

10 个羊蹄甲优良家系抗旱性研究

魏丹^{1,2}, 胡柔璇², 赵庆^{1,2}, 唐洪辉^{1,2*}

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520; 2. 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要: 试验以 10 个羊蹄甲优良家系为材料, 采用自然干旱的方式, 分别在干旱 0、3、6、9 d 测定相关的叶片生理指标, 包括超氧化物歧化酶(SOD)活性、相对电导率和叶绿素含量, 运用主成分分析和聚类分析, 评价干旱胁迫对羊蹄甲生理指标的影响, 为羊蹄甲抗旱栽培提供理论依据, 同时筛选出抗旱性优良的家系。结果表明, NX07 的抗旱性比其他家系强, LKY01 的综合抗旱能力最差; 10 个羊蹄甲家系从强到弱分成 4 类, 抗旱性强的羊蹄甲有 NX07、NX05、DNS21、DNS11, 抗旱性较强的羊蹄甲只有 1 种, 为 DNS14, 抗旱性中等羊蹄甲有 DNS34、NX08、NX04、DNS16, 抗旱性弱的羊蹄甲有 LKY01。

关键词: 羊蹄甲; 干旱胁迫; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: S722.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2017)05-0130-07

Drought Resistance of 10 *Bauhinia purpurea* Families

WEI Dan^{1,2}, HU Rou-xuan², ZHAO Qing^{1,2}, TANG Hong-hui^{1,2*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou, Guangdong 510520, China;
2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract: Seedlings of 10 superior clones of *Bauhinia purpurea* were subject to naturally drought stress. Physiological indexes were measured at 0 d, 3 d, 6 d and 9 d, such as superoxide dismutase (SOD) activity, relative conductivity and chlorophyll content. The principal component analysis and system clustering analysis were adopted to comprehensively evaluate the drought tolerance capability. The principal component analysis indicated that clone NX07 had the strongest drought-tolerance capability, while LKY01 was poor in drought tolerance. Ten clones were classified into four categories according to their drought resistance capability: the strongest (NX07, NX05, DNS21, and DNS11), strong (DNS1), moderate (DNS34, NX08, NX04 and DNS16), and weak (LKY01) drought tolerance group.

Key words: *Bauhinia purpurea*; drought stress; principal component analysis; system clustering analysis

羊蹄甲 (*Bauhinia purpurea*) 因适生性强, 速生, 秋冬开花, 花期较长, 花形优美, 常作为行道树, 在广东、广西、福建等地的公园和街道绿化中广泛应用^[1-2]。该植物性喜温暖、湿润、阳光充足的环境, 要求肥沃而排水良好的沙质土壤, 春夏季喜水分充足、湿度大, 秋冬季宜稍干燥。由于全球气候变化引起极端的天气频频发生, 引起的干旱环境对植物的生

长发育产生胁迫^[3], 研究不同程度的干旱胁迫对羊蹄甲生理生化的影响对其栽培和应用有实际意义。目前, 对羊蹄甲属植物的干旱研究主要为灌木小马鞍羊蹄甲 (*Bauhinia faberi* var. *microphylla*) 在干旱胁迫的生物动态变化、生长机理上和环境适应有一些研究, 羊蹄甲在干旱胁迫条件下相关生理响应的研究较少^[4-6]。本研究在广东地区羊蹄甲优树调

收稿日期: 2016-11-24 修回日期: 2017-05-05

基金项目: 广东省科技计划项目“羊蹄甲属观花树种种质资源鉴别与高效快繁技术研究”(503304254086); 广东省林业科技创新专项资助项目“羊蹄甲属景观树种优良品系选育研究”(2013KJCX005-01)。

作者简介: 魏丹, 女, 硕士, 园林高级工程师, 研究方向: 园林植物培育与推广。E-mail: 13168613@qq.com

*通信作者: 唐洪辉, 男, 学士, 林业教授级高级工程师, 研究方向: 园林植物培育与推广。E-mail: 787226271@qq.com

查测定基础上,筛选出10个观赏价值高的优良家系,对每个家系采种育苗并开展干旱胁迫试验,通过小苗保护酶、渗透调节及叶绿素含量等生理指标的变化,筛选出抗旱性较强的家系,探讨羊蹄甲抗旱机理,以为羊蹄甲节水栽培技术提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与处理

2015年在广州、韶关、肇庆等地进行羊蹄甲优良单株调查评价,采集优良单株种子,对不同优良单株进行编号标记,选择优良单株种子在广东省林业科学研究院苗圃进行分种源育苗。苗圃地位于广州市,处于亚热带季风气候区,年平均温度为21.8℃,温度最高的月份为8月,最低为1月,平均相对湿度77%,年均降雨量1899.8mm,集中在4—10月。广州市会出现雨水集中在某一短时段,也可能出现较长时间无雨的干旱期。如广州在1977年秋季总降水量偏多,但是92d里有77d无雨,有3d出现大暴雨,既有干旱又有水涝的情况^[7]。

