

不同区域长柄扁桃抗旱性的研究

郭改改¹, 封斌², 麻保林², 井赵斌¹, 张应龙³, 郭春会^{1*}

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省治沙研究所, 陕西榆林 719000;

3. 神木县生态协会, 陕西神木 719399)

摘要:以采自河北、乌审旗、榆阳、神木、固阳 5 个地区的一年生长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata* Pall.) 实生苗为试材, 研究其叶片在水分胁迫下的解剖结构与生理生化特性, 来确定其抗旱性强弱。结果表明: (1) 水分胁迫后各地区长柄扁桃的叶片解剖结构存在显著性差异, 并由隶属函数法对解剖结构综合分析得出这 5 个地区长柄扁桃的抗旱性顺序为: 榆阳 > 神木 > 固阳 > 乌审旗 > 河北。(2) 随着干旱时间的延长, 各地区长柄扁桃的叶片相对含水量、质膜透性、丙二醛含量均呈上升趋势, 且抗旱性弱的值越大, 变化幅度也较大; SOD 和 POD 活性、游离脯氨酸和可溶性蛋白含量均随胁迫的加强呈先升高后降低或直接降低的趋势, 且抗旱性越强活性值或含量越高。(3) 在干旱胁迫下 Chl *a* 和 Chl *b* 都呈先升高后降低的趋势, 但 Chl *b* 对水分胁迫的反应较 Chl *a* 敏感; Car 则呈下降趋势, 其中榆阳和神木地区的长柄扁桃在胁迫 40 d 后光合色素含量均为最高。研究发现: 长柄扁桃通过调整自身的叶片结构和各项生理生化特性来减缓水分胁迫带来的伤害, 并由各项指标综合分析得出 5 个地区长柄扁桃的抗旱性顺序为: 榆阳 > 神木 > 固阳 > 乌审旗 > 河北, 为进一步的品种选育奠定了基础, 并为长柄扁桃的产业化开发提供了理论依据。

关键词: 长柄扁桃; 解剖结构; 隶属函数; 生理生化特性; 抗旱性

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2013)04-0360-10

Studies on Drought Resistance of Different Regional *Amygdalus pedunculata* Pall.

GUO Gai-Gai¹, FENG Bin², MA Bao-Lin², JIN Zhao-Bin¹, ZHANG Ying-Long³, GUO Chun-Hui^{1*}

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China; 2. Desert Control Research Institute of Shanxi Province, Yulin, Shanxi 719000, China; 3. Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shanxi 719399, China)

Abstract: *Amygdalus pedunculata* Pall. seedlings with one year of growth from Hebei, Wushenqi, Shenmu, Guyang and Yuyang regions were selected as test materials. We obtained leaf anatomical structure characteristics and physiological and biochemical characteristics under drought stress to determine drought resistance. Results showed that: (1) There were significant differences in leaf anatomical structures under water stress, and according to membership function, the sequence of drought resistance was Yuyang area > Shenmu area > Guyang area > Wushenqi area > Hebei area. (2) With the extension of stress time and degree of drought stress, leaf RWC, plasma membrane permeability and MDA showed an upward trend, and the change range of weak drought resistance was larger. Both SOD and POD activity, free proline and soluble protein content with the strengthening of stress increased first then decreased (later or directly), and the stronger the drought resistance the higher the activity or content. (3) Under water stress the contents of chlorophyll *a* and *b* also increased at first and then decreased, and the response of chlorophyll *b* to drought stress was

收稿日期: 2013-01-23, 修回日期: 2013-06-18。

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201104074); 西北农林科技大学唐仲英育种专项。

作者简介: 郭改改(1990 -), 女, 硕士研究生, 主要从事果树生理研究(E-mail: 273054548@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: 906832715@qq.com)。

more sensitive than chlorophyll *a*. But Car showed a downward trend, and among them Yuyang and Shenmu areas were highest after 40 days. By adjusting leaf structure, physiological and biochemical characteristics, *A. pedunculata* Pall. reduced the harm caused by water stress, and according to comprehensive analysis of the indicators, the sequence of drought resistance of the five regions *A. pedunculata* Pall. was Yuyang area > Shenmu area > Guyang area > Wushenqi area > Hebei area. This research lays a foundation for further breeding, and provides a theoretical basis for the industrialization development of *Amygdalus pedunculata* Pall.

Key words: *Amygdalus pedunculata* Pall.; Anatomical structure of leaf; Membership function; Physiological and biochemical characteristic; Drought resistance

长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata* Pall.), 又叫野樱桃、柄扁桃、布衣勒斯、山樱桃、苦豆子, 属多年生落叶小灌木^[1], 是我国西部干旱、半干旱地区山地和沙地良好的水土保持树种, 观赏灌木, 是育种的原始材料及嫁接繁殖普通扁桃的砧木^[2]。长柄扁桃种仁中油含量在 55% 以上, 是一种品质优良的食用油, 具有广阔的开发前景^[3]。由于长柄扁桃长期生长在西北干旱、半干旱地区, 而干旱是限制植物分布和生长的主要非生物因素^[4], 因此, 开展对长柄扁桃抗旱性的研究, 探索不同地区长柄扁桃对水分条件的适应能力, 可以为大面积的产业化开发和品种选育提供可靠的理论依据。笔者以榆林神木县锦界镇、榆阳区补浪河镇、内蒙古乌审旗、包头固阳县新建乡、河北丰宁县东卯乡这 5 个不同气候生长环境的长柄扁桃为试验材料, 采用盆栽控水法, 研究水分胁迫对不同地区长柄扁桃叶片解剖结构、渗透调节物质、保护酶活性、叶绿素含量等各生理生化指标的影响, 从而综合全面地比较不同地区长柄扁桃的抗旱性, 为长柄扁桃的合理开发、品种选育和引种栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本实验分别以采自神木县锦界镇、榆阳区补浪河镇、内蒙古乌审旗、包头固阳县新建乡、河北丰宁县东卯乡 5 个地区的一年生长柄扁桃实生苗为试材(幼苗对于干旱的反应特别敏感^[5]), 每个品种取 50 株长势基本一致的苗, 每 5 株一盆, 移栽至直径 30 cm、深 25 cm 的塑料桶。桶底斜铺碎石

