王和平³, 李 宏¹, 石海燕³

(1.新疆林科院造林治沙研究所,新疆 乌鲁木齐 830000;2.伊犁州林木良种繁育试验中心,新疆 察布查尔 835311;
3.新疆大学资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830046;4.新疆林木资源与利用国家林草局重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:为探讨伊犁地区 5 个引种白蜡的抗旱性差异,为区域化推广栽培提供理论依据,以 5 个 3 a 生引种白蜡苗木为材料,采用盆栽控水试验方法,设置 4 个水分梯度(CK、T1、T2、T3,田间持水量分别为 80%~85%、55%~60%、40%~45%、30%~35%),测定其 SOD 活性、POD 活性、MDA 含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、叶绿素含量和净光合速率(*Pn*)等指标,利用主成分分析、隶属度函数法与多元逐步回归法综合评价 5 个引种白蜡的抗旱性。结果表明:(1)干旱胁迫下脯氨酸含量、可溶性蛋白含量与对照相比显著增加,其中园蜡 1 号脯氨酸含量在 T2 处理下增加幅度最大,增加了 361.85%,鲁蜡 5 号可溶性蛋白含量的 T3 处理较对照增加了 284.87%。(2)随着干旱胁迫的增加,5 种白蜡 POD 活性不断上升,1275 在 T3 处理下较对照增加了 373.88%。5 个白蜡品种各处理组 SOD 活性相较于对照有所增加,其中金叶白蜡在 T3 处理下增加了 118.70%。金叶白蜡 MDA 含量较低且变化不显著,其余 4 个品种 MDA 含量均表现为处理组显著高于对照组。(3)5 种白蜡随干旱胁迫的增加,叶绿素含量不断降低,*Pn* 显著降低,且叶绿素与 *Pn* 极显著相关,金叶白蜡叶绿素含量在 T3 处理下降低了 55.51%,鲁蜡 5 号在 T3 处理下 *Pn* 降低了 81.08%。(4)通过主成分分析结合隶属度函数法准确评价出 5 种白蜡抗旱性强弱顺序为鲁蜡 5 号>1275>鲁蜡 6 号>园蜡 1 号>金叶白蜡。

关键词:白蜡;干旱胁迫;生理生化指标;抗旱性综合评价;伊犁
中图分类号:S792.41;Q945.78 **文献标志码:**A

Response of five introduced *Fraxinus chinensis* species to drought stress in Yili area

ZHANG Zhigang^{1,4}, LI Bin², SHI Kaiqi², Yang Jianjun³,
WANG Heping³, LI Hong¹, SHI Haiyan³

(1. Institute of Forestation and Desertification Control, Xinjiang Academy of Forestry Science, Urumqi, Xinjiang 830000, China;
2.Yili Prefecture Forest Tree Breeding Experiment Center, Qapchar, Xinjiang 835311, China;
3.College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University,Urumqi, Xinjiang 830046, China;
4.Key Laboratory of Forest Resources and Utilization in Xinjiang of National Forestry and Grassland Administration, Urumqi, Xinjiang 830020, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for future regional promotion and cultivation of *Fraxinus chinensis*, the difference of drought resistance of five introduced *Fraxinus* species in Yili was analyzed. The study used five three-year-old *Fraxinus chinensis* seedlings with four potted water control treatments of 80%~85%, 55%~60%, 40%~45%, and 30%~35% field moisture capacity as CK, T1, T2, T3. The SOD activity, POD activity, MDA content, proline content, soluble protein content, chlorophyll content, and net photosynthetic rate (*Pn*) were tested. The principal component analysis, membership function and multiple stepwise regression were used to evaluate the drought resistance of five introduced *Fraxinus chinensis* species. The results were as followes: (1) Under drought stress, proline content and soluble protein content increased significantly compared with the control. The proline

content of *Fraxinus velutina* ‘Yuanla-1’ increased by 361.85% under T2 treatment, and the soluble protein content of *F. chinensis* ‘Lula-5’ increased by 284.87% under T3 treatment. (2) With the increase of drought stress, the POD activity of five species of *Fraxinus chinensis* increased continuously, and the POD activity of ‘1275’ in T3 treatment increased by 373.88% compared with the control. Compared with the control, the activity of SOD in each treatment group of five species of *Fraxinus chinensis* increased, and that of *F. chinensis* ‘Jinye’ increased by 118.70% under T3 treatment. The MDA content of *F. chinensis* ‘Jinye’ was lower, but the change of MDA was not significant. The MDA content of four species in the treatment groups was significantly higher than that in the control group. (3) With the increase of drought stress, the chlorophyll content of five species of *Fraxinus chinensis* decreased continuously. The *Pn* decreased significantly, and the chlorophyll content was highly significantly correlated with *Pn*. The chlorophyll content of *F. chinensis* ‘Jinye’ decreased by 55.51% in T3 treatment, and the *Pn* decreased by 81.08% in *F. chinensis* ‘Lula-5’ T3 treatment. The order of drought resistance of chosen five *Fraxinus chinensis* was *F. chinensis* ‘Lula-5’ > 1275 > *F. chinensis* ‘Lula-6’ > *F. velutina* ‘Yuanla-1’ > *F. chinensis* ‘Jinye’.