表1 羊蹄甲的基本情况

Table 1 Basic information of the *B. purpurea*

| 序号 | 家系号 | 缩写 | 来源 | 平均苗高/cm | 平均地径/cm |
|----|--------|-------|------|------------|-----------|
| 1 | 林科院 01 | LKY01 | 广东广州 | 63.14±2.50 | 0.63±0.04 |
| 2 | 南雄 04 | NX04 | 广东韶关 | 73.40±4.32 | 0.66±0.01 |
| 3 | 南雄 05 | NX05 | 广东韶关 | 61.94±0.89 | 0.56±0.05 |
| 4 | 南雄 07 | NX07 | 广东韶关 | 64.18±1.23 | 0.56±0.04 |
| 5 | 南雄 08 | NX08 | 广东韶关 | 71.60±2.95 | 0.62±0.03 |
| 6 | 大南山 11 | DNS11 | 广东肇庆 | 70.92±2.31 | 0.58±0.05 |
| 7 | 大南山 14 | DNS14 | 广东肇庆 | 61.50±3.22 | 0.51±0.03 |
| 8 | 大南山 16 | DNS16 | 广东肇庆 | 75.30±1.98 | 0.71±0.02 |
| 9 | 大南山 21 | DNS21 | 广东肇庆 | 71.28±3.00 | 0.67±0.02 |
| 10 | 大南山 34 | DNS34 | 广东肇庆 | 67.88±2.47 | 0.73±0.04 |

1.2 生理指标测定

1.2.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定 SOD活性的测定采用氮蓝四唑(NBA)光还原法^[8]。

1.2.2 相对电导率的测定 每个家系准备3份去除叶脉的叶片,每份称重0.3g,用30mL蒸馏水浸泡24h后用DDS-11AGA型数字电导仪测定液体的电导率 R_1 ,再将测定后的各样品置于100℃的沸水水浴锅中20min,冷却至室温后测定其电导率 R_2 ,通过计算 R_1 、 R_2 之间的比值得出相对电导率,用来表示质膜相对透性^[9]。

1.2.3 叶绿素含量的测定 叶绿素含量用丙酮乙醇混合液法^[10],将羊蹄甲叶片去叶脉剪成细丝,称重0.3g放到10mL容量瓶中,加入丙酮乙醇混合液定容,每个处理组做3个重复,避光浸泡提取24h后,用分光光度计分别测定645、652、663nm波长

经过在广东省林业科学研究院苗圃9个多月的栽培,进一步筛选出10个长势较好观赏性较强的优良家系,每家系选择20株进行抗旱性试验。抗旱试验在华南农业大学林学与风景园林学院楼6楼温室棚内开展,2015年12月23日将200株试验苗统一换成20cm×20cm的无纺布袋作为栽培容器,试验所用土壤选取华南农业大学树木园的花岗岩发育的赤红壤,土壤混合泥炭土2:1的比例作为栽培土,充分搅拌之后均匀地加入到无纺布袋中,每袋土量装有90%左右的容量。试验开始时测量10个羊蹄甲家系的基本生长情况(表1)。2016年1月采用自然干旱的方法对10个家系的试验苗进行控水处理,于0d对全部苗木浇透水,在试验当天7:00—8:00随机采集枝条中部成熟叶片15~20片,立即拿到室内用于测定叶绿素含量、电导率和SOD活性,记为对照,之后每隔3d测定1次,即测定的时间为0、3、6、9d,第9天时大部分苗木的叶片出现萎焉的现象,试验结束,停止采样。

下的吸光度值 A_{645} 、 A_{652} 、 A_{663} 。叶绿素含量的计算公式如下:

$$\text{叶绿素 a 含量} = 12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}$$

$$\text{叶绿素 b 含量} = 22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}$$

$$\text{叶绿素总量} = A_{652} \times 1000 / 34.5$$

1.3 统计方法

利用Excel进行试验数据处理和图表的绘制,使用SAS V8统计软件对指标的平均值进行方差分析,综合分析采用聚类分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对超氧化物歧化(SOD)活性的影响