子, 上面平铺一层滤纸(防止土壤渗入石子中)。沿桶壁插入一根塑料管(高度超出桶面 2~3 cm 为宜)作为灌水和通气管道(桶重 + 石子 + 滤纸 + 塑料管 = 1 kg)。每桶放入土壤 10 kg, 压实(黄绵土, 田间持水量为 20%~28%, 土壤容重为 1.0~1.3 g/cm³, pH 值为 8~8.5)。用珍珠岩覆盖来抑制土壤表面蒸发。移栽时充分灌水, 以保证苗木成活。

1.2 方法

将试验盆移入四周通风的网室防雨棚内, 于 7 月 1 日起对每个地区的长柄扁桃进行持续水分胁迫处理: 从开始处理到处理结束不浇水, 使其一直干旱。在土壤相对含水量达到 45%~50% 时, 每隔 8 d 进行采样, 并测定土壤绝对含水量[在每盆植物根部附近取原状土样 10 g 左右, 每个品种重复 3 次, 于 105℃ 下连续烘干 8 h, 由公式: 土壤绝对含水量 = (原土重 - 烘干重)/烘干重 100% 计算可得], 并在持续 40 d 干旱胁迫后测量叶片的解剖结构。

1.2.1 叶片解剖结构

于 8 月 9 日在每株树向阳面选取树冠中下部枝条成熟完整叶片 10 片, 沿叶片主脉 1/2 处切取 0.5 cm × 0.5 cm 的小片, FAA 液固定, 制常规石蜡切片, 于 Motic(B5 Professional Series)显微镜下观察。用 Motic Images Advanced 3.2 测量软件测量得角质层厚度、叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度, 并计算栅海比(栅海比 = 栅栏组织厚度/海绵组织厚度)。

1.2.2 叶片相对含水量和水分饱和亏

于 7 月 1 日开始, 每隔 8 d, 将上午采回来的

叶片迅速洗净擦干，避开大的叶脉用打孔器打孔，每个样 3 片叶打 15 个小圆片，3 个重复，每个处理 3 个样。称取鲜重(WF)后放入蒸馏水浸泡，24 h 后取出小圆片擦干称饱和重(WT)，放到烘箱先 105℃杀青后再用 80℃烘干，称干重(WD)。

相对含水量(RWC) = (WF - WD)/(WT - WD) × 100

水分饱和亏(WSD) = (WT - WF)/(WT - WD) × 100

1.2.3 质膜透性的测定

采用电导法测定质膜透性，上午将采回来的叶片迅速洗净擦干，避开大的叶脉用打孔器打孔，每个样 3 片叶打 10 个小圆片，3 个重复，每个处理 3 个样。将小圆片放入装有 10 mL 蒸馏水的带帽离心管，放入抽气机抽气，使打成小圆片的叶片沉入水下，放置 6 h 后用电导仪测量电导率(E₁)，然后盖住离心管的盖子用沸水煮 20 min 左右，将叶片煮死变成褐色，晾凉后再用电导仪测量电导率(E₂)。相对电导率(L) = (E₁ - E₀)/(E₂ - E₀)，其中 E₀为加入 10 mL 离心管的蒸馏水的电导率。

1.2.4 各项生理指标的测定

参照高俊风、孙群等^[6,7]的方法，采用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性，愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性；硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量，考马斯亮蓝 G-205 染色法测定可溶性蛋白含量；用 5-磺基水杨酸提取，茚三酮显色法测定游离脯氨酸(Pro)含量。

1.2.5 叶绿素含量的测定

将叶片避开大的叶脉剪成丝状，称取 0.02 g，重复 3 次，每个处理 3 个样，放入装有 10 mL 80%丙酮的离心管中，用黑布遮严放置 24 h，期间摇离心管 2 ~ 3 次使浸提更充分。最后用紫外分光光度计测量波长为 663 nm、646 nm 和 470 nm 的吸光值。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 DPS 7.05 软件对数据进行计算、方差分析及多重比较分析，最后运用模糊数学隶属函数值法^[8]，对 5 个地区长柄扁桃抗旱性强弱进行综合评价，可通过下列公式计算各指

标的隶属函数值。

(1)若抗旱指标与抗旱性呈正相关，则公式为：

$$X(\mu) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}};$$

(2)若某一指标与抗旱性呈负相关，则公式为：

$$X(\mu) = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}};$$

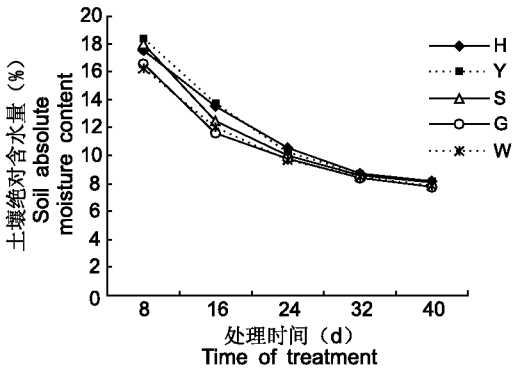
$$(3) \bar{X} = \frac{\sum X(\mu)}{n}。$$

