

网络出版时间:2014-07-09 11:51

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.004

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.004.html

基于叶片解剖结构的西宁市 11 种城市 森林植物抗旱性评价

张 义,王得祥,宋 彬,吕 迪,王 涛

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】基于叶片解剖结构,对位于干旱半干旱地区的青海省西宁市城区 11 种常见城市森林植物的抗旱特性进行分析。**【方法】**2012-07 从西宁市文化公园采集 11 种供试植物 4 个方向上层健康成熟叶片,采用石蜡切片法和指甲油印迹法制片,在 Motic Image Advanced 3.2 软件下观测叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、上表皮角质层厚度、栅栏组织细胞层数、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、中脉厚度、下表皮气孔密度,并计算出栅栏组织/海绵组织厚度比和叶片结构紧实度,运用方差分析和主成分分析并结合模糊隶属函数法,对 11 种植物的抗旱性进行综合评价。**【结果】**11 种植物叶片均具备抵抗干旱环境的解剖结构,如具有明显的角质层、发达的栅栏组织和叶脉及较大密度的气孔。所选 11 个旱性指标除栅栏组织细胞层数外,其余 10 个指标在 11 种植物间差异显著,运用主成分分析筛选出栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度、中脉厚度作为抗旱性综合评价的主要指标。**【结论】**11 种供试植物的抗旱性强弱排序为:山桃>柠条>欧洲白榆>木藤蓼>山杏>河北杨>金叶莢>沙枣>沙棘>香荚蒾>水蜡。

【关键词】 叶片解剖结构;抗旱性;主成分分析;隶属函数分析;西宁市

【中图分类号】 Q944.56;Q948.112⁺.3 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2014)08-0086-07

Leaf anatomical structure based drought resistance evaluation of 11 urban forest plants in Xining city

ZHANG Yi, WANG De-xiang, SONG Bin, LÜ Di, WANG Tao

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The leaf anatomical structures of 11 urban forest plants in a semi-arid city Xining were evaluated to analyze their drought resistances. **【Method】** In July 2012, healthy mature leaves from four directions of 11 tested plants in the Culture Park, Xining were picked. Paraffin sectioning method and nail oil seal were used to make permanent loadings. Thickness of leaves, thickness of upper epidermis, thickness of lower epidermis, cuticle thickness of upper epidermis, layers of palisade tissue, thickness of palisade tissue, thickness of spongy tissue, thickness of vein, and stoma density of lower epidermis were measured by Motic Image Advanced 3.2 and thickness ratio of palisade tissue to spongy tissue and compactness of leaf structure were calculated. Variance analysis, principal component analysis and membership function were used to evaluate the drought resistances of the 11 plants. **【Result】** Leaves of all 11 plants had anatomical structures in resistance to arid environment, including the obvious cuticle, developed palisade tissue and veins, and pores with large density. Except the layers of palisade tissue, all xeromorphic indices had signifi-

【收稿日期】 2013-11-20

【基金项目】 林业公益性行业科研专项(201104045)

【作者简介】 张 义(1986—),女,河北定州人,在读硕士,主要从事城市森林生态研究。E-mail: lovelybeethoven@163.com

【通信作者】 王得祥(1966—),男,青海乐都人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林生态与森林可持续经营研究。

E-mail: Wangdx66@126.com

cant differences between the 11 plants. Four typical xeromorphic indices including thickness of palisade tissue,thickness of spongy tissue, cuticle of upper epidermis. and stoma density of lower epidermis were screened by principal component analysis.【Conclusion】 The drought resistances of the 11 plants were in a decreasing order of *Prunus davidiana*>*Caragana korshinskii*>*Ulmus laevis*>*Fallopia aubertii*>*Siberian apricot*>*Populus hopeiensis*>*Caryopteris clandonensis*>*Elaeagnus angustifolia*>*Hippophae rhamnoides*>*Viburnum farreri*>*Ligustrum obtusifolium*.

Key words: leaf anatomical structure; drought resistance; principal components analysis; subordinate function analysis;Xining city

中国西北部干旱半干旱地区的许多城市森林植物,在长期的进化或者栽培过程中形成了适应该地区高温、干旱和强光辐射等一系列环境因素的形态结构特征,研究这类植物的形态结构与环境适应的关系,将有利于揭示植物对于干旱环境胁迫的适应机理^[1]。叶片是植物进化过程中对环境变化较敏感且可塑性较大的器官,其结构特征最能体现环境因子的影响或植物对环境的适应能力^[2],对于评价植物的抗旱性能具有不可替代的作用。植物抗旱性研究对认识和保护干旱半干旱地区脆弱的生态系统,保护与持续利用植物资源具有重要的实践意义。近年来,许多学者在干旱半干旱地区开展了植物抗旱性研究,但研究内容多集中在生理生化指标方面^[3-9],而通过叶片解剖结构定量分析多个物种间抗旱性的研究相对较少^[10]。为此,本研究以青海西宁为研究