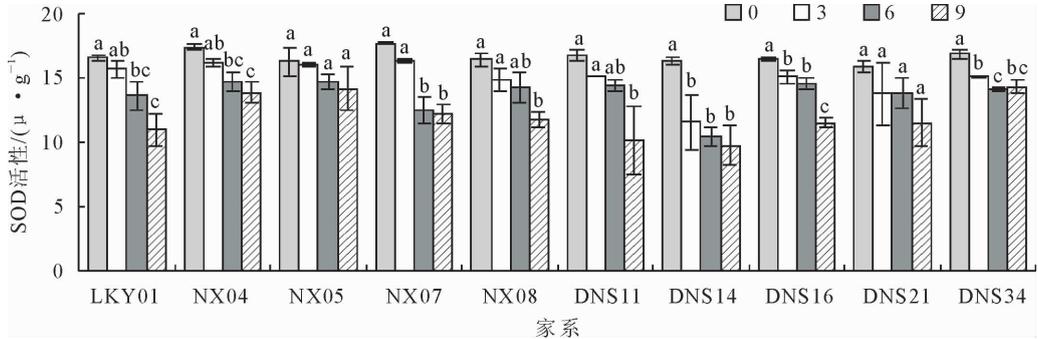
随干旱天数的增加,羊蹄甲的SOD活性呈下降的趋势(图1)。干旱3d时,DNS14、DNS16、DNS34的SOD活性比对照有显著下降,其他家系的羊蹄甲

的 SOD 活性相比如对照下降不显著。LKY01、NX04、NX07、DNS34 在干旱胁迫 6 d 时显著小于对照。NX08 在干旱 9 d 时才表现出显著差异。NX05、DNS21 的 SOD 活性在干旱时期与对照没有显著差异。

2.2 干旱胁迫对相对电导率的影响

干旱胁迫期间,10 种羊蹄甲叶片相对电导率均

持续增加(图 2)。NX08 的相对电导率从 3 d 开始有显著增高,之后不再显著增高。DNS16、DNS21、DNS34 同样在 3 d 显著大于对照。6 d 的 LKY01、NX04、DNS11、DNS14 的相对电导率显著大于对照。NX05、NX07 在干旱程度比较高的第 9 天开始大幅度地增长,显著高于其他干旱时期的相对电导率。



注:各图中相同家系上方凡标有不同字母者表示具有显著性差异($P \leq 0.05$, 邓肯检验法),下同。

图 1 羊蹄甲在干旱胁迫下的 SOD 活性

Fig. 1 Effects of drought stress on SOD activity in *B. purpurea*

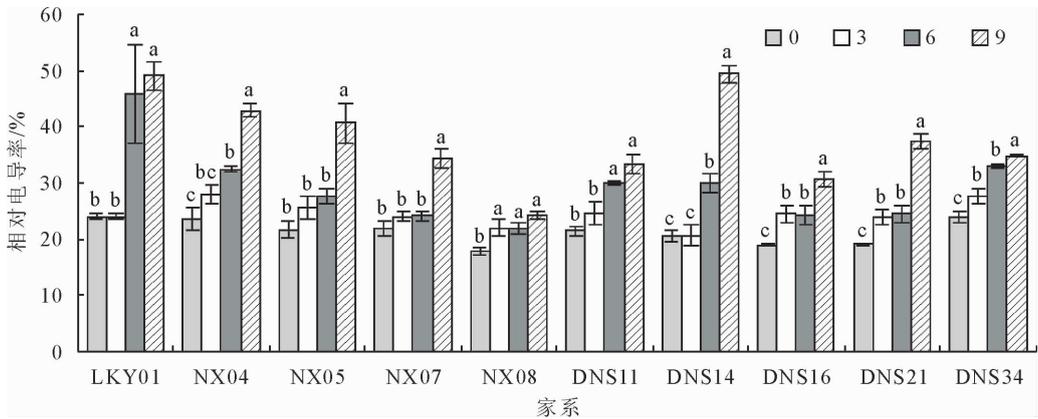


图 2 羊蹄甲在干旱胁迫下的相对电导率

Fig. 2 Effects of drought stress on relative electrical conductivity in *B. purpurea*

2.3 干旱胁迫对叶绿素的影响

2.3.1 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素 a 的影响 干旱胁迫开始之后羊蹄甲的叶绿素 a 含量持续下降(图 3),到干旱后期都达到了最小值。LKY01 在干旱 3、6 d 相对比对照都没有显著差异,到干旱 9 d 时显著降低。NX04 在干旱处理期间持续下降,与对照存在显著差异。NX07、DNS11、DNS14、DNS16、DNS21 在干旱 3 d 开始显著小于对照,NX05、NX08、DNS34 在干旱 6 d 显著小于对照。

2.3.2 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素 b 的影响 如图 4 所示,干旱期间,NX07 的叶绿素 b 整体呈下降趋势,但在 6 d 的叶绿素 b 有所增加。DNS21 在 3 d 的叶绿素 b 也有所增加,与对照相比不显著,之后开始急速下降。其他家系的羊蹄甲在干旱期间逐步降低,在第 9 天达到最小值。其中 NX04、NX08、