式中 X(μ) 为隶属函数值，X 为各指标测定值，X_{max}、X_{min}为所有参试树种叶片某一指标的最大值和最小值。综合评定指数 $\bar{X}$ 值表示每个地区长柄扁桃各项测量指标隶属度的平均值。各指标隶属函数值的平均值越大，抗旱性越强。并且结合形态指标，就能够比较客观、准确地评定出植物的抗性强弱^[9]。

2 结果与分析

2.1 各处理土壤绝对含水量随处理时间的变化

为保证苗木处于同样的生长环境，确保试验数据的准确性，在每次采样时都对土壤绝对含水量进行了测定，使其保持一样的水平。从图 1 可看出，各处理土壤绝对含水量随处理时间的增长都呈下降趋势，但前 4 次采样下降趋势较快，说明植物蒸腾与其土表水分蒸发快，这主要与试验过程中的天气



图中各字母分别代表，H(河北)；W(乌审旗)；S(神木)；G(固阳)；Y(榆阳)，下同。
Letters represent H (Hebei)；W (Wushenqi)；S (Shenmu)；G (Guyang)；Y (Yuyang). The same below.

图 1 各处理土壤绝对含水量
Fig. 1 Soil absolute moisture content

有一定的关系，总体而言，各处理土壤含水量几乎保持在同样的水平，确保了试验材料处于相对一致的生长环境。

2.2 叶片解剖结构与不同地区长柄扁桃抗旱性的关系

从表1可以看出，不同地区长柄扁桃叶片的厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度以及栅海比均有显著性差异($p < 0.05$)，并且叶片的角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度以及栅海比均大致与叶片厚度成正相关，其中榆阳地区的长柄扁桃叶片厚度最大，对应的角质层厚度和栅海比也是最大的，说明其抗旱性能比较强。河北地区的长柄扁桃叶片厚度显著小于其他地区的叶片厚度，对应的角质层厚度与栅海比也是最小的，说明

其抗旱能力弱。从各地区品种叶肉和叶脉的解剖结构图(图2)也可以很直观地看到，河北地区的长柄扁桃叶片厚度最小，主脉突起最严重；榆阳、神木、固阳地区的品种叶片厚度较大，且榆阳地区品种叶片的栅栏组织排列最为整齐紧密，神木地区品种的叶片主脉含有较多的粘液细胞和含晶细胞。其中着色较深的细胞其细胞质浓厚，为粘液细胞，可提高渗透压，利于细胞保水和持水，是耐旱植物典型的贮水细胞，因此，含晶细胞和粘液细胞的有无及分布量也是评价植物旱生能力的因素之一。

2.3 水分胁迫对各地区长柄扁桃叶片相对含水量和水分饱和和亏的影响

本研究中，各地区长柄扁桃叶片相对含水量随着胁迫程度的加剧呈下降趋势(图3)，其中河北和

表1 各地区长柄扁桃水分胁迫下叶片解剖结构的比较与分析

Table 1 Leaf anatomical structure characteristic of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. under water stress

地区 Region	叶片厚度(μm) Leaf thickness	角质层厚度(μm) Cutin layer thickness	栅栏组织厚度(μm) Palisade tissue thickness	海绵组织厚度(μm) Spongy tissue thickness	栅海比 Palisade tissue and spongy tissue ratio
河北 Hebei(H)	158.94 ±2.48e	2.53 ±0.60d	45.86 ±0.66d	96.78 ±0.50cd	0.47 ±0.01d
神木 Shenmu(S)	276.63 ±2.14b	5.62 ±0.54b	100.18 ±0.53ab	135.81 ±0.81a	0.73 ±0.01bc
榆阳 Yuyang(Y)	284.79 ±4.55a	6.33 ±0.29a	119.02 ±0.45a	94.35 ±1.66d	1.26 ±0.01a
固阳 Guyang(G)	239.12 ±6.03c	4.98 ±0.16b	90.81 ±0.55b	118.47 ±0.96b	0.76 ±0.02b
乌审旗 Wushenqi(W)	229.35 ±2.45cd	3.25 ±0.50c	76.54 ±0.67c	102.26 ±1.60c	0.75 ±0.01b

注：不同小写字母表示各材料间有显著性差异($p < 0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate that the materials have significant difference ($p < 0.05$).