Keywords: *Fraxinus chinensis*; drought stress; physiological and biochemical indexes; comprehensive evaluation of drought resistance; Yili area

干旱是一种常见的自然灾害,其对农业、林业造成的损失相当于其他自然灾害之和^[1]。近年来,全球变暖加剧了气候波动,干旱事件发生频率显著增加,在干旱半干旱区尤为明显^[2-3]。水资源短缺状况对农业、水资源、生态系统与社会经济发展造成极大冲击^[4]。越来越多的人意识到选择和引进抗旱性强的乔木营建人工林是缓解干旱区用水紧张与改善环境最经济、有效的途径^[5]。因此,在当前生态建设的要求下,引进和筛选适应当地气候、满足区域生态服务要求的乔木,研究其对干旱胁迫的生理生化响应机制,对干旱区改善生态环境与高效用水具有现实意义。

干旱对植物的伤害是复杂而多面的,不同植物应对干旱胁迫的响应机制也有所不同^[6]。叶片是植物对逆境最敏感的反应指示器^[7],植物抗旱性研究中,叶片的净光合速率、抗氧化酶系统、渗透调节物质、叶绿素含量与叶绿素荧光是重要的观测指标^[8]。干旱胁迫下,植物的水分与生理动态平衡受到干预,严重时会对植物细胞造成不可逆伤害,甚至死亡^[9]。为了减缓过量活性氧(ROS)造成的伤害,植物体会激发酶促系统提高SOD、POD、CAT等抗氧化酶活性^[10],同时会产生更多渗透调节物质,如脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖、甜菜碱等,以维持细胞膨压、降低植物细胞生理干旱程度^[11];另外,干旱导致细胞水势下降,植物为减少水分丧失而关闭气孔,使光合作用减弱^[12]。随着植物抗旱性研究的不断深入,研究者们普遍认为单一指标在抗旱性评价中具有局限性和不准确性,更倾向于多元指标综合评价法:如主成分分析法、灰色关联度法、隶属度函数法和层次分析法等^[13],其中主成分分析法结

合隶属度函数法综合评价体系较为科学、准确、全面,在抗旱性评价中应用较广^[14]。

白蜡属(*Fraxinus* L.)又名梣属,全世界有 70 余种,我国有 30 多种,种质资源非常丰富^[15]。白蜡抗逆性强,耐盐碱,耐低温,耐旱涝,形体端正、树干通直、秋叶橙黄,是优良的行道树,同时也是经济价值很高的用材树种^[16],在我国分布广泛,北方主要用作园林绿化和造林树种,以及滨海新区的重要盐碱地造林树种。新疆白蜡种质资源相对较少,南北疆主要应用大叶白蜡和本地小叶白蜡^[17]。目前白蜡的研究主要集中于栽培扦插技术、良种选育、耐盐性、抗寒性、盐碱地造林等方面,引种白蜡抗旱性研究鲜见报道。因此,本研究以 5 种 2 a 生的引种白蜡为研究对象,采用盆栽控水法,测定不同干旱梯度下各白蜡叶片的抗旱生理生化指标,并用主成分分析结合隶属度函数法对其抗旱性进行综合评价,探讨 5 种白蜡抗旱适应性主要影响指标及耐盐能力,为下一步在伊犁地区开展区域化栽培试验、良种选育工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

以山东引进的鲁蜡 5 号(*Fraxinus chinensis* ‘Lula-5’)、1275、金叶白蜡(*Fraxinus chinensis* ‘Jinye’)、鲁蜡 6 号(*Fraxinus chinensis* ‘Lula-6’)、园蜡 1 号(*Fraxinus velutina* ‘Yuanla-1’)等 5 个白蜡品种为对象,采一年生健康枝条以本地大叶白蜡为砧木进行嫁接,嫁接后立地适应生长 2 a。

