

15个宁夏枸杞品种叶片抗旱指标的筛选和比较研究

吕小旭¹, 杨璐¹, 王大成¹, 赵映书², 关鉴茹¹

(1. 甘肃医学院, 甘肃 平凉 744000; 2. 宁夏回族自治区中宁县林业技术推广服务中心, 宁夏 中宁 755100)

摘要:以中宁县国家枸杞种质资源库中的15个宁夏枸杞品种为试验材料,测定5项叶片形态特征(叶面积 LA 、干质量 DWT 、鲜质量 FW 、比叶面积 SLA 、干鲜比 $LDMC$),采用优化改进的石蜡切片技术测定10项叶显微结构特征(叶片厚度 LT 、上表皮细胞厚度 TU 、下表皮细胞厚度 TL 、栅栏组织厚度 TPT 、海绵组织厚度 TST 、栅栏组织厚度/海绵组织厚度 P/S 、叶片结构紧密度 TLS 、叶片结构疏松度 LLS 、上表皮占比 PU 、下表皮占比 PL),对这15项指标进行主成分分析,利用隶属函数对宁夏枸杞品种的抗旱性进行综合评价。结果表明:(1)15项指标抗旱系数的变异系数为12.900%~58.248%,其中变异系数最大的指标为 LA ,最小的为 TPT 。(2)相关性分析结果显示, LT 与 TLS 、 LLS 、 PU 、 PL 呈极显著负相关关系;聚类分析结果表明,15项叶片指标分成3类, LLS 、 LA 、 SLA 在各类别中相关指数最大,为宁夏枸杞抗旱性的关键指标;主成分分析可得, TLS 、 TST 、 LA 、 SLA 、 P/S 、 $LDMC$ 这6个主成分因子累积贡献率达到89.662%。综合可得, LLS 、 TLS 、 TST 、 LA 、 SLA 、 P/S 、 $LDMC$ 共7项叶形态及显微结构特征可作为宁夏枸杞抗旱性评价的关键指标。(3)各宁夏枸杞品种抗旱性强弱表现为:‘宁杞7号’>‘宁农杞5号’>‘宁杞9号’>‘宁杞4号’>‘宁农杞1号’>‘宁杞3号’>‘宁杞1号’>‘宁杞6号’>‘宁杞5号’>‘宁杞10号’>‘宁农杞4号’>‘蒙杞1号’>‘宁杞2号’>‘宁杞8号’>‘宁农杞9号’。

关键词:宁夏枸杞;品种;叶片显微结构;抗旱性综合评价;隶属函数

中图分类号:S567.1⁺9; Q945.78 **文献标志码:**A

Screening and comparison of leaf drought resistance indexes of 15 varieties of *Lycium barbarum*

LV Xiaoxu¹, YANG Lu¹, WANG Dacheng¹, ZHAO Yingshu², GUAN Jianru¹

(1. Gansu Medical College, Pingliang, Gansu 744000, China; 2. Forestry Technology Extension Service Center of Zhongning County, Ningxia Hui Autonomous Region, Zhongning, Ningxia 755100, China)

Abstract: Five leaf morphological characteristics—leaf area (LA), dry weight (DWT), fresh weight (FW), specific leaf area (SLA), and dry-to-fresh weight ratio ($LDMC$)—were calculated for 15 varieties of *Lycium barbarum* in Zhongning County. Ten leaf microstructure features—leaf thickness (LT), thickness of upper epidermal cell (TU), thickness of lower epidermal cell (TL), thickness of palisade tissue (TPT), thickness of spongy tissue (TST), palisade tissue thickness/spongy tissue thickness (P/S), tightness of leaf structure (TLS), leaf structure porosity (LLS), proportion of upper epidermal (PU) and proportion of lower epidermal (PL) were determined by using the optimized and improved paraffin section technique. The drought resistance of *Lycium barbarum* cultivars was evaluated by using the membership function and principal component analysis of these 15 indexes. The results showed that: (1) The coefficient of variation for the drought resistance coefficients across 15 indices ranged from 12.900% to 58.248%. Among these, the index with the highest coefficient of variation was LA , while the index with the lowest was TPT . (2) According to the correlation analysis results, LT was significantly negatively correlated with TLS , LLS , PU

收稿日期:2024-05-10

修回日期:2024-07-30

基金项目:全国第四次中药资源普查项目甘肃省崆峒区普查(GSZYPC201711);甘肃静宁县普查(GSZYPC201804);甘肃省高等教育教学成果培育项目(JXCGPY2022183)

作者简介:吕小旭(1987-),男,甘肃泾川人,硕士,副教授,主要从事药用植物资源调查及保护研究。E-mail: xiaoxulu@163.com

通信作者:关鉴茹(1989-),女,甘肃崇信人,副教授,主要从事药用植物种质遗传研究。E-mail: gjr21184@126.com

and *PL*. The cluster analysis results showed that the 15 leaf indexes were divided into 3 categories, and *LLS*, *LA* and *SLA* had the highest correlation index among all categories, which were the key indexes of drought resistance of *Lycium barbarum*. Principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of six principal component factors, including *TLS*, *TST*, *LA*, *SLA*, *P/S* and *LDMC*, reached 89.662%. *LLS*, *TLS*, *TST*, *LA*, *SLA*, *P/S* and *LDMC* were the key indicators for drought resistance evaluation of *Lycium barbarum*. (3) Drought resistance order of 15 *Lycium barbarum* varieties: *Lycium barbarum* ‘Ningqi-7’ > ‘Ningnongqi-5’ > ‘Ningqi-9’ > ‘Ningqi-4’ > ‘Ningnongqi-1’ > ‘Ningqi-3’ > ‘Ningqi-1’ > ‘Ningqi-6’ > ‘Ningqi-5’ > ‘Ningqi-10’ > ‘Ningnongqi-4’ > ‘Mengqi-1’ > ‘Ningqi-2’ > ‘Ningqi-8’ > ‘Ningnongqi-9’. The results of this study can help select excellent drought resistant varieties of *Lycium barbarum*, reduce drought stress, and promote the development of *Lycium barbarum* industry.

Keywords: *Lycium barbarum*; varieties; leaf microstructure; comprehensive evaluation of drought resistance; membership function

宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)为茄科枸杞属落叶灌木,其干果产量高、品质好、农残低、药用成分多糖含量高,是中药材枸杞子的主要来源,也可食用^[1]。宁夏枸杞经济价值高,是西北脱贫致富的重要产业,截至 2023 年底,宁夏全区枸杞种植面积 21 666.67 hm²,产业综合产值突破 290 亿元^[2]。而在水资源日益短缺的情况下,筛选抗旱品种可极大地改善因水资源匮乏造成的产业发展受损情况。因而,对现有市场主流的宁夏枸杞品种进行抗旱性评价,并筛选抗旱性品种,以期响应节水高效的产业发展思路。

植物叶片对外界环境变化极其敏感,其形态特征和解剖结构能够反映植物对水分的利用情况。已有研究表明,比叶面积与光合作用、水分利用均有关系^[3],叶片厚度及叶脉性状也影响叶片水分的动态平衡,进而影响植物的抗旱性^[4]。植物干/鲜质量比越大,具有越强的抵抗逆境能力^[5]。植物叶片的上表皮细胞厚度(*TU*)、下表皮细胞厚度(*TL*)、栅栏组织厚度(*TPT*)、海绵组织厚度(*TST*)、栅栏组织厚度/海绵组织厚度(*P/S*)、叶片结构紧密度(*TLS*)、叶片结构疏松度(*LLS*)、上表皮占比(*PU*)、下表皮占比(*PL*)等均能影响植物的抗旱性,常作为植物抗旱性的研究指标^[6-11]。