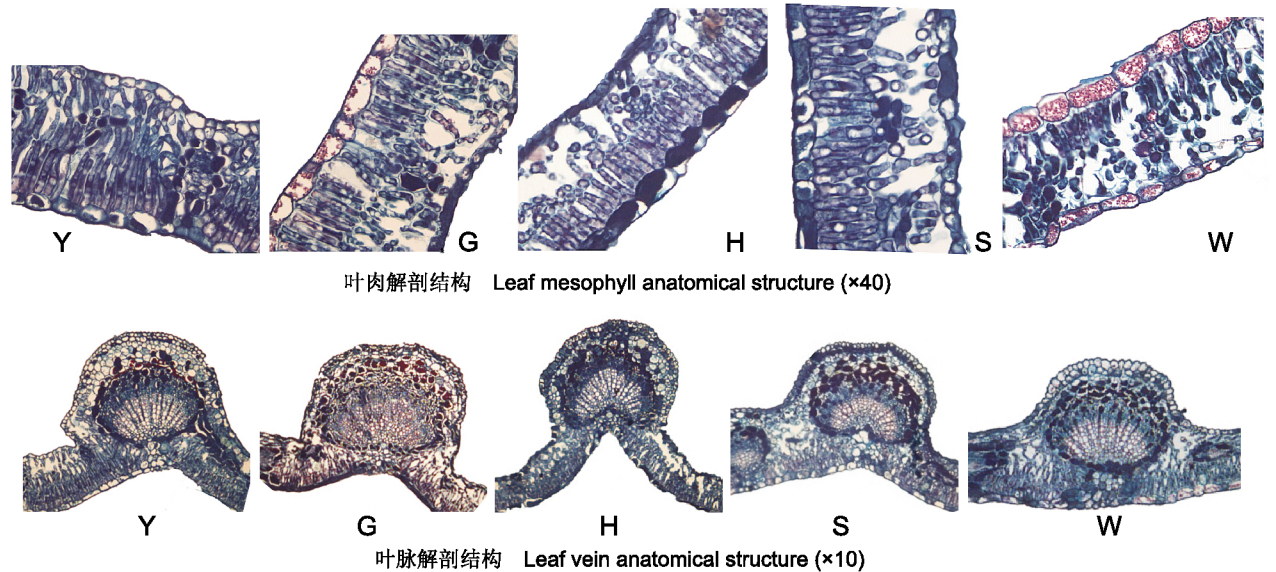


图2 5个地区长柄扁桃叶的叶肉和叶脉解剖结构

Fig. 2 Leaf mesophyll and leaf vein anatomical structure of five regional *Amygdalus pedunculata* Pall.

乌审旗地区品种叶片的相对含水量随胁迫时间延长一直处于最低；榆阳和神木地区品种叶片的相对含水量较高，而神木地区品种的下降趋势比榆阳地区的急剧，说明榆阳地区品种叶片持水力最强，河北地区的最弱；叶片饱和和亏则均随着胁迫的加剧逐渐升高，河北地区品种的叶片饱和和亏最大，神木与榆阳地区的亏缺最小。

2.4 水分胁迫对各地区长柄扁桃叶片质膜透性和丙二醛含量的影响

生物细胞膜的稳定性是植物细胞执行正常生理功能的基础，干旱胁迫后会使植物细胞膜系统受损，导致质膜透性增大，内容物渗漏^[10]。从图 4 可见，长柄扁桃叶片质膜相对透性随着干旱胁迫的加剧呈上升趋势，在最初胁迫时上升缓慢，在胁迫 24 d 之后急剧上升，各地区品种的质膜透性大小明显分开，其中河北(H)地区的质膜相对透性增幅最大，胁迫第 32 d 比第 24 d 增大 47.02%，说明其细胞膜被破坏程度最大；榆阳地区(Y)品种的质膜透性一直处于最小，且变化幅度最小，说明其细

胞受干旱胁迫的影响小。同时，在水分胁迫时质膜系统作为被伤害的最初和关键部位，往往发生膜脂过氧化作用最终分解为丙二醛(MDA)，其含量间接反映植物生物膜受损程度^[11]。从图 4 还可见，各地区长柄扁桃 MDA 的含量在胁迫第 16 d 后就开始急剧上升，对干旱的敏感度较质膜透性大，并且在胁迫后期河北和乌审旗地区品种的 MDA 含量远远高于其他 3 个地区的，说明其生物膜受损程度和发生膜脂过氧化作用的程度较严重。

2.5 水分胁迫对叶片酶活性和渗透调节物质的影响

2.5.1 水分胁迫对渗透调节物质脯氨酸和可溶性蛋白的影响

脯氨酸(Pro)作为植物细胞内的渗透调节物质，可保持胞质溶液与外界环境的渗透平衡，对原生质起保护与保水作用；可溶性蛋白则是大多数植物具有特异作用的调节代谢类酶，给细胞内的束缚水提供一个结合衬质以增加植物组织束缚水含量，从而使细胞结构在脱水时减轻破坏程度。在逆境下脯氨酸和可溶性蛋白相互作用保护膜结构的完整性。从图

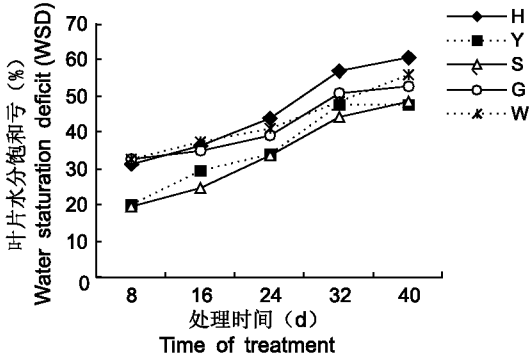
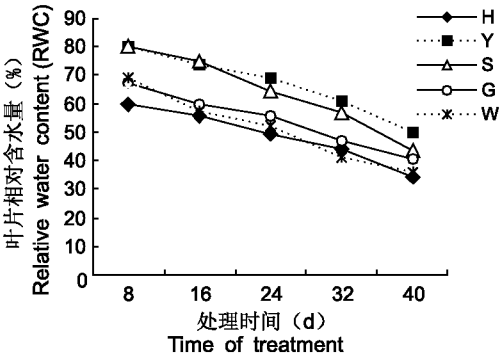


图 3 干旱胁迫下叶片相对含水量和水分饱和亏的变化
Fig. 3 Changes in drought stress on RWC and WSD

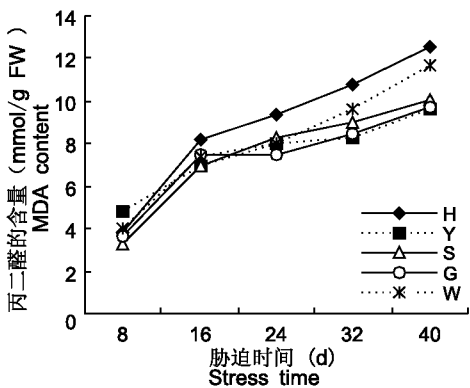
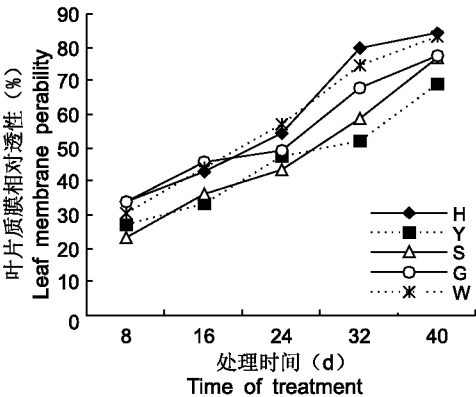