DNS14 的叶绿素 b 在干旱胁迫 3、6 d 和 9 d 时显著小于对照,LKY01、NX05、DNS11、DNS34 在 6 d 和 9 d 时显著小于对照,DNS16 在干旱前期的叶绿素 b 含量都没有显著差异,到 6 d 之后开始急速下降,到 9 d 显著小于其他时期的含量。

2.3.3 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素总量的影响 经不同程度干旱胁迫处理后,叶绿素总量与叶绿素 a、叶绿素 b 的变化趋势相同,即都是随着干旱程度的加深而减少。NX04、DNS14、DNS16、DNS34 在干旱初期第 3 天与对照间有了显著性差异性,除了以上 4 个家系以外其他家系的羊蹄甲没有显著地下降。而到了 6 d 时所有种类的羊蹄甲与对照相比都出现了显著地下降,干旱胁迫对叶绿素总量的影响比较明显。LKY01 到干旱后期即第 9 天时叶绿素总量急速下降,其含量比其他家系低。

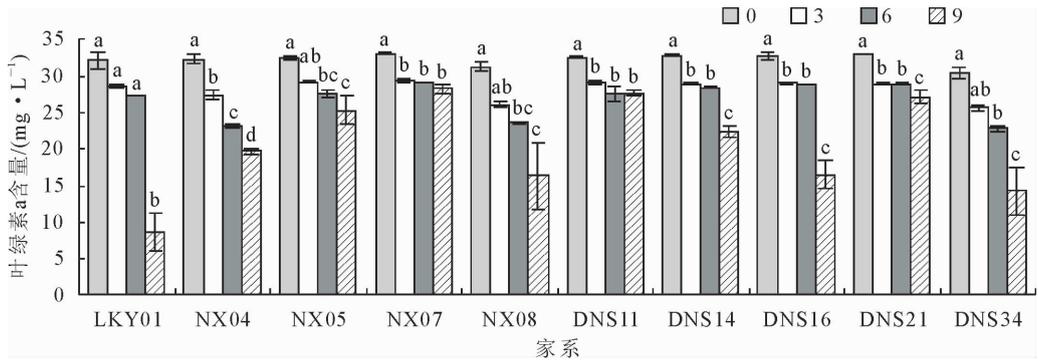


图 3 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素 a 含量的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on chlorophyll-a content in *B. purpurea*

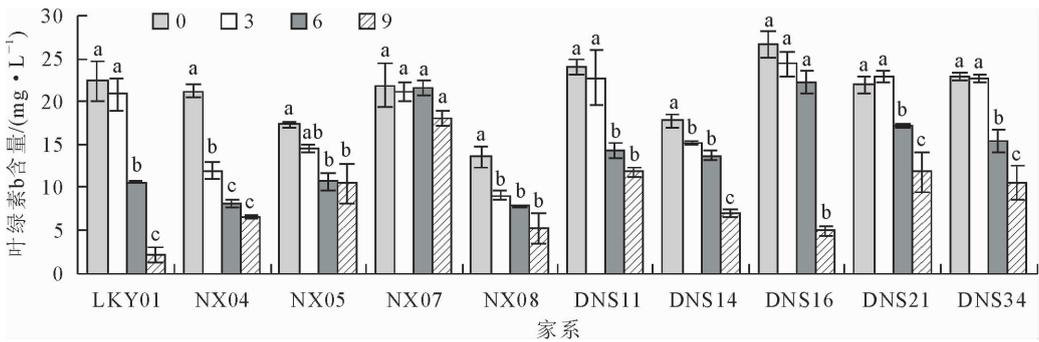


图 4 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素 b 含量的影响

Fig. 4 Effects of drought stress on chlorophyll-b content in *B. purpurea*

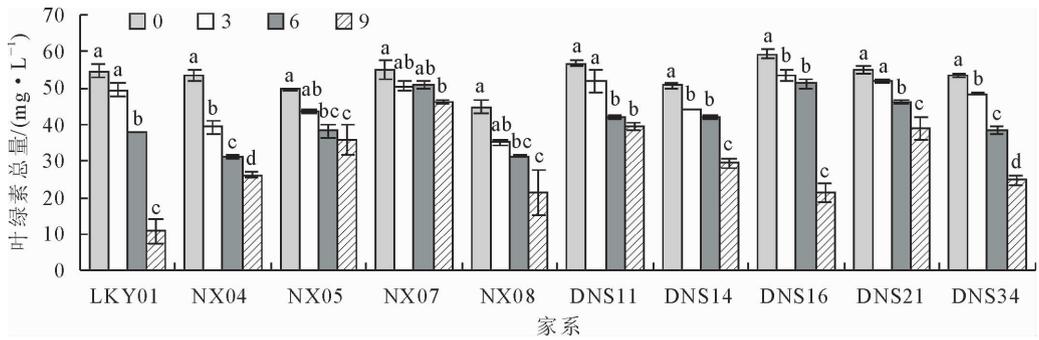


图 5 干旱胁迫对羊蹄甲叶绿素总量的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on chlorophyll content in *B. purpurea*