目前,枸杞属植物叶形态显微构造的研究多集中于枸杞属不同种之间,且主要围绕形态分类、抗盐性、抗病性进行探讨,对宁夏枸杞品种间的抗旱性研究仅见个别品种间的简单对比,选取显微结构指标较单一,未能采用统计学手段综合评价^[12-17]。而当前宁夏乃至西北主要栽培的宁夏枸杞品种多达 10 余种,且不同地区主栽品种不同^[18],这是否与品种间的抗旱性有关尚不明确。同时,当前宁夏枸杞新品种的选育开始注重抗旱特征,但从叶形态显微结构特征等方面暂未形成统一标准。因此,本研

究拟选取西北主要种植的 15 个宁夏枸杞品种^[19],测定叶片形态和解剖特征数据,采用主成分分析和隶属函数方法筛选评价宁夏枸杞抗旱性关键指标,并对其抗旱性进行排序,为干旱地区宁夏枸杞品种培育筛选和高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取的宁夏枸杞材料来源于中宁县国家枸杞种质资源库(国家林业和草原局批准确定的第一批国家林木种质资源库),当地土壤类型为灌淤土,地势平坦,土层深厚,土壤质地良好,地处清水河与黄河交汇口下端,有机质含量在 1.7% 以上,pH 值介于 7.6~8.5 之间,含盐量 1.2%,立地条件较好,具备枸杞良种苗木生长所需的光、热、水、肥、土、气等自然条件。扩建排灌渠道及配套 4 682 m,配备种苗生产先进机械设备 9 台(套),实现宁夏枸杞科学化管理、标准化生产,能满足种苗基地田间枸杞苗木的高标准高质量日常渠灌。该地区属于北温带大陆季风区,冬长夏短,温差较大,干旱少雨,蒸发强烈,光照充足,热量丰富。年平均气温 9.1℃,最高极值 38.5℃,最低极值 -26.7℃。

早晨 9 点选择生长年限 5 a、管理措施及采样策略均一致的花期宁夏枸杞取样,共计 15 个品种(表 1)。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 叶片性状特征测定 每个品种随机选取健康无病虫害的叶片 10 个,使用 Yaxin-1241 型便携式叶面积仪(北京雅欣理仪科技有限公司)测量叶面积(*LA*)。采集后的叶片立即用分析天平(精度 0.000 1 g)测定鲜质量(*FW*),经电热鼓风干燥箱 105℃ 杀青 10 min 后 80℃ 烘干至恒重后,用分析天平称量叶干质量(*DWT*)^[20]。

表 1 15 个宁夏枸杞品种来源

Table 1 Origin of 15 *Lycium barbarum* varieties

品种 Variety	品种来源 Variety origin
宁杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-1'	宁夏枸杞单株优选 <i>Lycium barbarum</i> single plant was preferred
宁杞 2 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-2'	大麻叶单株选优 Hemp leaf single plant selection
宁杞 3 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-3'	宁夏枸杞 3 株优势树对比法 Comparison of 3 dominant trees of <i>Lycium barbarum</i>
宁杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-4'	原产于宁夏银川市西夏区的遗传材料 Genetic material originating in Xixia District, Yinchuan City, Ningxia
宁杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-5'	'宁杞 1 号'单株优选 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-1' single plant was preferred
宁杞 6 号 <i>Lycium barbarum</i> Ningqi-6'	宁夏枸杞单株优选 <i>Lycium barbarum</i> single plant was preferred
宁杞 7 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-7'	宁夏枸杞单株优选 <i>Lycium barbarum</i> single plant was preferred
宁杞 8 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-8'	枸杞资源圃单株选育 Individual breeding of <i>Lycium barbarum</i> in resource nursery
宁杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-9'	以'宁杞 1 号'同源四倍体 98-2 与河北枸杞杂交选育 'Ningqi-1' autotetraploid 98-2 was hybridized with 'Hebei Gouqi'
宁杞 10 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-10'	以'宁杞 4 号'为父本,以'宁杞 5 号'为母本杂交 'Ningqi-4' was used as the male parent and 'Ningqi-5' was used as the female parent
宁农杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-1'	大麻叶的丰产菜园中采用单株选优方法选育 High-yield garden of hemp leaves was selected by single plant selection method
宁农杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-4'	黄果枸杞单株优选 <i>Lycium ningxiaense</i> R. J. Wang & Q. Liao single plant was preferred
宁农杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-5'	'宁杞 1 号'单株优选 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-1' single plant was preferred
宁农杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-9'	宁夏枸杞单株优选 <i>Lycium barbarum</i> single plant was preferred
蒙杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Mengqi-1'	宁夏枸杞单株优选 <i>Lycium barbarum</i> single plant was preferred

比叶面积 (SLA) = 叶面积 (LA)/干质量 (DWT)^[21]

干鲜比 ($LDMC$) = 干质量 (DWT)/鲜质量 (FW)^[21]

1.2.2 叶片显微结构测定 采集各品种健康无病虫害的成熟叶片,经 FAA 固定,采用石蜡切片法切片;取材、固定、脱水、透明、透蜡、包埋、切片、贴片、染色、透明、封藏等步骤制成永久制片,在 MoticNXH-100 荧光电子显微镜 Motic Images Plus 3.0(x86) 软件下分别测量叶片厚度 (LT)、 TU 、 TL 、 TPT 、 TST 、 P/S 、 TLS 、 LLS 、 PU 、 PL 数据,每组共 10 个数据,每组平行 3 次重复试验。

$TLS = (TPT/LT) \times 100\%$; 叶片组织结构紧密度 = 栅栏组织厚度/叶片厚度 $\times 100\%$ ^[10]

$LLS = (TST/LT) \times 100\%$; 叶片组织结构疏松度 = 海绵组织厚度/叶片厚度 $\times 100\%$ ^[10]

$P/S = TPT/TST$; 栅栏组织厚度/海绵组织厚度^[10]

1.3 数据分析

1.3.1 单因素方差分析 利用 Spss 26.0 对宁夏枸杞叶片的显微结构指标进行单因素方差分析,选取 95% 显著水平的结果 ($P=0.05$ 水平) 进行比较。

变异系数 (CV) = (标准差/平均值) $\times 100\%$ ^[6]

1.3.2 相关性分析 利用 Spss 26.0 软件的 Pearson 相关性分析方法,对 15 个宁夏枸杞叶片 10 项显微结构指标进行相关性分析。典型指标筛选计算公式为^[22]:

$$R_1^2 = \sum r^2 / (n - 1)$$

式中, R_1^2 为相关指数; r 为抗旱指标值; n 为抗旱指标数量。

1.3.3 抗旱性综合评价 隶属函数分析方法提供了一种在多指标测定基础上对某种特性综合评价的途径^[23]。在植物抗旱性研究中,采用单一指标对植物的抗旱性评价,不能客观、全面地反映植物的