区域,应用主成分分析及隶属函数法,对该地区常见且应用规模较大的 11 种城市森林植物的叶片解剖结构进行了分析,探讨了叶片旱生结构指标的选择方法,以期抗旱造林、园林绿化等的树种选择提供科学依据,并阐明植物适应环境的形态结构。

1 材料与方法

1.1 供试植物及样品采集

供试植物为山杏、山桃、香荚蒾、河北杨、金叶莢、木藤蓼、沙棘、欧洲白榆、沙枣、水蜡、柠条等 11 种城市森林植物(表 1),于 2012-07 采集于西宁市文化公园。同一树种(灌木)选取胸径相对一致的 3 株作为样株,从东西南北 4 个方位采集上层的健康成熟叶片 3 片,沿中脉部位切取长 1.0 cm、宽 0.5 cm 的小片,于 FAA 固定液中固定 12 h 以上。

表 1 西宁市 11 种城市森林植物的基本情况
Table 1 Basic information of the 11 urban forest plants in Xining

植物种 Species	科 Families	属 Genus	生活型 Life types
山杏 <i>Armenia casibirica</i>	蔷薇科 Rosaceae	杏属 <i>Armeniaca</i>	小乔木 Small arbor
山桃 <i>Prunus davidiana</i>	蔷薇科 Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>	小乔木 Small arbor
香荚蒾 <i>Viburnum farreri</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	灌木 Shrub
河北杨 <i>Populus hopeiensis</i>	杨柳科 Salicaceae	杨属 <i>Populus</i>	乔木 Tree
金叶莢 <i>Caryopteris clandonensis</i>	马鞭草科 Verbenaceae	莢属 <i>Caryopteris</i>	灌木 Shrub
木藤蓼 <i>Fallopia aubertii</i>	蓼科 Polygonaceae	首乌属 <i>Fallopia</i>	半灌木 Subshrub
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	灌木 Shrub
欧洲白榆 <i>Ulmus laevis</i>	榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	乔木 Tree
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	乔木 Tree
水蜡 <i>Ligustrum obtusifolium</i>	木犀科 Oleaceae	女贞属 <i>Ligustrum</i>	灌木 Shrub
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	豆科 Leguminosae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	灌木 Shrub

1.2 制 片

叶片采用常规石蜡切片法^[11]制片,切片厚度为 10 μm,番红-固绿对染,树脂封片;测定气孔密度时采用指甲油印迹法^[12]制片。

1.3 测定指标与方法

采用 Motic Image Advanced 3.2 软件拍照并观察测量叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、上表皮角质层厚度、气孔密度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织细胞层数和中脉厚度等指标,每项指标

测量 40 组数据,并计算出栅栏组织/海绵组织厚度比及叶片紧实度(栅栏组织厚度/叶片厚度)^[10]。利用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 对数据进行单因素方差分析及主成分分析。树种抗旱性评价采用模糊隶属函数法^[13]。

2 结果与分析

2.1 供试植物叶片解剖结构特征的比较

2.1.1 表 皮 观测结果(表 2,图 1)表明,供试的

11 种城市森林植物,其表皮均由单层细胞构成,排列紧密,具有角质层。11 种植物叶片的上表皮厚度变幅为 15.6~38.7 μm ,其中山杏的上表皮最厚,水蜡的最薄,其余植物种介于二者之间;下表皮厚度变幅为 8.9~19.2 μm ,木藤蓼最厚,其次是山桃、柠条,欧洲白榆最薄;从上、下表皮特征来看,山杏、木藤蓼的表皮有更好的保持和贮水功能。上表皮角质层厚度变幅为 1.2~9.3 μm ,其中金叶莢最厚,其次是柠条、山杏、山桃等,最薄的是欧洲白榆;从角质层

特征来看,金叶莢叶片的保水性较好,欧洲白榆叶片的保水性较差。

气孔是植物控制水分和进行气体交换的通道,直接影响植物的蒸腾作用。本研究结果(表 2)显示,11 个供试植物的气孔主要分布在叶片下表皮,气孔密度变化于 80.6~408.4 个/ mm^2 ,单位面积内气孔数最多的是山杏,其次是水蜡、沙枣、欧洲白榆等,单位面积气孔数最少的是金叶莢;从气孔密度来讲,山杏、沙枣等抗旱性较强。