试验在伊犁州林木良种繁育试验中心试验大棚里进行,2020 年 3 月底,选择长势良好、胸径、地

径一致的苗木移入聚乙烯塑料花盆(上口径40 cm、下口径30 cm、高35 cm),每盆1株,每品种60盆,共计300盆,花盆下垫塑料托盘,防止水肥流失。选择试验地土壤与羊粪5:1混合为基质,搅拌均匀,80%多菌灵消毒处理,每盆装20 kg基质,田间持水量为20%(环刀法测定)。为保证苗高一致,促进苗木最快萌芽,在苗高15 cm处截干平茬。当年7月底开始水分梯度控制,共设计4个梯度:对照(CK)、轻度干旱(T1)、中度干旱(T2)、重度干旱(T3),田间持水量分别为80%~85%、55%~60%、40%~45%、30%~35%,每处理重复8次,每天18:00称重补水,干旱试验40 d后采集相同位置的功能叶片,存于液氮罐中用于测定生理生化指标。

1.2 指标测定

叶绿素含量采用乙醇萃取法测定,MDA含量采用硫代巴比妥酸法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定,脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定,SOD活性采用氮蓝四唑法测定,POD活性采用愈创木酚法测定。使用Li-6400XT便携式光合仪(LI-COR,美国),在晴朗无云天气下,各处理选择相同位置功能叶片测定其净光合速率(P_n)。

1.3 抗旱性综合评价

1.3.1 综合指标权重 通过主成分分析计算综合指标的权重,其计算公式为:

$$W_i = p_i / \sum_{i=1}^n p_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, W_i 为第*i*个综合指标权重, p_i 为第*i*个综合指标的贡献率。

$$U(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $U(x_i)$ 表示*i*指标的耐盐性隶属度函数值, x_i 表示第*i*个指标的测定值, $x_{\min}$ 表示第*i*个综合指标的最小值, $x_{\max}$ 表示第*i*个综合指标的最大值。

1.3.2 耐盐性综合评价值

$$D = \sum_{i=1}^n [U(x_i) \cdot W_i], \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中, D 为耐盐性综合评价值。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2019记录整理数据,用SPSS 20进行主成分分析、方差分析、相关性分析及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对5种白蜡渗透调节物质的影响

与对照相比,5种白蜡各处理组可溶性蛋白含量都有所增加(图1a),其中园蜡1号、1275、鲁蜡5

号处理组较对照组显著增加($P < 0.05$)。随着干旱程度的增加,金叶白蜡、鲁蜡6号、园蜡1号与1275等可溶性蛋白含量呈先上升后下降的趋势,金叶白蜡与鲁蜡6号在T2处理下有最大值,园蜡1号与1275在T1处理下达到最大值,鲁蜡5号可溶性蛋白含量呈波动上升趋势,在T3处理下达到最大值。

5种白蜡各干旱处理组较对照组脯氨酸含量增加显著($P < 0.05$)(图1b)。随着干旱胁迫程度的增加,鲁蜡6号、园蜡1号与1275脯氨酸含量呈先上升后下降的趋势,且都在T2处理下达到最大值,金叶白蜡与鲁蜡5号脯氨酸含量呈持续上升趋势,T3处理下达到最大值。