抗旱力,因此采用多个指标进行综合评价。基于主成分分析及模糊隶属函数法综合评价分析抗旱特性,将枸杞叶显微结构性状指标测定结果用隶属函数数值计算公式^[5]进行计算:

若指标与抗旱性呈正相关: $R(X_i) = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$, ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

若指标与抗旱性呈负相关: $R(X_i) = 1 - [(X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})]$, ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

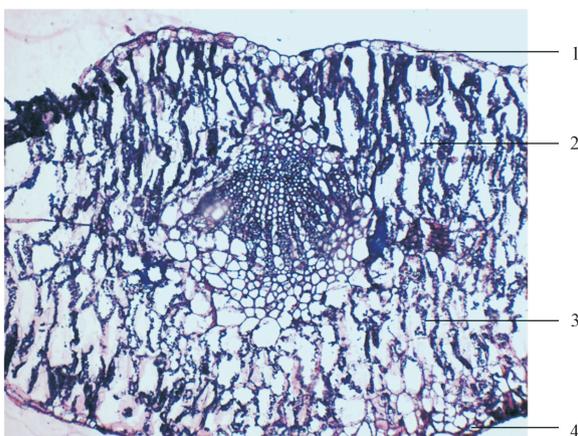
式中, X_i 为各抗旱指标值; $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$ 分别为对应植物性状指标的最大、最小指标值; R 为植物的性状指标值, R 越大其抗旱性越强,反之越弱。求得各个指标的隶属函数值的平均数,隶属函数平均值越大,表明枸杞品种的耐旱性越强。

2 结果与分析

2.1 宁夏枸杞品种叶形态特征和显微结构特征

宁夏枸杞的叶为异面叶,其横切面结构由表皮、栅栏组织、海绵组织和叶脉组成(图1)。上、下表皮细胞均为一层,细胞较大,具有较发达的角质层;栅栏组织紧挨着上表皮,排列较为紧密;海绵组织位于栅栏组织与下表皮之间,排列不规则;主脉较发达,外部由薄壁细胞构成的维管束鞘细胞包围。

由测定结果可知,15个宁夏枸杞品种叶片的 LA 、 DWT 、 FW 、 SLA 、 $LDMC$ 及 LT 、 TU 、 TL 、 TPT 、 TST 、 P/S 、 TLS 、 LLS 、 PU 、 PL 存在不同程度的变异, CV 范围介于12.900%~58.248%,其中 TPT 的 CV 最小,为12.900%; LA 的 CV 最大,为58.248%。其余13项性状 CV 表现为 $SLA > PU > PL > LLS > TLS > DWT > FW > LT > TU > TL > TST > P/S > LDMC$ 。



注:1.上表皮;2.栅栏组织;3.海绵组织;4.下表皮。

Note: 1. Upper epidermis; 2. Palisade tissue; 3. Spongy tissue; 4. Lower epidermis.

图1 宁夏枸杞品种叶片显微结构

Fig.1 Microstructure of leaves of *Lycium barbarum*

15个宁夏枸杞品种的叶形态特征存在很大差异。由表2可知,15个宁夏枸杞品种叶片 FW 介于3.979~11.181 g之间,最重的是‘宁农杞9号’,最轻的是‘宁农杞5号’。 DWT 介于0.336~0.875 g之间,最重的是‘宁农杞9号’,最轻的是‘宁农杞5号’。 LA 介于143.400~1 019.450 mm²之间,最大的是‘宁杞5号’,最小的是‘宁杞9号’。 SLA 介于404.067~1 876.039 mm²·g⁻¹之间,最大的是‘宁杞5号’,最小的是‘宁杞9号’。 $LDMC$ 介于0.067~0.097之间,最大的是‘宁杞7号’,最小的是‘宁农杞1号’。

15个宁夏枸杞品种的叶显微结构特征存在很大差异。由表2可知,15个宁夏枸杞品种 LT 介于11.205~26.472 μm之间,最厚的为‘宁农杞5号’,最薄的为‘宁杞1号’。 TU 介于11.205~26.472 μm之间,最厚的是‘宁农杞5号’,最薄的是‘宁杞1号’。 TL 介于11.685~22.963 μm之间,最厚的为‘宁杞7号’,最薄的为‘宁杞1号’。 PU 介于0.024~0.089之间,最大的是‘蒙杞1号’,最小的是‘宁杞1号’。 PL 介于0.025~0.079之间,最大的是‘蒙杞1号’,最小的是‘宁杞10号’。 TPT 介于99.337~151.878 μm之间,最厚的是‘蒙杞1号’,最薄的是‘宁杞4号’。 TST 介于75.727~134.380 μm之间,最厚的是‘蒙杞1号’,最薄的是‘宁杞7号’。 P/S 介于1.060~1.519之间,最大的是‘宁农杞5号’,最小的是‘宁杞8号’。 TLS 介于0.188~0.669之间,最大的是‘蒙杞1号’,最小的是‘宁杞10号’。 LLS 介于0.145~0.589之间,最大的是‘蒙杞1号’,最小的是‘宁杞10号’。

2.2 宁夏枸杞品种叶形态特征和显微结构特征间的相关性分析

15项宁夏枸杞品种叶片抗旱指标间的相关性分析如表3所示,可知 FW 与 LA 呈极显著正相关关系,与 PU 呈极显著负相关关系,与 TU 呈显著负相关关系; DWT 与 LA 、 FW 呈极显著正相关关系,与 TU 呈显著负相关关系; LA 与 TPT 呈极显著负相关关系; SLA 与 LA 呈极显著正相关关系,与 TPT 呈极显著负相关关系,与 DWT 呈显著负相关关系; $LDMC$ 与 PU 呈极显著正相关关系,与 TU 、 TLS 、 LLS 、 PL 呈显著正相关关系,与 LT 显著负相关; LT 与 TLS 、 LLS 、 PU 、 PL 呈极显著负相关关系; P/S 与 TST 、 LLS 呈极显著负相关关系; TLS 与 TPT 、 TST 、 LLS 、 PU 、 PL 呈极显著正相关关系; LLS 与 TPT 、 TST 、 TLS 、 PU 、 PL 呈极显著正相关关系,与 P/S 呈极显著负相关关系。