图 4 干旱胁迫下叶片质膜相对透性和 MDA 的变化
Fig. 4 Changes in drought stress on relative plasma membrane permeability of leaves

5 可看出，当长柄扁桃在受到水分胁迫后 Pro 含量整体呈先上升后降低的趋势，可溶性蛋白含量则一直处于下降趋势，但整个胁迫过程可溶性蛋白含量比较稳定，下降幅度不明显；榆阳地区的长柄扁桃在胁迫 24 d 时 Pro 含量先达到高峰，说明其对干旱胁迫比较敏感，能尽快产生 Pro 调节细胞质溶液与环境的渗透平衡，在胁迫 32 d 时都呈下降趋势，说明各地区的长柄扁桃水分胁迫程度已经超过了 Pro 的调节能力；可溶性蛋白含量在胁迫到 32 d 时下降幅度比较明显，与第 24 d 相比，河北、榆阳、神木、固阳、乌审旗地区的分别下降了 36.57%、13.95%、30.13%、32.11%、35.85%，说明其受害程度由轻到重的顺序为：榆阳、神木、固阳、乌审旗、河北。

2.5.2 水分胁迫对长柄扁桃细胞内保护酶系统 SOD 和 POD 的影响

植物对逆境的适应能力与保护酶的活性密切相关^[12,13]，其中 SOD 是植物活性氧代谢的关键酶，可防止自由基对细胞膜和生物大分子的毒害，维持正常的生理代谢，而 POD 有利于清除自由基，降低膜脂过氧化水平，从而减轻膜的伤害程度。从图 6 可看出，各地区长柄扁桃的 SOD 和 POD 含

量都是随着胁迫时间的延长呈现出先升高后降低的趋势，但是 SOD 在第 24 d 时先达到峰值，POD 在第 32 d 时才达到峰值。在水分适宜时期（第 8 d）榆阳和神木地区的 SOD 含量分别为 $190.61 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $226.71 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，明显高于其它地区，并且在第 24 d 时 SOD 含量均达到峰值，由大到小的顺序为：榆阳、神木、乌审旗、固阳、河北。同样，在整个胁迫过程中 POD 含量差异显著，河北地区品种的 POD 含量一直处于最小，说明其清除自由基的能力最弱，抵抗干旱破坏的能力最差，榆阳地区则相反。以上结果表明，在一定程度的水分胁迫下，榆阳和神木地区的长柄扁桃具有较强的 SOD 和 POD 活性来抵抗干旱胁迫的伤害。

2.6 水分胁迫对各地区长柄扁桃体内叶绿素含量的影响

不同植物在不同水分胁迫条件下所含的叶绿素均有所不同^[14]。本研究中，各地区长柄扁桃叶片 Chla 含量随着胁迫时间的增长均呈现先升高后降低的趋势（图 7），河北地区在最初胁迫时所含 Chla 最低，随着胁迫时间增长呈现最大幅度升高，最后一直降低；榆阳地区的品种在最初胁迫时是 5

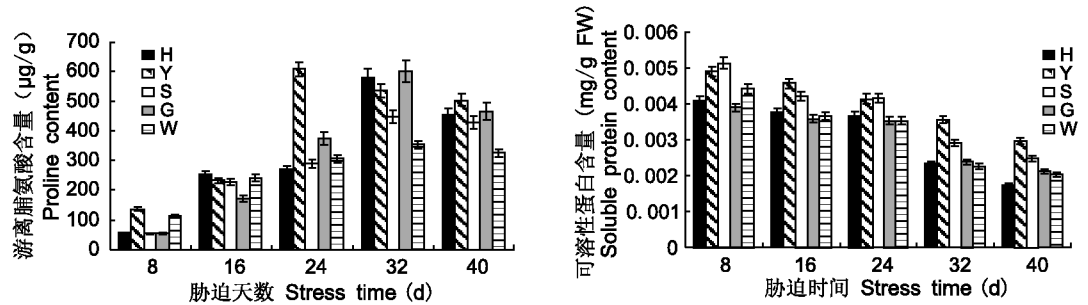


图 5 水分胁迫对游离脯氨酸和可溶性蛋白的影响
Fig. 5 Impact of water stress on free proline and soluble protein