2.2 干旱胁迫对5种白蜡MDA含量与叶绿素含量的影响

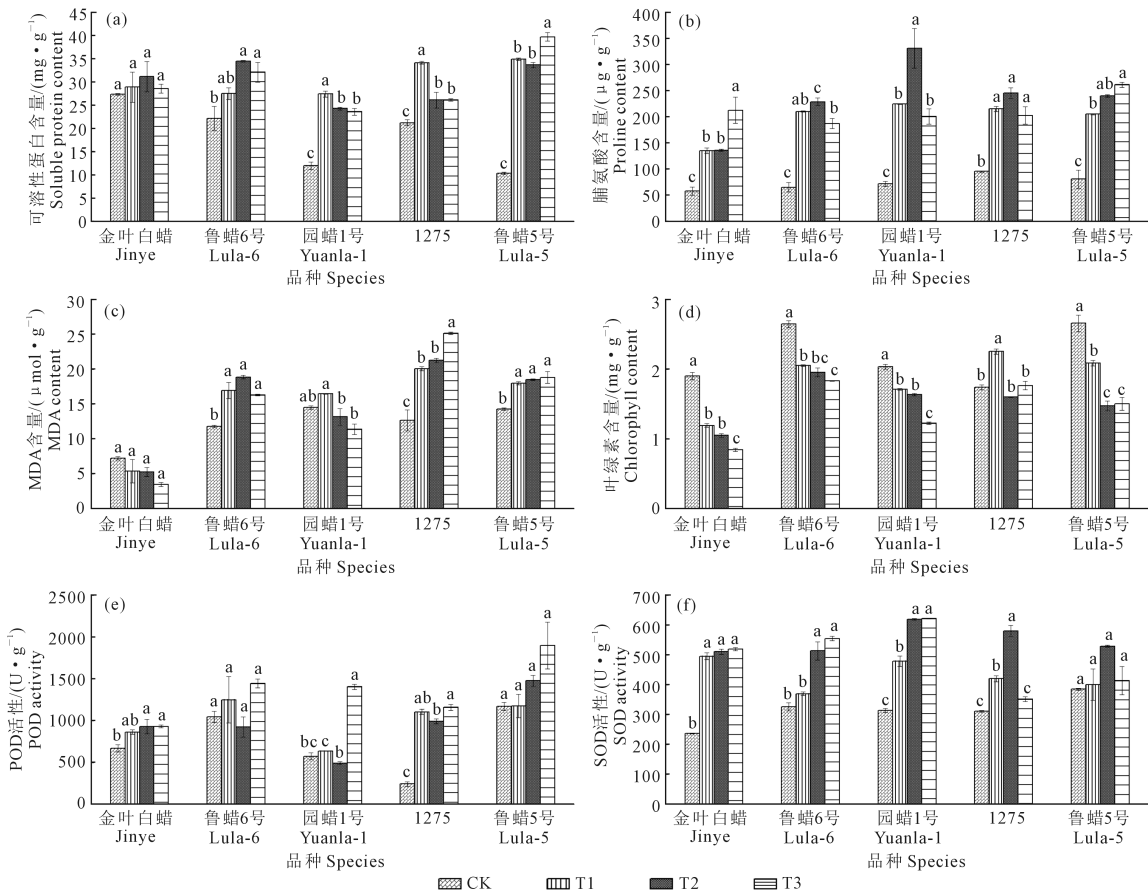
随着干旱胁迫的加深,5种白蜡MDA变化趋势各不相同(图1c),金叶白蜡MDA含量显著低于其他各品种,且对照组与各处理组间差异不显著($P > 0.05$),鲁蜡6号的MDA含量变化呈先上升后下降趋势,在T2处理下有最大值,园蜡1号在T1处理下有最大值,1275与鲁蜡5号呈不断增加趋势,T3处理下达到最大值。

与对照相比,金叶白蜡、鲁蜡6号、园蜡1号、鲁蜡5号4种白蜡各处理组叶绿素含量均显著降低($P < 0.05$),并随着干旱胁迫程度的增加呈不断降低趋势(图1d)。1275仅在T1处理时叶绿素含量显著高于对照组,其余各处理组叶绿素含量与对照无显著差异($P < 0.05$)。

2.3 干旱胁迫对5种白蜡抗氧化酶活性的影响

随着干旱胁迫程度的增强,5种白蜡POD活性总体呈不断增加趋势,且全部表现为在T3处理下达到最大值,T3处理下,金叶白蜡、园蜡1号(T2处理除外)、1275的POD活性均显著大于对照组($P < 0.05$),鲁蜡5号、鲁蜡6号的POD活性较其他品种相对较高,且各处理组间、处理组与对照组间差异均不显著(图1e)。

5种白蜡的SOD活性随干旱胁迫程度的增强总体表现为不断上升或先上升后下降2种趋势(图1f)。金叶白蜡、鲁蜡6号、园蜡1号的SOD活性随干旱胁迫程度的增强呈不断上升趋势,其中金叶白蜡和园蜡1号各处理组SOD活性显著高于对照($P < 0.05$),鲁蜡6号在T2、T3处理下SOD活性显著高于对照。1275、鲁蜡5号的SOD活性随干旱胁迫程度的增强呈先上升后下降的趋势,且都在T2处理下达到最大值,1275在T1、T2处理下与对照差异显著($P < 0.05$),鲁蜡5号各处理组、处理组与对照组间差异不显著($P > 0.05$)。



注:不同小写字母表示干旱胁迫处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among drought stress treatments ($P<0.05$).