表 2 15 个枸杞品种叶片抗旱指标

Table 2 Leaf drought resistance indexes of 15 *Lycium barbarum* varieties

品种 Variety	鲜质量 FW/g	干质量 DWT/g	叶面积 LA/mm ²	比叶面积 SLA /(mm ² ·g ⁻¹)	干鲜比 LDMC	叶片厚度 LT/ μ m	上表皮细 胞厚度 TU/ μ m	下表皮细 胞厚度 TL/ μ m	栅栏组织 厚度 TPT/ μ m	海绵组 织厚度 TST/ μ m	栅栏组织 厚度/海绵 组织厚度 P/S	叶片结构 紧密度 TIS	叶片结构 疏松度 LIS	上表皮 占比 PU	下表皮 占比 PL
宁杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-1'	8.767b	0.739ab	530.300b	728.903cde	0.084ab	476.666b	11.205e	11.685e	122.161ef	95.714defg	1.294abc	0.263defg	0.210defg	0.024e	0.024e
宁杞 2 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-2'	6.614bc	0.587bc	307.050def	524.924de	0.088ab	463.333cde	15.463de	15.356cde	141.497ab	123.261ab	1.1530c	0.316cdef	0.272cd	0.035cde	0.034de
宁杞 3 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-3'	5.196cde	0.417cd	345.600cde	860.500bcd	0.084ab	533.333bc	17.988cd	15.418cde	133.157bcde	103.493cdef	1.303abc	0.261defg	0.204defg	0.035cde	0.032e
宁杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-4'	4.136f	0.340d	414.500bcd	1206.378b	0.086ab	403.333def	22.432abc	16.008cde	99.337h	80.833gh	1.258bc	0.248defg	0.202defg	0.056bcd	0.040cde
宁杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-5'	6.702cde	0.567bc	1019.450a	1876.039a	0.078bc	463.333cde	18.568cd	17.980cde	104.103gh	87.420fgh	1.197c	0.230efg	0.193efg	0.041cde	0.039cde
宁杞 6 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-6'	5.547def	0.484cd	491.716bc	1042.082bc	0.086ab	340.000f	21.810abc	17.576bcd	126.435cde	106.280cde	1.201c	0.416b	0.346b	0.070ab	0.058b
宁杞 7 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-7'	5.001ef	0.485cd	558.533b	1174.474b	0.097a	440.000cdef	24.556ab	22.963a	111.786gf	75.727h	1.509ab	0.258defg	0.173fg	0.056bc	0.052bc
宁杞 8 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-8'	6.325cde	0.581bc	318.833gf	556.830de	0.093ab	426.666cdef	23.052abc	21.173de	136.763bcd	129.184a	1.060c	0.325cde	0.307bc	0.054bcd	0.050bcd
宁杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-9'	5.733def	0.483cd	183.720fg	404.067e	0.084ab	508.000bcd	17.258cd	13.562abc	124.309de	86.114gh	1.473ab	0.269defg	0.187efg	0.040cde	0.029e
宁杞 10 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningqi-10'	8.047bc	0.575bc	224.666fg	410.987e	0.078bc	750.000a	24.343ab	18.765abc	138.541bc	107.835bcd	1.300abc	0.188g	0.145g	0.033de	0.025e

续表 2
Continued table 2

品种 Variety	鲜质量 FW/g	干质量 DWT/g	叶面积 LA/mm ²	比叶面积 SLA (mm ² ·g ⁻¹)	干鲜比 LDMC	叶片厚度 LT/ μ m	上表皮细 胞厚度 TU/ μ m	下表皮细 胞厚度 TL/ μ m	栅栏组织 厚度/ μ m TPP/ μ m	海绵组 织厚度/ μ m TST/ μ m	栅栏组织 厚度/海绵 组织厚度 P/S	叶片结构 紧密度 TLS	叶片结构 疏松度 LLS	上表皮 占比 PU	下表皮 占比 PL
宁农杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-1'	7.511bcd	0.406cd	452.592bcd	1007.894bc	0.067c	586.666b	15.405de	15.270cde	131.721bcde	91.005defgh	1.477abc	0.226gf	0.156g	0.027e	0.026e
宁农杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-4'	5.283ef	0.369d	307.533def	925.132bcd	0.085ab	466.666cde	17.878cd	13.928de	134.719bcde	118.094abc	1.154c	0.295cdef	0.257cde	0.040cde	0.031e
宁农杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-5'	3.979f	0.336d	143.400g	568.899de	0.092bc	366.666ef	26.472a	19.750abc	132.886bcde	89.777efgh	1.519a	0.367bc	0.246cdef	0.074ab	0.054bc
宁农杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Ningnongqi-9'	11.181a	0.875a	921.317a	1067.852bc	0.079bc	376.666g	19.920abc	22.866a	123.902de	106.951bcd	1.181c	0.338bcd	0.289bc	0.054bcd	0.062b
蒙杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> 'Mengqi-1'	4.827ef	0.441cd	513.300b	1199.288b	0.093ab	233.333g	19.873bcd	17.666bcd	151.878a	134.380a	1.131c	0.669a	0.589a	0.089a	0.079a
平均值 Average value	6.330	0.513	451.813	909.230	0.085	455.060	19.776	17.374	127.583	102.588	1.279	0.312	0.253	0.049	0.043
最小值 Minimum value	3.979	0.336	143.400	404.067	0.067	233.333	11.205	11.685	99.337	75.727	1.060	0.188	0.145	0.024	0.025
最大值 Maximum value	11.181	0.875	1019.450	1876.039	0.097	750.000	26.472	22.963	151.878	134.380	1.519	0.669	0.589	0.089	0.079
变异系数% Coefficient of variation	36.870	38.258	58.248	52.772	14.934	31.122	28.347	26.336	12.900	20.560	17.823	41.698	47.134	48.473	46.446
F 值 F value	6.386	9.689	26.020	8.848	2.773	10.172	5.508	5.350	12.135	11.283	3.559	15.449	21.410	7.261	8.761

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters after the data of the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

表 3 各项指标相关矩阵

Table 3 Correlative matrix of leaf structure indexes

	鲜质量 <i>FW</i>	干质量 <i>DWT</i>	叶面积 <i>LA</i>	比叶面积 <i>SLA</i>	干鲜比 <i>LDMC</i>	叶片厚度 <i>LT</i>	上表皮细胞 胞厚度 <i>TU</i>	下表皮细胞 胞厚度 <i>TL</i>	栅栏组织 厚度 <i>TPT</i>	海绵组织 厚度 <i>TST</i>	栅栏组织 厚度/海绵 组织厚度 <i>P/S</i>	叶片结构 紧密度 <i>TLS</i>	叶片结构 疏松度 <i>LLS</i>	上表皮 占比 <i>PU</i>	下表皮 占比 <i>PL</i>
鲜质量 <i>FW</i>	1.000														
干质量 <i>DWT</i>	0.767**	1.000													
叶面积 <i>LA</i>	0.399**	0.418**	1.000												
比叶面积 <i>SLA</i>	-0.172	-0.219*	0.730**	1.000											
干鲜比 <i>LDMC</i>	-0.439**	0.095	-0.135	-0.027	1.000										
叶片厚度 <i>LT</i>	0.206	0.039	-0.181	-0.189	-0.247*	1.000									
上表皮细胞 厚度 <i>TU</i>	-0.270*	-0.233*	-0.123	0.076	0.218*	-0.214*	1.000								
下表皮细胞 厚度 <i>TL</i>	0.131	0.198	0.206	0.002	0.077	-0.205	0.396**	1.000							
栅栏组织 厚度 <i>TPT</i>	0.02	-0.022	-0.345**	-0.356**	0.076	-0.009	-0.061	-0.014	1.000						
海绵组织 厚度 <i>TST</i>	0.112	0.096	-0.09	-0.191	0.028	-0.117	-0.106	-0.016	0.627**	1.000					
栅栏组织厚度/ 海绵组织厚度 <i>P/S</i>	-0.147	-0.148	-0.179	-0.057	0.038	0.107	0.097	0.038	0.005	-0.762**	1.000				
叶片结构紧 密度 <i>TLS</i>	-0.18	-0.073	0.012	0.056	0.242*	-0.796**	0.159	0.161	0.472**	0.396**	-0.109	1.000			
叶片结构疏 松度 <i>LLS</i>	-0.12	-0.019	0.067	0.075	0.211*	-0.750**	0.100	0.124	0.432**	0.615**	-0.419**	0.942**	1.000		
上表皮占比 <i>PU</i>	-0.290**	-0.193	0.002	0.148	0.279**	-0.763**	0.684**	0.343**	0.085	0.074	-0.004	0.770**	0.688**	1.000	
下表皮占比 <i>PL</i>	-0.07	0.066	0.204	0.129	0.231*	-0.771**	0.366**	0.667**	0.140	0.144	-0.043	0.799**	0.730**	0.814**	1.000

注: ** 为差异极显著 ($P < 0.01$); * 为差异显著 ($P < 0.05$)。Note: ** indicates very significant differences ($P < 0.01$); * indicates significant differences ($P < 0.05$).