2.4 抗旱性综合评价

2.4.1 主成分分析 利用主成分分析法研究羊蹄甲的各种生理指标的综合抗旱能力。本研究选择羊蹄甲胁迫下 10 个羊蹄甲家系苗木 5 个生理指标的平均值为研究对象进行主成分分析,以性状累积方差贡献率达到 85% 以上确定主成分个数,通过计算重要主成分值,最后进行抗旱性排名。

由表 2 可以看出,前 2 个主成分的累积贡献率达 91.780%,基本上涵盖了 5 个指标的绝大信息,前 2 个主成分可以作为抗旱性评价的综合分析指标。

利用 SAS 计算出前 2 个主成分中各个指标对应的特征向量,并与标准化后的数据相乘,得到主成分表达式 F_1 和 F_2 ;再根据 2 个主成分的特征值计

算出主成分综合得分模型 F 如下:

$$F_1 = 0.021058X_1 + 0.021058X_2 + 0.021058X_3 + 0.577643X_4 + 0.019827X_5$$

$$F_2 = 0.621852X_1 - 0.38830X_2 + 0.390645X_3 - 0.073195X_4 + 0.551867X_5$$

$$F = 0.884F_1 + 0.116F_2$$

表 2 协方差矩阵的特征值

Table 2 The eigenvalue of covariance matrix

| 主成分 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 特征值 | 11.127 | 1.457 | 0.707 | 0.415 | 0.004 |
| 贡献率/% | 81.160 | 10.630 | 5.160 | 3.030 | 0.030 |
| 累积贡献率/% | 81.160 | 91.780 | 96.940 | 99.970 | 100.000 |

根据主成分综合得分模型以及标准化后的数

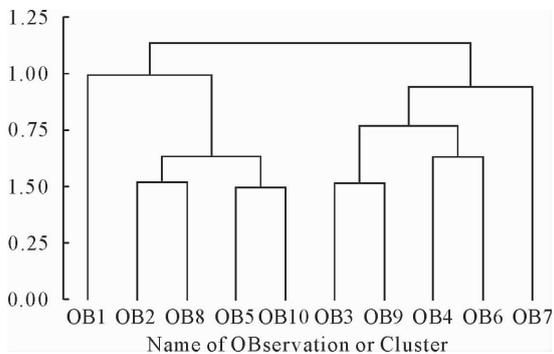
据,对羊蹄甲的抗旱性进行综合评价,结果如表 3。NX07 的综合抗旱能力最高,LKY01 的综合抗旱能力最低。

表 3 羊蹄甲的抗旱综合评价

Table 3 Comprehensive assessment values of drought resistance of the *B. purpurea*

| 种类 | F_1 | F_2 | F | 排名 |
|-------|-------|-------|-------|----|
| LKY01 | 0.346 | 0.586 | 0.374 | 10 |
| NX04 | 0.832 | 0.628 | 0.808 | 8 |
| NX05 | 1.238 | 0.694 | 1.174 | 2 |
| NX07 | 1.479 | 0.702 | 1.389 | 1 |
| NX08 | 0.827 | 0.766 | 0.820 | 7 |
| DNS11 | 1.189 | 0.543 | 1.114 | 4 |
| DNS14 | 0.974 | 0.434 | 0.911 | 5 |
| DNS16 | 0.627 | 0.619 | 0.626 | 9 |
| DNS21 | 1.211 | 0.559 | 1.135 | 3 |
| DNS34 | 0.835 | 0.857 | 0.838 | 6 |

2.4.2 聚类分析 试验对 10 种羊蹄甲家系在重度干旱胁迫下的 5 个指标数据进行了抗旱性聚类分析,可以将 10 种羊蹄甲家系的抗旱能力进行分类。结果显示,10 种羊蹄甲家系的抗旱性大致可以分为从强到弱的 4 类(图 6),第 1 类包括抗旱性强的羊蹄甲有 NX07、NX05、DNS21、DNS11;抗旱性较强的羊蹄甲只有 1 种为 DNS14;抗旱性中等羊蹄甲有 DNS34、NX08、NX04、DNS16;抗旱性弱的羊蹄甲有 LKY01。