图 1 干旱胁迫对 5 种白蜡生理生化指标的影响

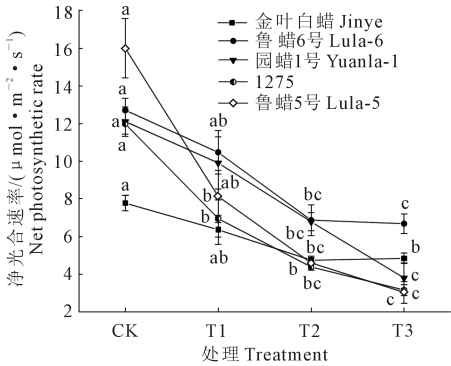
Fig.1 Effects of drought stress on physiological and biochemical indexes of five *Fraxinus* species

2.4 干旱胁迫对 5 种白蜡净光合速率(P_n)的影响

5 种白蜡净光合速率(P_n)随干旱胁迫程度的增加而降低,下降速率存在差异。如图 2 所示,与其他品种相比,金叶白蜡 P_n 较低,T2、T3 处理较对照 P_n 下降显著($P<0.05$)。鲁蜡 6 号各处理组 P_n 最大,在 T2、T3 处理下与对照达显著差异($P<0.05$),分别下降了 46.02%和 47.52%。T1 处理下园蜡 1 号 P_n 与对照差异不显著,T2、T3 处理与对照相比分别下降了 43.96%和 68.67%,差异达显著水平($P<0.05$)。1275 处理组 P_n 较对照组差异显著($P<0.05$),分别下降了 42.02%、63.49%、73.68%。鲁蜡 5 号各处理组 P_n 较对照组下降速率最显著($P<0.05$),分别达到了 49.25%、71.31%、81.12%。

2.5 5 种白蜡的抗旱性综合评价

5 种白蜡干旱胁迫下各指标相关性显示(表 1),可溶性蛋白含量与脯氨酸含量、POD 活性呈极显著正相关($P<0.01$),与叶绿素含量、净光合速率(P_n)呈极显著负相关($P<0.01$),与 SOD 活性呈显著正相关($P<0.05$)。MDA 含量与脯氨酸含量、叶绿素含量呈极显著正相关($P<0.01$),与 POD 活性



注:不同小写字母表示 5 种白蜡间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the five species of *Fraxinus chinensis* ($P < 0.05$).

图 2 干旱胁迫对 5 种白蜡净光合速率的影响

Fig.2 Effects of drought stress on net photosynthetic rate of five *Fraxinus* species

显著相关($P<0.05$)。脯氨酸含量与 POD、SOD 活性间的正相关性分别达到了显著($P<0.05$)与极显著($P<0.01$)水平,与叶绿素含量、 P_n 间的负相关性分别达到了显著($P<0.05$)与极显著($P<0.01$)水平。

叶绿素含量与 Pn 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 SOD 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$)。SOD 活性、POD 活性与 Pn 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。综上所述,不同干旱胁迫处理下,5 种白蜡光合及各生理指标间变化过程复杂,存在极大的共线性,因此,采用多指标综合评价 5 种白蜡抗旱性更加科学准确。

对 5 种白蜡 7 个抗旱性指标进行主成分分析,提取出 3 个主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 及其特征值,如表 2 所示,其累计贡献率为 80.75%,表明可将 7 个指标转换为 3 个综合指标。 F_1 载荷最高的是脯氨酸含量、SOD 活性,说明 F_1 与脯氨酸含量与 SOD 活性联系紧密,叶绿素含量、 Pn 次之; F_2 主要受可溶性蛋白含量、POD 活性、 Pn 影响; F_3 与 MDA 含量和叶绿素含量紧密相关。

对 5 种白蜡不同干旱胁迫下 7 个原始变量值进行标准化处理,根据各主成分特征值与 7 个原始变量值的乘积累加计算出 5 种白蜡在不同干旱胁迫处理下 F_1 、 F_2 、 F_3 所代表的综合指标值,以相对贡献率为权重,根据公式(1)~(3),计算出各综合指标隶属度函数值并累计求和,得到抗旱性综合指数,该

指数越大,抗旱性越强。对 5 种白蜡不同干旱胁迫下的抗旱性综合指数取均值,结果如表 3 所示,金叶白蜡、鲁蜡 6 号、园蜡 1 号、1275、鲁蜡 5 号抗旱性综合指标数分别为 1.20、1.80、1.60、1.87、2.03,抗旱能力表现为:鲁蜡 5 号>1275>鲁蜡 6 号>园蜡 1 号>金叶白蜡。

3 讨 论

伊犁地区位于西天山东段,降雨丰沛、土地肥沃,素有“塞外江南”之称,气候特征优于新疆其他地区,与引种原产地最为接近,这为引种提供了先决条件。同时伊犁地区又与新疆其他地区存在一定共性,如蒸发量大,季节性干旱,土壤盐渍化,冬季气候寒冷,夏季炎热,可作为绝佳的引种试验基地。水分是植物分布、发育、生长最显著的影响因素之一,长时期的大气干旱、土壤干旱会导致植物水分亏缺,限制植物各阶段的生长发育,而植物叶片是植物应对干旱响应最敏感的器官,不仅会导致叶片形态发生改变,还会影响光合作用、呼吸作用、渗透调节、蛋白合成、酶的分解合成与物质运输^[18-20]。