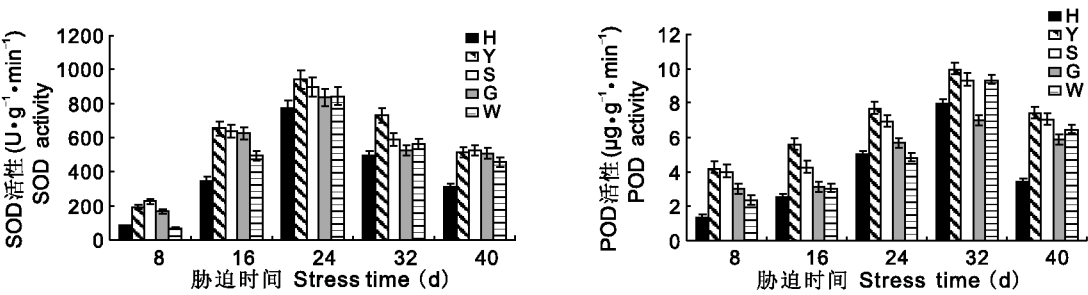


图 6 水分胁迫对 SOD 和 POD 的影响
Fig. 6 Impact of water stress on SOD and POD

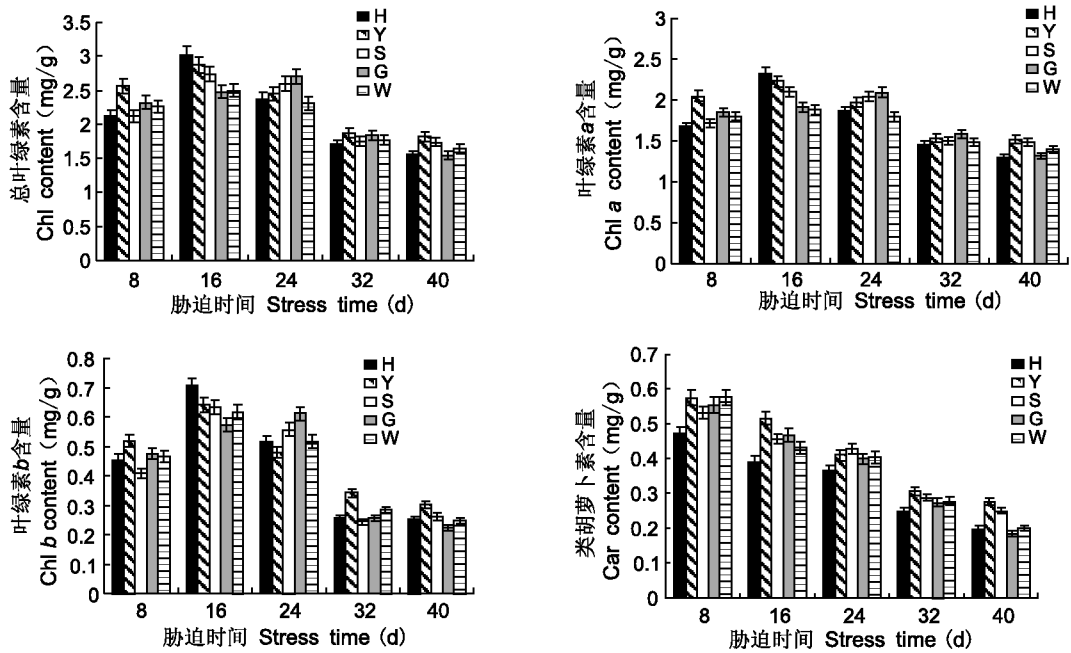


图 7 水分胁迫对光合色素的影响
Fig. 7 Impact of water stress on photosynthetic pigments

个地区中含量最高的，之后一直减少，但变化幅度比较平缓；在胁迫到 40 d 时 Chl a 几乎不再发生大的变化，此时榆阳地区品种的 Chl a 含量分别高出河北、神木、固阳、乌审旗含量的 17%、2.8%、15%、8.6%。Chl b 的变化趋势与 Chl a 的基本一致，但是 Chl b 对水分处理较敏感，当胁迫到第 32 d 时下降幅度明显大于 Chl a，说明在轻度干旱胁迫时，长柄扁桃通过增强光合色素的含量来缓解外界胁迫，但随胁迫时间的延长和强度的增大，长柄扁桃的这种缓解能力下降，这与孙景宽等的研究^[16]相一致。总叶绿素含量与 Chl a 和 Chl b 的变化均一致，而 Car 的含量则在胁迫初期就开始下降，且胁迫 40 d 后河北、榆阳、神木、固阳、乌审旗各地区品种的 Car 含量分别为胁迫第 8 d 的 42%、48%、47%、33%、34%，即在胁迫后榆阳和神木地区的 Car 含量比较高，说明细胞器结构被破坏的程度略低。

2.7 各地区长柄扁桃解剖结构指标的隶属函数分析
植物在干旱胁迫下通常会形成多种抗旱结构，其中解剖结构上表现为幼叶厚度变厚，表皮细胞角质层增厚，形状向减少水分散失的扁平方向发展，栅栏组织增厚，且细胞细长排列紧密，海绵组织细胞变小等^[16]，所以叶片解剖结构是最能反映植物对

干旱环境适应的特征。其中模糊数学隶属函数值法是目前应用最广的林木抗旱综合分析方法^[17]，其平均值越大，抗旱性越强。本研究通过对各地区长柄扁桃叶片的叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度以及栅海比的测定分析，得出榆阳地区的长柄扁桃叶片厚度和角质层厚度均为最大，具有很强的储水和保护作用；以及较厚的栅栏组织，可以避免强光的灼射，极大地提高光合速率^[18]。将各指标通过隶属函数法得出的结果(表 2)可知，各地区品种的抗旱性顺序为：榆阳 > 神木 > 固阳 > 乌审旗 > 河北。

3 讨论

3.1 水分胁迫对叶片相对含水量 (LRWC)、细胞膜透性以及 MDA 的影响

一般在胁迫之初，LRWC 下降缓慢是因为在轻度胁迫下，植物通过自身调节水分吸收和消耗来满足 LRWC 的平衡，从而限制光合速率等其它机能的进展^[19]，同时若能维持较高的 LRWC 且下降越慢，表明植株的叶片持水力越强，抗旱性越强^[20]，常被用作衡量植株抗旱性的生理指标。本研究中榆阳和神木地区品种的叶片相对含水量在胁迫过程中一直处于较高水平，且下降缓慢，说明榆阳和神木地区的长柄扁桃叶片具有较高的持水力，而河北

表2 各地区长柄扁桃叶片解剖结构指标的隶属函数分析结果
Table 2 Analysis results of subordinate function values of leaf anatomical structure index of regional *Amygdalus pedunculata* Pall.