注:图中字母 OB1~OB10 分别指 LKY01、NX04、NX05、NX07、NX08、DNS11、DNS14、DNS16、DNS21、DNS34。

图 6 羊蹄甲生理指标的聚类分析

Fig. 6 The clustering analysis of physiological indicators of the *B. purpurea*

3 结论与讨论

植物对于干旱胁迫的响应是一个涉及生物化学和生物物理学的复杂过程,其过程有显著的阶段性^[11]。植物对于干旱反应过程有适应、伤害、修复补偿甚至再伤害等不同程度的表现,植物对不同胁迫程度的反应及适应机制是不一样的^[12]。干旱条件

会破坏植物的生理代谢过程,植物体内酶合成受到影响,植物细胞结构受破坏,气孔关闭,影响气体交换速率、组织含水量、膨压和水势降低,导致光合作用停止、代谢紊乱甚至整个植物体的死亡^[11]。植物常常通过形态、渗透调节、抗氧化酶等方面的调节来适应环境胁迫^[13]。SOD 活性在抵御轻度干旱胁迫时发挥着重要作用,减少胁迫对植物的危害^[14],当胁迫程度加深,SOD 活性下降,活性氧过度累积,加剧膜脂过氧化而造成细胞膜损伤,植株遭受损害^[15]。SOD 活性的改变可以反映出植株受干旱胁迫时抵御能力,是反映植物抗旱性的一个重要指标。在受到干旱危害时,细胞膜的结构和功能首先受到伤害,细胞膜相对透性是表征细胞膜受损程度的重要指标^[16]。用电导仪测定外渗液电导率的变化,可反映出质膜受干旱胁迫伤害的程度,可以作为植物抗旱指标^[17]。逆境胁迫下植物体内活性氧的大量产生使叶绿体色素变得不稳定,在一定程度上可以反映植物的生产性能和抵抗逆境胁迫的能力,因而对其含量及其组成比例与逆境胁迫的关系有不少研究。

3.1 植物抗旱性与植物 SOD 指标之间的关系

环境对植物的生长过程有重要影响,当植物受到各种环境(如旱涝、高温、低温、病虫害和重金属离子等)的迫害时,细胞内产生大量的活性氧(reactive oxygen species,ROS),ROS 可以通过破坏核酸,氧化蛋白来影响细胞的功能,从而影响植物的正常生长^[18]。SOD 是细胞在对抗各种环境胁迫过程中重要的抗氧化酶类,是植物抑制 ROS 积累的抗氧化系统中第一个参与反应的酶,处于活性氧清除反应的核心地位^[19]。

有相关研究表明,随着干旱胁迫的加强,SOD 活性表现出先升后降的趋势,耐旱性品种比非耐旱性品种具有较高的 SOD 活性^[20-21]。孙国荣^[22]在研究白桦与保护酶活性之间关系的试验中得出 SOD 在适度胁迫下活性升高,重度胁迫时 SOD 活性显著下降的结论,提出干旱促进白桦幼苗叶片 O_2^- 的生成,诱导 SOD 活性增强。本研究结果表明,10 个羊蹄甲家系在干旱过程中 SOD 活性与对照相比,随着干旱胁迫加重基本呈下降趋势,说明羊蹄甲 SOD 的活力对水分的变化较为敏感,其中 NX05、DNS21 的下降幅度小于其他家系,表明 NX05、DNS21 较强的抗旱性可能与 SOD 在不同天数胁迫下始终保持高活性有关。

3.2 植物抗旱性与植物质膜透性指标之间的关系

在干旱胁迫下,抗旱能力好的植物叶片质膜破坏的程度相对较小,叶片膜透性变化幅度不大,相对

电导率可以反映干旱胁迫下叶片细胞膜透性的强弱程度^[23]。羊蹄甲的相对电导率随着干旱程度加深而变大, LKY01、DNS14 在 3 d 表现出了一定的抗旱能力,其电导率变化不大,而到了 6~9 d 时,这 2 个家系的电导率开始大幅度增加,说明在水分缺乏严重时对这两种材料的质膜透性影响力比其他家系大。NX07 在 6 d 时电导率增加幅度较小,仅增加了 11.1%,NX08 在 9 d 是电导率增加幅度最小,增加了 35.7%,说明这 2 个家系在水分缺乏时仍能具有一定的抗性。本次研究结果与刘成^[24]等在对玉米细胞质膜透性的研究结果相一致,刘成的试验结果表明相对电导率与植物抗旱性呈显著负相关,质膜透性变大会导致抗旱性下降。卡德尔·阿不都热西提^[25]的研究表明细胞质膜在环境胁迫下遭受破坏进而膜透性增大,保水能力越好的作物,其膜透性越小。