2.3 宁夏枸杞品种抗旱性综合评价

2.3.1 宁夏枸杞品种抗旱性指标筛选 对 15 项叶片抗旱指标进行聚类分析,由图 2 可知,当欧氏距离等于 5 时,抗旱性指标可划分为 3 类。第一类包括 *PU*、*PL*、*TLS*、*LLS*、*P/S*、*TU*、*TL*、*TPT*、*TST*、*LDMC*、*DWT*、*FW*;第二类包括 *LT*、*LA*;第三类为 *SLA*。

相关指数的计算结果见表 4,根据相关指数选择主要抗旱指标,参数的相关指数越大其代表性越强。第 1 类指标中 *LLS* 相关指数最大;第 2 类指标中 *LA* 和 *LT* 相关指数大小相等,但 *LA* 变异系数小,抗旱指标选为 *LA* 更合适;第 3 类指标为 *SLA*。因此,可以选择 *LLS*、*LA*、*SLA* 作为主要抗旱指标。

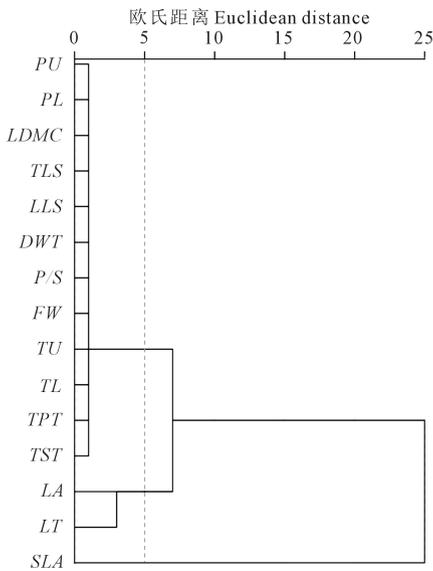


图 2 抗旱指标聚类分析

运用主成分分析法对 5 项叶形态特征 (*LA*、*DWT*、*FW*、*SLA*、*LDMC*) 和 10 项叶片显微结构特征 (*LT*、*TU*、*TL*、*PU*、*PL*、*P/S*、*TLS*、*LLS*、*TPT*、*TST*) 进行分析,筛选出关键抗旱指标。根据累计贡献率 $\geq 85\%$ 的原则抽取主成分^[8],根据每个指标的载荷量、贡献率筛选最具有代表性的指标。由表 5 可知,前 6 个主成分的累积贡献率达到 89.662%,可以较好地保留 15 项指标的绝大部分信息。选取前 6 个主成分,各指标在 6 个主成分的载荷值差异较大,该值越大表明其对主成分的贡献率越大,越能作为评价抗旱性的重要依据。由表 5 可知,第 1 主成分中 *TLS*、*LLS*、*PU*、*PL*、*LT* 的载荷值较大,选取其系数最大的 1 个指标,即 *TLS*;第 2 主成分中 *TST* 的载荷值较大;第 3 主成分中载荷值较大的是 *LA*;第 4 主成分中载荷值较大的是 *SLA*;第 5 主成分中载荷值较大的是 *P/S*;第 6 主成分中载荷值较大的是 *LDMC*。通过主成分分析选取 *TLS*、*TST*、*LA*、*SLA*、*P/S*、*LDMC* 作为评价抗旱性的指标。

综合可得, *LLS*、*TLS*、*TST*、*LA*、*SLA*、*P/S*、*LDMC* 可作为宁夏枸杞抗旱性评价的关键指标。其中, *LA* 和 *SLA* 是相关指数选择关键指标与主成分分析法筛选指标两种方法得到的共有指标。

2.3.2 15 个宁夏枸杞品种抗旱性综合评价 采用隶属函数法对基于相关指数筛选出的抗旱指标 *LLS*、*LA*、*SLA* 和主成分分析筛选出的 *TLS*、*TST*、*LA*、*SLA*、*P/S*、*LDMC*、*LLS* 进行计算隶属函数值累加并求均值(表 6),该值越大表示抗旱性越强。由表 6 可知,15 个宁夏枸杞品种的抗旱性表现为:‘宁杞 7 号’>

表 4 各类指标相关指数及排序

Table 4 Correlation index and ranking of various indicators

类别 Category	指标 Index	相关指数 Correlation index	类中排序 Order of parameter
1	<i>LLS</i>	0.247	1
	<i>TLS</i>	0.242	2
	<i>PU</i>	0.230	3
	<i>PL</i>	0.229	4
	<i>TST</i>	0.143	5
	<i>FW</i>	0.095	6
	<i>TU</i>	0.090	7
	<i>P/S</i>	0.083	8
	<i>TL</i>	0.075	9
	<i>TPT</i>	0.076	10
	<i>DWT</i>	0.070	11
	<i>LDMC</i>	0.045	12
2	<i>LA</i>	0.033	1
	<i>LT</i>		1
3	<i>SLA</i>		

表 5 主成分载荷矩阵表

Table 5 Principal component loading matrix table

指标 Index	1	2	3	4	5	6
<i>TLS</i>	0.925	0.131	-0.109	-0.052	-0.302	-0.090
<i>LLS</i>	0.904	0.324	-0.092	-0.196	-0.104	-0.023
<i>PL</i>	0.896	-0.060	0.271	0.235	-0.045	-0.082
<i>PU</i>	0.890	-0.308	0.050	0.091	0.074	-0.086
<i>LT</i>	-0.841	0.092	-0.172	0.113	0.253	-0.037
<i>TST</i>	0.385	0.756	-0.331	-0.202	0.320	0.015
<i>FW</i>	-0.255	0.647	0.498	0.365	-0.066	-0.187
<i>P/S</i>	-0.211	-0.614	-0.044	0.427	-0.554	-0.167
<i>DWT</i>	-0.093	0.577	0.497	0.454	-0.139	0.370
<i>LA</i>	0.062	0.149	0.898	-0.287	-0.067	0.038
<i>TPT</i>	0.316	0.453	-0.570	0.186	-0.173	-0.184
<i>SLA</i>	0.127	-0.301	0.575	-0.645	0.007	-0.040
<i>TL</i>	0.387	-0.086	0.400	0.561	0.348	-0.103
<i>TU</i>	0.419	-0.511	0.007	0.284	0.544	-0.066
<i>LDMC</i>	0.346	-0.223	-0.185	0.107	-0.039	0.858
贡献率/% Contribution rate	32.040	17.099	15.916	10.794	7.063	6.750
累积率/% Accumulation rate	32.040	49.139	65.054	75.849	82.912	89.662