地区 Regions	隶属函数值 Membership function value					$\sum X(\mu)$	$\bar{X}$	抗旱能力顺序 Drought resistance ability
	叶片厚度 Leaf thickness	角质层厚度 Cutin layer thickness	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	栅海比 Pal. and sp. ratio			
河北 Hebei(H)	0.0000	0.0000	0.0000	0.9413	0.0000	0.9414	0.1883	5
神木 Shenmu(S)	0.8125	0.9352	0.7424	0.0000	0.3349	2.8250	0.5650	2
榆阳 Yuyang(Y)	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	5.0000	1.0000	1
固阳 Guyang(G)	0.6450	0.6371	0.61448	0.4182	0.3715	2.6863	0.5373	3
乌审旗 Wushenqi(W)	0.1901	0.5595	0.4193	0.8092	0.3486	2.3268	0.4654	4

(H)地区的长柄扁桃叶片则相反，说明其持水力弱，不能抵御干旱不良环境。LRWC变化的同时首先引起膜透性改变，膜上酶蛋白的变化和脂类组成都有所改变，同时各种代谢失去平衡，活性氧积累，发生膜脂过氧化，破坏膜的正常功能，而且过氧化产物MDA极其类似物也能直接对植物细胞起毒害作用^[21]。因此叶片相对含水量，质膜透性和MDA含量都可直接用来衡量植物的抗旱能力^[22,23]。本研究中河北与乌审旗的长柄扁桃叶片质膜透性和MDA的含量均明显高于其他3个地区，说明其抗旱能力最弱，其他3个地区则强。

3.2 水分胁迫对渗透调节物质及保护酶的影响

在干旱胁迫的影响下，生理过程的变化并非同时发生，一般认为抗氧化系统对胁迫等非生物因素的反应比较敏感^[24,25]。本研究中，榆阳和神木地区的长柄扁桃中SOD和POD活性在整个胁迫过程中均处于最高水平，说明其有良好的旱害防御系统，而SOD活性在第24 d时先达到峰值，说明SOD保护酶系统较POD先受到损坏，POD在较严重的旱害条件下也能发挥较好的抗氧化能力，但是在胁迫后期SOD和POD活性均降低，不足以清除体内的自由基，引起膜脂过氧化作用，增加了植物的受害程度，这与徐坤等^[26]的研究结果一致。由此分析可得出，榆阳和神木地区的长柄扁桃有较强的抗旱能力，而河北与乌审旗地区的则相反。一般，植物在水分胁迫下体内脯氨酸和可溶性蛋白的含量显著增加，且抗旱性强的植物积累的脯氨酸和可溶性蛋白明显高于不抗旱的^[27,28]。本研究中各地区长柄扁桃随着胁迫的加剧游离脯氨酸呈先上升后下降的趋势，且榆阳地区的Pro含量明显高于其他地区，说明其的抗旱性最强；可溶性蛋白含量则

随干旱的加重而下降，与Clifford^[29]的研究一致。可溶性蛋白含量下降，可能与初生代谢受到抑制使可溶性蛋白质合成受阻，降解加快^[30]有关，但与严美玲的研究有所差异，说明不同植物生理抗旱机制有所不同，并且根据植物在受到干旱胁迫后蛋白质合成能维持在比较稳定的水平，变化幅度较小的抗旱性强^[31]，可以得出各地区长柄扁桃的抗旱性由强到弱的顺序与对细胞膜透性和MDA研究得出的结果一致。

3.3 水分胁迫对光合色素含量的影响

高等植物的光合色素在植物光合作用过程中起到吸收、传递光能的作用，还可吸收剩余能量，淬灭活性氧，防止膜脂过氧化^[32,33]。本研究表明，随干旱胁迫的增强Chl先升高后降低，与姜卫兵等^[34]的研究一致，这可能与长柄扁桃通过提高光合色素含量来缓解轻度干旱胁迫有关，但干旱胁迫加重时，这种缓解能力有所下降，可能与活性氧对叶绿素的破坏有关，而类胡萝卜素含量随着干旱胁迫的加剧一直呈下降趋势，这与朱金方等^[35]的研究有所差异，这说明不同植物的类胡萝卜素对水分胁迫反应不同。从Chl a、Chl b、Chl和Car在整个胁迫过程中变化趋势和含量可以看出，榆阳地区的光合色素含量均最大，其次是神木地区，河北、固阳、乌审旗这3个地区变化趋势和含量比较相近，说明榆阳地区的抗旱性最强，其次是神木地区的，其他3个地区的抗旱能力较相近。

4 结论

综上所述，在确保各地区长柄扁桃含水量几乎一致的条件下，其对干旱胁迫不仅表现出相应的叶片结构响应，在叶片相对含水量和水分饱和亏、质

膜透性和氧化程度、渗透调节物质、保护酶系统以及光合色素等方面都有相应的影响,通过对以上各方面的综合讨论分析表明:来自河北、固阳、乌审旗、榆阳和神木这5个地区的长柄扁桃的抗旱性有着显著差异,抗旱性由强到弱的顺序为:榆阳、神木、固阳、乌审旗、河北。各地区长柄扁桃在抗性方面有显著的差异,主要可能的原因是各地区气候环境差异造成的,如河北丰宁县东卯乡较其它地区年均降雨最充沛,海拔最低,长柄扁桃长期在这种适宜的环境下生长抗性变弱;而神木与榆阳地区的气候相对干旱少雨,风沙也大,植物通过对叶片形态和结构调整来适应不良环境,形成的生长抗性较强。因此,可以将榆阳地区的长柄扁桃广泛引种和推广到西北干旱、半干旱沙漠地区,促进干旱地区经济繁荣,实现长柄扁桃的林业价值和营养价值。