3.3 植物抗旱性与植物叶绿素指标之间的关系

水是植物组织中重要反应物,当植物缺失水分时,叶绿体的活力下降,叶绿素 a、b 的合成将会受到阻碍,甚至会导致叶绿素的分解^[26]。叶绿素是光合作用中最重要色素,其含量的大小直接影响植物光合作用过程中光能的吸收转化,影响植物的生长。在植物抗旱与叶绿素含量关系的研究中,不同植物在干旱条件下叶绿素含量的变化趋势不尽相同。部分研究表明干旱条件下植物叶片叶绿素含量随着土壤水分减少而下降^[27-29],另外也有研究显示,植物叶片叶绿素的含量在干旱条件下先增加后减小^[30-31]。本次研究中羊蹄甲叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素总量在干旱胁迫下的变化规律基本上呈下降趋势,叶绿素的含量变化在一定程度上反映了羊蹄甲受害程度。LKY01 的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素总量都比其他家系的羊蹄甲下降幅度大,其叶绿素含量最低,其耐旱能力较差。NX07 的叶绿素含量整体变化幅度不大,耐旱性较强。NX07 的叶片叶绿素 b 含量在 6 d 比 3 d 有上升趋势,这可能是细胞失水较多,但植物本身有较好的抗旱能力,叶绿素的含量下降幅度不大,相对水分溶解在细胞中的叶绿素含量变高。

3.4 羊蹄甲优良家系的综合评价

本试验测定了不同指标,因为植物抗旱性用单一的指标无法客观反映出,同一家系在不同抗旱指标中可能表现不同,为了让结论更为客观,采用了多指标综合分析。本试验通过主成分分析对各家系的抗旱相关指标进行综合评价,得出各家系综合抗旱能力由大到小依次为 NX07 > NX05 > DNS21 > DNS11 > DNS14 > DNS34 > NX08 > NX04 >

DNS16 > LKY01。

参考文献:

- [1] 刘粹纯,黄伟锋.羊蹄甲属乔木的文化意蕴及其园林应用[J].现代园艺,2012(4):44.
- [2] 杨之彦,冯志坚,曹忠元.羊蹄甲属观赏植物的辨别及其园林应用[J].广东园林,2011,33(1):47-51.
- [3] 曾庆平,郭勇.植物的逆境应答与系统抗性诱导[J].生命的化学(中国生物化学学会通讯),1997,17(3):33-35.
- [4] 尤琛.水分梯度上不同灌木生长对干旱河谷土壤理化和生物学性质的影响[D].成都:中国科学院研究生院(成都生物研究所),2007.
- [5] 张亚敏,马克明,李芳兰,等.干旱胁迫条件下 AMF 促进小马鞍羊蹄甲幼苗生长的机理研究[J].生态学报,2016,36(11):3329-3337.
ZHANG Y M, MA K M, LI F L, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) promotes *Bauhinia faberi* var. *microphylla* seedling growth under drought stress conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3329-3337. (in Chinese)
- [6] 黎燕琼,刘兴良,郑绍伟,等.岷江上游干旱河谷四种灌木的抗旱生理动态变化[J].生态学报,2007,27(3):870-878.
LI Y Q, LIU X L, ZHENG S W, et al. Drought resistant physiological characteristics of 4 shrub species in arid valley of Minjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 870-878. (in Chinese)
- [7] 江晓南,冯静,简茂球.用降水量和无雨日数判别广州季节性干旱的对比分析[J].广东气象,2009,31(5):4-5.
JIANG X N, FENG J, JIANG M Q. Comparative analysis of seasonal drought events in Guangzhou with precipitation and day without rain[J]. Guangdong Meteorology, 2009, 31(5): 4-5. (in Chinese)
- [8] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2002.
- [9] 李合生.现代植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [10] 张宪政.植物叶绿素含量测定-丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26-28.
- [11] 安玉艳,梁宗锁.植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J].应用生态学报,2012,23(10):2907-2915.
AN Y Y, LIANG Z S. Staged strategy of plants in response to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2907-2915. (in Chinese)
- [12] 赵丽英,邓西平,山仑.渗透胁迫对小麦幼苗生长及水分状况的影响[J].中国农学通报,2006,22(10):459-462.
ZHAO L Y, DENG X P, SHAN L. Effects of osmotic stress on water status and growth of winter wheat seedlings[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(10): 459-462. (in Chinese)
- [13] 周朝彬,宋于洋,王炳举,等.干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J].西北林学院学报,2009,24(4):5-9.
ZHOU C B, SONG Y Y, WANG B J. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 5-9. (in Chinese)
- [14] 陈善福,舒庆尧.植物耐干旱胁迫的生物学机理及其基因工程