‘宁农杞 5 号’>‘宁杞 9 号’>‘宁杞 4 号’>‘宁农杞 1 号’>‘宁杞 3 号’>‘宁杞 1 号’>‘宁杞 6 号’>‘宁杞 5 号’>‘宁杞 10 号’>‘宁农杞 4 号’>‘蒙杞 1 号’>‘宁杞 2 号’>‘宁杞 8 号’>‘宁农杞 9 号’。

3 讨论与结论

植物的抗旱性可以由叶形态特征和显微结构特征来反映,比叶面积直接受叶片厚度、形状和质量等因素的影响,在一定程度上反映了叶片捕获光能的能力,比叶面积过大可能会影响光合作用,而比叶面积过小,则可能不利于叶片充分利用光照,影响植物抗旱性^[3]。叶片厚度通过影响叶片水分的动态平衡影响植物的抗旱性^[4];干鲜比是体现植物对环境适应的重要指标,研究表明干鲜比越大,植物具有越强的抵抗逆境能力^[5]。栅栏组织以增加叶肉表面积来提高维管束运输水分的效率,能增

强蒸腾作用,保护叶片免受灼伤;栅栏组织厚度越厚,对抗干旱环境的能力越强^[24]。有研究表明,叶片厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度和叶片结构紧密度等与抗旱性呈正相关关系^[8],海绵组织厚度、叶片结构疏松度等与抗旱性呈负相关关系^[25]。本研究结果表明,不同品种的宁夏枸杞对于干旱有不同的适应机制,宁夏枸杞叶片的解剖特征体现了其对干旱环境条件的适应能力。‘宁杞 7 号’干鲜比和比叶面积大,海绵组织薄,叶片结构疏松度低,水分含量较少,且散失较慢,能够更好地适应干旱环境;‘宁农杞 5 号’栅栏组织/海绵组织厚度最大,因而叶片结构紧密度高,防止水分过度蒸发,同时叶面积最小,能够降低水分蒸发,因而干鲜比较高,抗旱能力较强;‘宁杞 9 号’叶面积较小,且比叶面积最小,光能利用效率不高,但可以减少高光强的灼伤,同时叶片结构疏松度低,能够适应较干旱的生长环

表 6 宁夏枸杞品种叶片抗旱性指标隶属函数值

Table 6 Membership function values of drought resistance indicators in leaves of *Lycium barbarum*

品种 Variety	叶片结构 紧密度 TLS	叶片结构 疏松度 LLS	海绵组织 厚度 TST	叶面积 LA	比叶面积 SLA	干鲜比 LDMC	栅栏组织 厚度/海绵 组织厚度 P/S	平均隶属度 Average membership degree	排序 Seqencing
宁杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-1’	0.157	0.851	0.659	0.558	0.221	0.579	0.512	0.505	7
宁杞 2 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-2’	0.266	0.711	0.190	0.813	0.082	0.733	0.203	0.428	13
宁杞 3 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-3’	0.152	0.865	0.527	0.769	0.310	0.592	0.531	0.535	6
宁杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-4’	0.126	0.870	0.913	0.691	0.545	0.663	0.433	0.606	4
宁杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-5’	0.087	0.890	0.801	0.000	1.000	0.395	0.300	0.496	9
宁杞 6 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-6’	0.475	0.546	0.479	0.602	0.433	0.659	0.308	0.500	8
宁杞 7 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-7’	0.145	0.936	1.000	0.526	0.523	1.000	0.980	0.730	1
宁杞 8 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-8’	0.284	0.633	0.089	0.800	0.104	0.890	0.000	0.400	14
宁杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-9’	0.169	0.903	0.823	0.954	0.000	0.568	0.901	0.617	3
宁杞 10 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningqi-10’	0.000	1.000	0.453	0.907	0.005	0.379	0.524	0.467	10
宁农杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningnongqi-1’	0.080	0.975	0.740	0.647	0.410	0.000	0.909	0.537	5
宁农杞 4 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningnongqi-4’	0.223	0.747	0.278	0.813	0.354	0.613	0.206	0.462	11
宁农杞 5 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningnongqi-5’	0.373	0.771	0.760	1.000	0.112	0.839	1.000	0.694	2
宁农杞 9 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Ningnongqi-9’	0.313	0.674	0.468	0.112	0.451	0.406	0.265	0.384	15
蒙杞 1 号 <i>Lycium barbarum</i> ‘Mengqi-1’	1.000	0.000	0.000	0.578	0.540	0.894	0.155	0.452	12

境;‘宁杞4号’在与抗旱性指标相关的叶形态显微特征方面均具有较好的表现,因此其通过全方位的形态显微结构变化来提高抗旱性;‘宁农杞1号’干鲜比最小,其抗旱性也较强;‘宁农杞9号’叶面积过大,海绵组织较厚,接收光强较多,不利于水分保持,且其他抗旱性正相关的特征均较差,水分动态平衡不佳,抵抗干旱的能力最弱;‘宁杞8号’栅栏组织/海绵组织厚度最小,抗旱能力较弱;‘宁杞2号’与抗旱性指标相关的叶形态显微特征均较差,因此抗旱性较差;‘蒙杞1号’叶片结构疏松度最大,不利于水分的保持,其抗旱能力较差。其余宁夏枸杞品种的抗旱性与叶形态显微结构特征综合作用有关,各有特殊性。同类研究结果认为黑果枸杞叶片结构最紧凑,具有较强的抗旱能力,朝鲜枸杞叶片结构最松散,其抗旱能力较差^[26],黑果枸杞>‘宁杞1号’^[27]、‘宁杞1号’>‘宁杞2号’^[11]的研究结果与本研究一致。

隶属函数法是目前采用最为广泛的一种基于模糊数学原理的多指标综合评价方法,该计算方法所得结果较为可靠,能真实反映植株抗旱能力,如景晨娟等^[28]以老、嫩叶叶片形态和解剖结构为指标,采用隶属函数法分析不同品种李子的抗旱性并筛选抗旱品种;刘丹等^[29]以叶片生理生化特性为指标,采用隶属函数法综合评价了9种桑树品种的抗旱性。这种方法首先对每个指标进行单项评估,计算单个指标隶属度,然后对单个指标隶属度进行加权算术平均,以得到综合隶属度,从而得出综合评估的指标值^[30-33]。本研究为了对宁夏枸杞不同品种抗旱性进行更为准确的评价,综合了相关性分析、聚类分析和主成分分析结果,筛选出 *TLS*、*TST*、*LA*、*SLA*、*P/S*、*LDMC*、*LLS* 共7项叶形态及显微结构特征作为关键抗旱指标,最终通过隶属函数计算对15个宁夏枸杞品种做出抗旱性评价,抗旱能力表现为:‘宁杞7号’>‘宁农杞5号’>‘宁杞9号’>‘宁杞4号’>‘宁农杞1号’>‘宁杞3号’>‘宁杞1号’>‘宁杞6号’>‘宁杞5号’>‘宁杞10号’>‘宁农杞4号’>‘蒙杞1号’>‘宁杞2号’>‘宁杞8号’>‘宁农杞9号’,该结果基本符合相关品种的育种策略。

4 展 望

本研究表明宁夏枸杞抗旱性排序与育种选育来源有一定的相关性,但各品种抗旱能力的评价还需更加全面研究,宁夏枸杞产业要在西北干旱地区持续发展,抗旱品种的选育就成为重中之重。后续抗旱品种的育种,应重新定位枸杞的育种目标,将