参考文献:

- [1] 苏贵兴,姚玉卿. 我国的野生扁桃资源[J]. 野生植物研究, 1993(2): 7-11.
- [2] 罗树伟,郭春会,张国庆,张应龙. 沙地植物长柄扁桃光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 125-132.
- [3] 李聪,李国平,陈俏,白斌,申烨华,张应龙. 长柄扁桃油脂脂肪酸成分分析[J]. 中国油脂, 2010, 35(4): 77-79.
- [4] Chen J W, Zhang Q, Li X S, Cao K F. Gas exchange and hydraulics in seedlings of *Hevea brasiliensis* during water stress and recovery [J]. *Tree Physiol*, 2010, 30(7): 876-885.
- [5] Siam A M J, Radoglou K M, Noitsakis B, Smiris P. Differences in ecophysiological responses to summer drought between seedlings of three deciduous oak species [J]. *Forest Ecol Manag*, 2009, 258(1): 35-42.
- [6] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司西安分公司, 2000: 201-202.
- [7] 孙群,胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006: 165-169.
- [8] 杨敏生,费保华,朱之梯. 白杨双交杂种无性系抗旱性鉴定指标分析[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 36-42.
- [9] 王跃进,杨亚州,张剑侠,潘学军,万怡震. 中国葡萄属野生种及其种间 F1 代抗旱性鉴定初探[J]. 园艺学报, 2004, 31(6): 711-714.
- [10] Hooijmaijers Cortwa. Membrane integrity, oxidative damage and chlorophyll fluorescence during dehydration of the thalloid liverwort *Monoclea formsteri* Hook. [J]. *J Bryol*, 2008, 30(3): 217-222.
- [11] 曹晶,姜卫兵,翁忙玲,姜武. 夏秋季旱涝胁迫对红叶石楠光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(1): 163-172.
- [12] Lima A L, DaMatta F M, Pinheiro H A, Totola M R, Loureiro M E. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions [J]. *Environ Exp Bot*, 2002, 47(3): 239-247.
- [13] Sundar D, Perianayaguy B, Reddy A R. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves [J]. *Plant Growth Regul*, 2004, 44(2): 157-163.
- [14] Terzi R, Kadioglu A. Drought stress tolerance and the antioxidant enzyme system in *Ctenanthe setosa* [J]. *Acta Biol Cracov Bot*, 2006, 48(2): 89-96.
- [15] 孙景宽,李田,夏江宝,董波涛. 干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶生长及光合色素的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 68-71.
- [16] 董建芳,李春红,刘果厚,周世权,苏亚拉图. 内蒙古6种沙生柳树叶片解剖结构的抗旱性分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 480-484.
- [17] 孙志虎,王庆成. 应用 PV 技术对北方4种阔叶树抗旱性的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 34-38.
- [18] 郑国琦,张磊,郑国保,张源培,王俊,胡正海. 不同灌水量对干旱区枸杞叶片结构、光合生理参数和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2806-2813.
- [19] Yordanov I, Velikova T, Tsonev V. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance [J]. *Photosynthetica*, 2000, 38(1): 171-186.
- [20] 符亚儒,麻保林,王子玲,杨伟. 陕北风沙区4种乡土树种适应干旱环境的特性及利用前景[J]. 中国沙漠, 2005, 5(3): 386-390.
- [21] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 韩蕊莲,李丽霞,梁宗锁. 干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透调节物质研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 23-27.

- [23] 柯世省, 杨敏文. 水分胁迫对云锦杜鹃抗氧化系统和脂类过氧化的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1217–2222.
- [24] Delatorre J, Pinto M, Cardemil L. Effects of water stress and high temperature on photosynthetic rates of two species of *Prosopis* [J]. *J Photoch Photobio B*, 2008, 92(2): 67–76.
- [25] Griffiths H, Parry M A J. Plant responses to water stress [J]. *Ann Bot*, 2002, 89(7): 801–802.
- [26] 徐坤, 郑国生. 水分胁迫对生姜光合作用及保护酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2000, 27(1): 47–51.
- [27] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 296–298.
- [28] 严美玲, 李向东, 林英杰. 苗期干旱胁迫对不同抗旱花生品种生理特性、产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 113–119.
- [29] Clifford S C, Arndt S K, Corlett J E, Joshi S, Sankhla N, Popp M, Jones H G. The role of solute accumulation, osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk.) [J]. *J Exp Bot*, 1998, 49(323): 967–977.
- [30] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trends Plant Sci*, 2002, 7(9): 405–410.
- [31] 王俊刚, 陈国昌, 张承烈. 水分胁迫对2种生态型芦苇 (*Phragmites communis*) 的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT 活性的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 561–565.
- [32] 陈昕, 徐宜凤, 张振英. 干旱胁迫下石灰花楸幼苗叶片的解剖结构和光合生理响应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(1): 111–116.
- [33] Hilde W, Wim V C, Marc V M, Christian L, Heinrich S. Ozone, Sulfur dioxide, and ultraviolet B have similar effects on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana plumbaginifolia* L. [J]. *Plant Physiol*, 1994, 106(3): 1007–1014.
- [34] 姜卫兵, 高光林, 俞开锦, 汪良驹, 马凯. 水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J]. 果树学报, 2002, 19(6): 416–420.
- [35] 朱金方, 夏江宝, 陆兆华, 刘京涛, 孙景宽. 盐旱交叉胁迫对怪柳幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(1): 124–130.

(责任编辑: 张平)