- 研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(5): 555-560.
- CHEN S F, SHU Q Y. Biological mechanism of and genetic engineering for drought stress tolerance in plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(5): 555-560. (in Chinese)
- [15] 赵黎芳, 张金政, 张启翔, 等. 水分胁迫下扶芳藤幼苗保护酶活性和渗透调节物质的变化[J]. 植物研究, 2003, 23(4): 437-442.
- ZHAO L F, ZHANG J Z, ZHANG Q X, *et al.* Effect of water stress on activity of cell defense enzymes and osmotic adjustment in *Euonymus fortunei* young plant[J]. Bulletin of Botanical Research, 2003, 23(4): 437-442. (in Chinese)
- [16] 吉增宝, 王进鑫. 干旱胁迫对侧柏幼树某些生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 6-9.
- JI Z B, WANG J X. The effect of drought stress on some physiological characters of *Platycladus orientalis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 6-9. (in Chinese)
- [17] 范杰英. 9个树种抗旱性的分析与评价[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2005.
- [18] 窦俊辉, 喻树迅, 范术丽, 等. SOD与植物胁迫抗性[J]. 分子植物育种, 2010, 8(2): 359-364.
- DOU J H, YU S X, FAN S L, *et al.* SOD and plant stress resistance[J]. Molecular Plant Breeding, 2010, 8(2): 359-364. (in Chinese)
- [19] 王星, 刘肖飞, 周宜君, 等. 植物SOD基因表达调控的分子机制[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(2): 275-280.
- WANG X, LIU X F, ZHOU Y J, *et al.* Molecular mechanism of expression and regulation of SOD gene in plant[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(2): 275-280. (in Chinese)
- [20] 莫红, 翟兴礼. 干旱胁迫对大豆苗期生理生化特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(1): 45-48.
- MO H, ZHAI X L. Effects of drought stress on protective enzymes activities and membrane lipid peroxidation in leaves of soybean seedlings[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2007, 46(1): 45-48. (in Chinese)
- [21] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- PEI B, ZHANG G C, ZHANG S Y, *et al.* Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1386-1396. (in Chinese)
- [22] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰, 等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 165-167.
- SUN G R, PENG Y Z, YAN X F, *et al.* Effect of drought stress on activity of cell defense enzymes and lipid peroxidation in leaves of *Betula platphylla* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 165-167. (in Chinese)
- [23] 马秀芳, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 不同耐旱性玉米品种对干旱的生理生化反应[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(3): 167-170.
- MA X F, SHEN X Y, YANG D G, *et al.* The physiological and biochemical reaction to drought of different drought-tolerant maize[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(3): 167-170. (in Chinese)
- [24] 刘成, 申海兵, 石云素, 等. 开花期干旱胁迫对玉米细胞膜透性、抗脱水性和产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(3): 418-422.
- [25] 卡德尔·阿不都热西提. 干旱胁迫下不同作物品种叶片含水量的测定[J]. 喀什师范学院学报, 2009, 30(6): 50-53.
- KADIR ABDURAXIT. The drought coeres of different crops variety leaves determination of water content[J]. Journal of Kashgar Teachers College, 2009, 30(6): 50-53. (in Chinese)
- [26] 牛婷, 艾里西尔·库尔班, 玉米提·哈力克, 等. 干旱区胡杨叶片含水量和叶绿素含量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1353-1360.
- NIU T, ALISHIR KURBAN, UMUT HALIK, *et al.* Characteristics of *Populus euphratica* leaf water and chlorophyll contents in an arid area of Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1353-1360. (in Chinese)
- [27] 董守坤, 赵坤, 刘丽君, 等. 干旱胁迫对春大豆叶绿素含量和根系活力的影响[J]. 大豆科学, 2011(06): 949-953.
- DONG S K, ZHAO K, LIU L J, *et al.* Effect of drought stress on chlorophyll content and root activity of spring soybean[J]. Soybean Science, 2011(6): 949-953. (in Chinese)
- [28] 黄承建, 赵思毅, 王龙昌, 等. 干旱胁迫对苧麻叶绿素含量的影响[J]. 中国麻业科学, 2012, 34(5): 208-212.
- HUANG C J, ZHAO S Y, WANG L C, *et al.* Effect of drought stress on chlorophyll contents in ramie[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2012, 34(5): 208-212. (in Chinese)
- [29] 王新建, 何威, 杨淑红, 等. 干旱胁迫下4种楸树嫁接苗叶绿素含量的变化[J]. 经济林研究, 2008, 26(1): 20-24.
- WANG X J, HE W, YANG S H, *et al.* Changes of chlorophyll content in four kinds of *Catalpa bungei* grafting seedlings under drought stress[J]. Nonwood Forest Research, 2008, 26(1): 20-24. (in Chinese)
- [30] 赵瑾, 白金, 潘青华, 等. 干旱胁迫下圆柏不同品种(系)叶绿素含量变化规律[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 236-239.
- [31] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 干旱胁迫对小麦叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体调控[J]. 华北农学报, 2009, 24(1): 1-6.