抗旱性作为育种评价标准之一,将叶片形态特征和显微结构作为抗旱能力评定的指标,以筛选出的抗旱指标进行抗旱能力排序作为理论指导,选育出高产、优质、抗旱的枸杞品种,建立一套完整的鉴定评价育种体系,从而培育适应西北生态条件下生长和高产抗旱的枸杞品种,在水资源短缺的情况下,促进我国枸杞产业的高质量发展。目前单纯依靠叶片性状特征评价抗旱性不够全面,还需对枝条、根、幼苗等器官的抗旱性进行研究,注重从不同器官、不同生活史周期的生理生态指标综合筛选宁夏枸杞的抗旱指标,并指导抗旱高产优质品种的选育。

致 谢

本研究由全国第四次中药资源普查项目甘肃省崆峒区普查(GSZYPC201711)、甘肃静宁县普查(GSZYPC201804)和甘肃省高等教育教学成果培育项目“基于大学生创新创业的中药生理生态学教学改革探索”(JXCGPY2022183)共同资助。

参 考 文 献:

- [1] 赵建华,李浩霞,周旋,等.干旱胁迫对宁夏枸杞生长及果实糖分积累的影响[J].植物生理学报,2012,48(11):1063-1068.
ZHAO J H, LI H X, ZHOU X, et al. Influence of drought stress on plant growth and sugar accumulation in fruit of *Lycium barbarum* L. [J]. Plant Physiology Journal, 2012, 48(11): 1063-1068.
- [2] 张唯.宁夏今年现代枸杞全产业链综合产值力争突破340亿元[N].宁夏日报,2024-04-24.
ZHANG W. The comprehensive output value of the whole industry chain of modern wolfberry in Ningxia strives to exceed 34 billion yuan [N]. Ningxia Daily, 2024-04-24.
- [3] 董雪,迟悦春,郝玉光,等.平茬年限对沙冬青光合特性与比叶面积的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(2):105-111,122.
DONG X, CHI Y C, HAO Y G, et al. Effect of pruning years on photosynthetic characteristic and specific leaf area of *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(2): 105-111, 122.
- [4] 毛伟,李玉霖,赵学勇,等.3种藜科植物叶特性因子对土壤养分、水分及种群密度的响应[J].中国沙漠,2009,29(3):468-473.
MAO W, LI Y L, ZHAOX Y, et al. Response of leaf traits of three chenopodiaceae plants to soil nutrients, water content and plant density [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 468-473.
- [5] 李雪,田新会,杜文华.小黑麦品系成株期抗旱性研究[J].核农学报,2018,32(2):377-388.
LI X, TIAN X H, DU W H. Study on drought resistance of triticale lines at the adult plant stage [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(2): 377-388.
- [6] 季琳琳,陈素传,吴志辉,等.基于叶片解剖结构的山核桃品种的抗旱性评价[J].经济林研究,2023,41(2):21-29.
JI L L, CHEN S C, WU Z H, et al. Drought resistances analysis of different *Carya cathayensis* based on leaves structure analysis [J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(2): 21-29.

- [7] 金洪, 韩烈保, 孟庆辉, 等. 结缕草主要居群营养器官比较解剖学研究[J]. 中国草地学报, 2006, 28(4): 11-17.
JIN H, HAN L B, MENG Q H, et al. Study on comparative anatomy of vegetative organs of main populations of *Zoysia japonica* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(4): 11-17.
- [8] 刘红茹, 冯永忠, 王得祥, 等. 延安 5 种木犀科园林植物叶片结构及抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 75-81.
LIU H R, FENG Y Z, WANG D X, et al. Drought resistances and leaf structures of five Oleaceae ornamental plants in Yan'an [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 75-81.
- [9] 王坤, 韦晓娟, 李宝财, 等. 金花茶组植物叶解剖结构特征与抗旱性的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(12): 34-39.
WANG K, WEI X J, LI B C, et al. Relationship between leaf anatomical structure and drought resistance of camellia sect. *Chrysanthra* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(12): 34-39.
- [10] 许慧慧, 刘肖娟, 王孟珂, 等. 文冠果不同种质资源的叶片解剖结构分析及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 348-355.
XU H H, LIU X J, WANG M K, et al. Leaf anatomical structure and evaluation of drought resistance of different germplasm resources of *Xanthoceras sorbifolium* [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(2): 348-355.
- [11] CHARTZOULAKIS K, PATAKAS A, BOSBALIDIS A M. Changes in water relations, photosynthesis and leaf anatomy induced by intermittent drought in two olive cultivars [J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 42(2): 113-120.
- [12] 曲玲, 周亚福, 焦思宁, 等. 不同枸杞属植物叶片横切面解剖结构特征分析[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(12): 1-3, 23.
QU L, ZHOU Y F, JIAO E N, et al. Anatomical structure characteristics of leaves of different lycium [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 59(12): 1-3, 23.
- [13] 毛桂莲, 梁文裕, 王盛, 等. 碱性盐胁迫对宁夏枸杞生长、结构及光合参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 236-242.
MAO G L, LIANG W Y, WANG S, et al. Effects of alkali stress on growth, structure and photosynthetic parameters of *Lycium barbarum* L. [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 236-242.
- [14] 樊云芳, 石志刚, 王亚军, 等. 十种枸杞属植物叶片解剖结构比较研究[J]. 北方园艺, 2013, (16): 181-184.
FAN Y F, SHI Z G, WANG Y J, et al. Comparison of leaf anatomy structure of 10 species of lycium Linn [J]. Northern Horticulture, 2013, (16): 181-184.
- [15] 秦垦, 吴广生, 王俊, 等. 两个宁夏枸杞品种叶片的解剖比较研究[J]. 宁夏农林科技, 2006, (1): 9-10.
QIN K, WU G S, WANG J, et al. Leaf blade anatomic comparative studies on two wolfberry varieties- Ningqi 1 and Ningqi 3 [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2006, (1): 9-10.
- [16] 章英才, 张晋宁. 几种枸杞属植物叶片的结构比较[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 1999, (4): 374.
ZHANG Y C, ZHANG J N. Comparison of leaf structure of several lycium plants [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 1999, (4): 374.
- [17] 马晓蓉, 杨淑娟, 姚宁, 等. NaCl 胁迫对宁夏枸杞叶和幼根显微及超微结构的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(12): 2087-2095.
MA X R, YANG S J, YAO N, et al. Effect of NaCl stress on the microstructure and ultrastructure of leaves and young roots in *Lycium barbarum* [J]. Acta botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(12): 2087-2095.
- [18] 年新, 高艺玮, 连敏, 等. 宁夏枸杞产业发展现状及建议[J]. 农业科技通讯, 2024, (2): 4-6.
NIAN X, GAO Y W, LIAN M, et al. Development status and suggestions of wolfberry industry in Ningxia [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2024, (2): 4-6.
- [19] 仇莹莹, 郭二丹, 彭雪, 等. 宁夏枸杞研究开发综述[J]. 现代农业科技, 2023, (4): 188-191, 212.
QIU Y Y, GUO E D, PENG X, et al. Review on research and development of *Lycium barbarum* in Ningxia [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023, (4): 188-191, 212.
- [20] 李秀, 翟军团, 宋照龙, 等. 胡杨枝叶形态及化学计量特征的性别差异[J]. 生态学杂志, 2023, 42(7): 1586-1594.
LI X, ZHAI J T, SONG Z L, et al. Sex differences in morphological and stoichiometric characteristics of *Populus euphratica* Oliv. branches and leaves [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(7): 1586-1594.
- [21] 张治国, 魏海霞. 微山湖红荷湿地主要植物种比叶面积和叶干物质含量研究[J]. 江西农业学报, 2021, 33(5): 63-69.
ZHANG Z G, WEI H X. Specific leaf area and leaf dry matter content of main plant species in red lotus wetland of Weishan Lake [J]. Acta Agricultrae Jiangxi, 2021, 33(5): 63-69.
- [22] 郭学民, 刘建珍, 翟江涛, 等. 16 个品种桃叶片解剖结构与树干抗寒性的关系[J]. 林业科学, 2015, 51(8): 33-43.
GUO X M, LIU J Z, ZHAI J T, et al. Relationship between leaf anatomical structure and trunk cold resistance of 16 peach cultivars [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(8): 33-43.
- [23] 赵祥, 董宽虎, 张垚, 等. 不同居群达乌里胡枝子叶片解剖结构研究[J]. 草地学报, 2009, 17(4): 445-451.
ZHAO X, DONG K H, ZHANG Y, et al. Study on lamina anatomical structure of *Lespedeza daurica* (Laxm.) Schindl. from different populations [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 17(4): 445-451.
- [24] 徐扬, 陈小红, 赵安玖. 川西高原 4 种苹果属植物叶片解剖结构与其抗旱性分析[J]. 西北植物学报, 2015, 35(11): 2227-2234.
XU Y, CHEN X H, ZHAO A J. Drought resistance evaluation and leaf anatomical structures of four species of *Malus* plants in western Sichuan Plateau [J]. Acta botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(11): 2227-2234.
- [25] LI U Q, LI Z H, JI W Y. Research progress on leaf anatomical structures of plants under drought stress [J]. Agricultural Science and Technology, 2016, 17(1): 4-7, 14.
- [26] 高文辉, 王玉平. 7 种枸杞属植物叶片及剖面显微结构的比较[J]. 林业科技通讯, 2016, (10): 14-18.
GAO W H, WANG Y P. Comparison of leaf and profile microstructure of 7 species of *Lycium barbarum* [J]. Practical Forestry Technology, 2016, (10): 14-18.