表 1 干旱胁迫下 5 种白蜡光合及生理生化指标的相关性

Table 1 Correlation of photosynthetic, physiological and biochemical indexes of five <i>Fraxinus</i> species under drought stress							
项目 Item	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	MDA 含量 MDA content	脯氨酸含量 Proline content	叶绿素含量 Chlorophyll content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	净光合速率 Net photosynthetic rate
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	1.000						
MDA 含量 MDA content	0.171	1.000					
脯氨酸含量 Proline content	0.509**	0.415**	1.000				
叶绿素含量 Chlorophyll content	-0.331**	0.413**	-0.329*	1.000			
SOD 活性 SOD activity	0.271*	-0.033	0.649**	-0.528**	1.000		
POD 活性 POD activity	0.424**	0.326*	0.280*	-0.014	0.247	1.000	
净光合速率 Net photosynthetic rate	-0.615**	-0.089	-0.570**	0.671**	-0.466**	-0.336**	1.000

注: ** 表示极显著相关 ($P<0.01$); * 表示显著相关 ($P<0.05$)。
Note: ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$), and * represents significant correlation ($P<0.05$).

表 2 干旱胁迫下 5 种白蜡 7 个指标的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of seven indexes of five <i>Fraxinus</i> species under drought stress									
指标 Index	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	可溶性蛋白含量 Soluble protein content /(mg · g ⁻¹)	MDA 含量 MDA content /(μmol · g ⁻¹)	脯氨酸含量 Proline content /(μg · g ⁻¹)	叶绿素含量 Chlorophyll content /(mg · g ⁻¹)	SOD 活性 SOD activity /(U · g ⁻¹)	POD 活性 POD activity /(U · g ⁻¹)	净光合速率 Net photosynthetic rate /(μmol · m ⁻² · s ⁻¹)
F_1	45.35	45.35	0.26	0.17	0.85	-0.54	0.87	0.03	-0.55
F_2	23.36	68.70	0.83	0.22	0.3	-0.26	0.09	0.77	-0.65
F_3	12.05	80.75	-0.05	0.89	0.27	0.73	-0.13	0.28	0.27

表 3 5 种白蜡抗旱性综合指数对比值

Table 3 Comprehensive evaluation on drought resistance of five *Fraxinus* species

品种 Species	处理 Treatment	F_1	F_2	F_3	U_1	U_2	U_3	综合指数 Composite index	均值 Mean
金叶白蜡 <i>F. chinensis</i> ‘Jinye’	CK	-3.45	-1.71	-1.31	0.13	0.27	0.39	0.79	1.20
	T1	0.47	-0.09	-2.70	0.65	0.47	0.12	1.24	
	T2	1.07	0.65	-3.04	0.73	0.55	0.06	1.34	
	T3	2.08	0.71	-3.34	0.86	0.56	0.00	1.42	
鲁蜡 6 号 <i>F. chinensis</i> ‘Lula-6’	CK	-4.27	-2.56	1.11	0.02	0.17	0.85	1.05	1.80
	T1	-0.94	-0.06	1.40	0.46	0.47	0.90	1.84	
	T2	1.30	1.05	0.91	0.76	0.60	0.81	2.17	
	T3	1.21	1.63	0.49	0.75	0.67	0.73	2.15	
园蜡 1 号 <i>F. velutina</i> ‘Yuanla-1’	CK	-3.81	-4.02	0.33	0.09	0.00	0.70	0.78	1.60
	T1	0.47	-0.81	0.26	0.65	0.38	0.69	1.72	
	T2	3.10	-0.43	-0.45	1.00	0.42	0.55	1.98	
	T3	2.56	1.37	-1.42	0.93	0.64	0.37	1.93	
1275	CK	-2.97	-3.41	-0.62	0.20	0.07	0.52	0.79	1.87
	T1	0.11	1.09	1.75	0.60	0.61	0.97	2.18	
	T2	2.58	1.10	0.64	0.93	0.61	0.76	2.30	
	T3	0.43	1.32	1.63	0.65	0.63	0.95	2.23	
鲁蜡 5 号 <i>F. chinensis</i> ‘Lula-5’	CK	-4.45	-4.02	1.91	0.00	0.00	1.00	1.00	2.03
	T1	-0.17	1.06	1.29	0.57	0.60	0.88	2.05	
	T2	2.44	2.70	0.36	0.91	0.80	0.70	2.41	
	T3	2.23	4.43	0.80	0.88	1.00	0.79	2.67	