- [27] 李捷, 崔永涛, 柏延文, 等. 两种枸杞对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(5): 79-87, 99.
LI J, CUI Y T, BAI Y W, et al. Physiological response and drought resistance evaluation of two kinds wolfberries on drought stress [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(5): 79-87, 99.
- [28] 景晨娟, 陈雪峰, 王端, 等. 三个李子品种叶片结构差异及其抗旱性分析[J]. 北方园艺, 2021, (15): 27-34.
JING C J, CHEN X F, WANG D, et al. Analysis of leaf structure differences and relationships between the anatomical structure and drought resistances of three plums cultivars [J]. Northern Horticulture, 2021, (15): 27-34.
- [29] 刘丹, 邱长玉, 李标, 等. 用隶属函数法综合评价9个实用桑树品种的耐旱性[J]. 蚕学通讯, 2022, 42(4): 1-11.
LIU D, QIU C Y, LI B, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of nine practical mulberry varieties by membership function method [J]. Newsletter of Sericultural Science, 2022, 42(4): 1-11.
- [30] 李守强, 田世龙, 李梅, 等. 主成分分析和隶属函数法综合评价15种(系)马铃薯的营养品质[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 272-276, 291.
LI S Q, TIAN S L, LI M, et al. Comprehensive evaluation of the nutrition quality of 15 varieties of potatoes by principal component analysis and subordinate function method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 272-276, 291.
- [31] 王飞, 王波, 郁继华, 等. 基于隶属函数法的油麦菜栽培基质综合评价[J]. 西北农业学报, 2020, 29(1): 117-126.
WANG F, WANG B, YU J H, et al. Comprehensive evaluation on substrates for lettuce soilless culture by membership function method [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(1): 117-126.
- [32] WANG W, MENDEL J M. Interval-valued intuitionistic fuzzy aggregation methodology for decision making with a prioritization of criteria [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, (4): 115-127.
- [33] SHAMILOV A, SENTURK S, YILMAZ N. Generalized maximum fuzzy entropy methods with applications on wind speed data rity in the case, when kernel contain logarithmic singularity and its power [J]. Journal of Mathematics and System Science, 2016, 6: 46-52.

(上接第41页)

- [27] 陈冰嫻, 徐宁, 李淑杰, 等. 高粱亲本系萌发期抗旱性鉴定[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 17-29.
CHEN B R, XU N, LI S J, et al. Identification of the drought resistance of sorghum parental lines at germination stage [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(8): 17-29.
- [28] 王志恒, 黄思麒, 李成虎, 等. 13种藜麦萌发期抗逆性综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 25-36.
WANG Z H, HUANG S Q, LI C H, et al. Comprehensive evaluation of stress resistance during germination of 13 quinoa species [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 25-36.
- [29] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和SPSS软件--兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005, (3): 65-69.
LIN H M, ZHANG W L. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software--to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai etc [J]. Statistical Research, 2005, (3): 65-69.
- [30] 李亚萍, 苏剑, 周发明, 等. 干旱和盐胁迫对金花菜种子萌发及幼苗抗氧化保护酶活性的影响[J]. 草学, 2019, (3): 24-35.
LI Y P, SU J, ZHOU F M, et al. Effect of drought and salt on germination and oxidation resistance protection in *Medicago polymorpha* [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2019, (3): 24-35.
- [31] DAVIES W J, ZHANG J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42(1): 55-76.
- [32] 吴敏, 张文辉, 马闯, 等. 干旱胁迫对栓皮栎种子萌发能力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 91-100.
WU M, ZHANG W H, MA C, et al. Effect of drought stress on seed germination ability of *Quercus variabilis* BI [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 91-100.
- [33] 王亮红, 张秀梅, 陈艾, 等. 紫穗槐幼苗根系生理特性和解剖结构对PEG-6000模拟干旱的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 511-517.
WANG J H, ZHANG X M, CHEN A, et al. Response of physiological characteristics and anatomical structure of roots in *Amorpha fruticosa* seedlings exposed to simulated drought with PEG-6000 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 511-517.
- [34] 王志恒, 邹芳, 杨秀柳, 等. PEG-6000模拟干旱对春小麦种子萌发的影响[J]. 种子, 2019, 38(7): 12-17.
WANG Z H, ZOU F, YANG X L, et al. Effects of PEG-6000 on seed germination of spring wheat under simulated drought conditions [J]. Seed, 2019, 38(7): 12-17.
- [35] 李文妮, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3066-3074.
LI W R, ZHANG S Q, SHAN L. Seeds germination characteristics and drought-tolerance of alfalfa and sorghum seedling under water stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3066-3074.
- [36] SONG J, FENG G, TIAN C Y, et al. Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage [J]. Annals of Botany, 2005, 96(3): 399-405.
- [37] 徐宁, 陈冰嫻, 王明海, 等. 绿豆品种资源萌发期耐碱性鉴定[J]. 作物学报, 2017, 43(1): 112-121.
XU N, CHEN B R, WANG M H, et al. Identification of alkali tolerance of mungbean germplasm resources during germination [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(1): 112-121.