干旱条件下植物体内活性氧 (ROS) 平衡被打破,大量的活性氧堆积会导致膜脂过氧化、生物分子功能破坏、膜相变等不可逆伤害。植物在长期的适应逆境进化过程中,形成了完善而复杂的由酶与非酶类组成的抗氧化防御系统,以此清除植物体内活性氧 (ROS)^[21]。SOD、POD 与 CAT 是目前广泛研究的抗氧化酶,它们共同作用能将 O_2^- 、 $\cdot OH$ 先转化为 H_2O_2 ,再将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 而完成清除^[22]。研究发现,随着干旱胁迫的增加,5 种白蜡 POD 活性不断上升,在重度干旱胁迫下有最大值,表明参试白蜡在干旱胁迫条件下,随着白蜡体内 POD 活性的上升,POD 清除活性氧 (ROS) 的累计阈值也随之增大,一定干旱程度内 POD 活性的增加为植株抗旱提供了保障,这与沙生怪柳干旱胁迫下 POD 活性的变化趋势一致^[22]。金叶白蜡、鲁蜡 6 号、园蜡 1 号等 3 种白蜡 SOD 活性随干旱胁迫增加而不断上升,说明这 3 种白蜡 SOD 酶可调节范围较大,对活性氧的清除能力较强,1275、鲁蜡 5 号 SOD 活性随干旱胁迫程度的增加先上升后下降,在中度胁迫下达到最大值,重度干旱胁迫下酶活性开始下降,说明此时已超过其可调节范围,这与栓皮栎、红皮云杉与嫩江云杉研究结果一致^[23-24]。MDA 是膜脂过氧化最终产物,是细胞主要的毒害性物质之一,会抑制膜蛋白的合成。本研究中金叶白蜡 MDA 含量最少,且随干旱程度的增加,MDA 变化不显著,这与大多数研究不一致,具体原因有待进一步研

究;其余 4 种白蜡干旱胁迫下 MDA 含量显著高于对照,这与相关学者对核桃、刺槐等的研究一致^[25-26]。

植物可通过渗透调节物质来缓解植物细胞生理干旱,维持细胞膨压,降低细胞水势,从而降低干旱胁迫对细胞的影响^[27]。目前渗透调节物质中脯氨酸与可溶性蛋白是研究最多的^[28]。本研究中,5 种白蜡干旱胁迫下脯氨酸含量、可溶性蛋白含量与对照相比都有显著增加,其中金叶白蜡、鲁蜡 5 号脯氨酸含量保持持续上升,其余 3 个品种脯氨酸变化趋势为先上升后下降,在中度干旱处理时有最大值,鲁蜡 5 号可溶性蛋白含量随干旱胁迫增加呈持续上升趋势,其余 4 个品种表现为先上升后下降的趋势,由此可以看出,鲁蜡 5 号在干旱胁迫下的渗透调节能力较其他品种具有优势。

植物叶片中含有大量的叶绿素,叶绿素含量的多少直接决定植物的光合作用能力,不同植物干旱胁迫对叶绿素响应不同,部分研究表明适当的干旱可提高植物叶绿素相对含量^[29],大多数研究认为随着干旱程度的增加,叶绿体结构被破坏、叶绿素膜相变,将显著降低叶绿素含量^[30]。本研究中 5 种白蜡随干旱胁迫的增加其叶绿素含量不断降低,与大多数研究结果一致。国内外学者一致认为干旱胁迫会抑制植物净光合速率 (P_n),但不同植物干旱条件 P_n 下降机理存在差异,抗旱能力强的植物在干旱条件下普遍能维持相对较高的 P_n 。本研究中 5 种白蜡 P_n 随着干旱胁迫的增加而显著降低,各品

种间降低速率略有差异,与红砂、杜仲等随干旱胁迫 P_n 变化趋势一致^[31-32]。

植物的抗旱性是自身遗传物质对外界环境的适应表现,受多种因素共同影响,单一指标评价植物抗旱性是片面的、不准确的^[33]。因此利用主成分分析法对全部指标提取公因子并确定权重,再结合隶属度函数分析法进行综合评价,能够更准确地反映不同白蜡耐旱性实际情况,最终确定5种白蜡实际抗旱性大小为:鲁蜡5号>1275>鲁蜡6号>园蜡1号>金叶白蜡。

4 结 论

研究表明,干旱胁迫会导致伊犁地区5个引种白蜡MDA升高、叶绿素含量降低、净光合速率下降,细胞脯氨酸含量与可溶性蛋白含量增加。通过主成分分析法结合隶属度函数法准确评价出5种白蜡抗旱性强弱顺序为鲁蜡5号>1275>鲁蜡6号>园蜡1号>金叶白蜡。

参 考 文 献:

- [1] 党云萍,李春霞.干旱胁迫下八棱海棠中丙二醛及质膜透性的变化[J].北方园艺,2012,(21):33-35.
DANG Y P, LI C X. Changes of the relative conductivity and MDA in *Malus robusta* under drought stress [J]. Northern Horticulture, 2012, (21): 33-35.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013-the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 89-99.
- [3] BETTS R A, COX P M, LEE S E, et al. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations [J]. Nature, 1997, 387(6635): 796-799.
- [4] 苏宏新,李广起.基于SPEI的北京低频干旱与气候指数关系[J].生态学报,2012,32(17):5467-5475.
SU H X, LI G Q. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475.
- [5] 陈红林,林强,张群,等.不同品系花椒幼苗抗旱性研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):8-15.
CHEN H L, LIN Q, ZHANG Q, et al. A study on drought resistance of seedlings of different *Zanthoxylum bungeanum* strains [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 8-15.
- [6] 吴晓凤,倪沛,杨涛,等.10种菊科植物的抗旱性与抗盐性评价[J].生态学杂志,2018,37(7):1959-1968.
WU X F, NI P, YANG T, et al. Evaluation of drought and salt resistance of 10 species from Asteraceae [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 1959-1968.
- [7] RAMACHANDRA REDDY A, CHAITANYA K V, VIVEKANANDAN M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants [J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11): 1189-1202.
- [8] RYAN M G. Tree responses to drought [J]. Tree Physiology, 2011, 31

- (3): 237-239.
- [9] 刘祖祺,张石城.植物抗性生理学[M].北京:中国农业出版社,1994: 68-75.
LIU Z Q, ZHANG S C. Plant resistance physiology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994: 68-75.
- [10] MCMICHAEL B L, ELMORE C D. Proline accumulation in water stressed cotton leaves [J]. Crop Science, 1977, 17(6): 905-908.
- [11] BLUM A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production [J]. Plant, Cell & Environment, 2017, 40(1): 4-10.
- [12] DOUNAVI A, NETZER F, CELEPIROVIC N, et al. Genetic and physiological differences of European beech provenances (*F. sylvatica* L.) exposed to drought stress [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 361: 226-236.
- [13] SIO-SE MARDEH A, AHMADI A, POUSTINI K, et al. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions [J]. Field Crops Research, 2006, 98(2/3): 222-229.
- [14] CHEN X J, MIN D H, YASIR T A, et al. Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD) [J]. Field Crops Research, 2012, 137: 195-201.
- [15] 燕丽萍.白蜡种质资源收集评价与创新利用[D].北京:农业大学,2015.
YAN L P. The collection, evaluation, innovation and utilization of germplasm resources in *Fraxinus* [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [16] 郑尧.乌鲁木齐市别墅区植物造景研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
ZHENG Y. The study of landscape planting of villa in Urumqi [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [17] 景宜,胡月,李岚,等.北疆城市居住小区植物配置调查研究——以乌鲁木齐为例[J].中国园艺文摘,2017,33(5):59-62.
- [18] JING Y, HU Y, LI L, et al. Investigation on plant allocation in urban residential areas in northern Xinjiang—a case study of Urumqi [J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2017, 33(5): 59-62.
- [19] FLEXAS J, MEDRANO H. Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited [J]. Annals of Botany, 2002, 89(2): 183-189.
- [20] SOUZA R P, MACHADO E C, SILVA J A B, et al. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51(1): 45-56.
- [21] LUKOVIĆ J, MAKSIMOVIĆ I, ZORIĆ L, et al. Histological characteristics of sugar beet leaves potentially linked to drought tolerance [J]. Industrial Crops and Products, 2009, 30(2): 281-286.
- [22] CHAVES M M, MAROCO J P, PEREIRA J S. Understanding plant responses to drought- from genes to the whole plant [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 239-264.
- [23] 夏青芳.水分胁迫对3种植物的生理和生长影响研究[D].长沙:中南林业科技大学,2017.
XIA Q F. The research on the effect of water stress on the physiology and growth of 3 plants [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.
- [24] 吴敏,张文辉,周建云,等.干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J].生态学报,2014,34(15):4223-4233.