表 2 西宁市 11 种城市森林植物叶片的解剖特征

Table 2 Leaf anatomical characteristics of the 11 urban forest plants in Xining

植物种 Species	TL/ μm	TUE/ μm	TLE/ μm	CTUE/ μm	LPT	TPT/ μm
山杏 <i>Armenia casibirica</i>	218.4 $\pm$ 1.3 d	38.7 $\pm$ 10.5 a	14.5 $\pm$ 1.2 d	3.5 $\pm$ 0.1 c	3~4	92.7 $\pm$ 1.2 d
山桃 <i>Prunus davidiana</i>	240.9 $\pm$ 8.24 c	27.81 $\pm$ 8.1 b	16.8 $\pm$ 0.2 b	2.8 $\pm$ 0.1 d	2~3	123.2 $\pm$ 13.6 cd
香荚蒾 <i>Viburnum farreri</i>	223.1 $\pm$ 13.4 d	19.1 $\pm$ 2.3 bc	9.5 $\pm$ 0.3 f	1.3 $\pm$ 0.2 i	2~3	133.4 $\pm$ 2.5 c
河北杨 <i>Populus hopeiensis</i>	275.7 $\pm$ 4.2 f b	22.4 $\pm$ 0.5 bc	9.9 $\pm$ 0.2 f	2.4 $\pm$ 0.2 e	2	157.3 $\pm$ 1.7 b
金叶莢 <i>Caryopteris clandonensis</i>	265.5 $\pm$ 5.9 b	16.8 $\pm$ 0.8 bc	9.1 $\pm$ 0.2 f	9.3 $\pm$ 0.2 a	2	129.9 $\pm$ 0.9 c
木藤蓼 <i>Fallopia aubertii</i>	177.5 $\pm$ 0.6 f	27.9 $\pm$ 2.7 b	19.2 $\pm$ 0.4 a	2.0 $\pm$ 0.4 f	1~2	73.1 $\pm$ 1.9 f
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	279.6 $\pm$ 18.4 b	15.8 $\pm$ 0.5 c	9.6 $\pm$ 0.3 f	2.5 $\pm$ 0.2 e	2	154.3 $\pm$ 12.6 b
欧洲白榆 <i>Ulmus laevis</i>	193.1 $\pm$ 7.6 e	18.5 $\pm$ 1.9 bc	8.9 $\pm$ 0.2 f	1.2 $\pm$ 0.1 g	1	113.5 $\pm$ 4.9 d
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	296.2 $\pm$ 9.2 a	24.6 $\pm$ 0.36 bc	12.4 $\pm$ 0.4 e	1.5 $\pm$ 0.4 eh	2~3	145.3 $\pm$ 4.4 b
水蜡 <i>Ligustrum obtusifolium</i>	153.7 $\pm$ 5.2 g	15.6 $\pm$ 0.3 c	15.7 $\pm$ 0.3 c	1.7 $\pm$ 0.2 g	1	58.1 $\pm$ 0.9 g
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	249.4 $\pm$ 1.1 c	15.9 $\pm$ 0.2 c	16.0 $\pm$ 0.2 c	4.4 $\pm$ 0.1 b	4~6	182.6 $\pm$ 0.9 a
变异系数/% CV	19.00	35.37	27.98	75.54	47.49	29.56

植物种 Species	TST/ μm	P/S	CLS/%	TV/ μm	SD/(个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)
山杏 <i>Armenia casibirica</i>	81.9 $\pm$ 0.3 d	1.1 $\pm$ 0.1 d	42.5 $\pm$ 0.7 e	631.3 $\pm$ 1.2 f	408.4 $\pm$ 0.7 a
山桃 <i>Prunus davidiana</i>	87.9 $\pm$ 6.5 d	1.4 $\pm$ 0.2 cd	51.3 $\pm$ 7.4 cd	915.2 $\pm$ 7.9 a	198.4 $\pm$ 0.5 g
香荚蒾 <i>Viburnum farreri</i>	82.3 $\pm$ 1.1 d	1.6 $\pm$ 0.01 c	59.9 $\pm$ 2.9 b	462.1 $\pm$ 0.3 j	161.9 $\pm$ 2.1 i
河北杨 <i>Populus hopeiensis</i>	83.3 $\pm$ 1.3 d	1.9 $\pm$ 0.04 b	57.1 $\pm$ 0.3 bc	623.4 $\pm$ 2.9 g	215.2 $\pm$ 0.3 f
金叶莢 <i>Caryopteris clandonensis</i>	97.2 $\pm$ 1.7 c	1.3 $\pm$ 0.03 cd	48.9 $\pm$ 0.7 d	783.3 $\pm$ 1.8 d	80.6 $\pm$ 0.5 k
木藤蓼 <i>Fallopia aubertii</i>	64.9 $\pm$ 1.3 e	1.1 $\pm$ 0.05 d	41.2 $\pm$ 0.9 e	857.1 $\pm$ 5.2 c	110.4 $\pm$ 0.4 g
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	107.7 $\pm$ 6.5 b	1.4 $\pm$ 0.2 cd	55.2 $\pm$ 3.7 bc	595.5 $\pm$ 1.1 h	179.1 $\pm$ 0.85 h
欧洲白榆 <i>Ulmus laevis</i>	54.8 $\pm$ 2.2 f	2.1 $\pm$ 0.1 b	58.9 $\pm$ 4.6 b	902.9 $\pm$ 2.1 b	301.2 $\pm$ 0.8 d
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	119.7 $\pm$ 2.1 a	1.2 $\pm$ 0.04 d	49.1 $\pm$ 1.2 d	657.1 $\pm$ 0.3 e	317.6 $\pm$ 0.9 c
水蜡 <i>Ligustrum obtusifolium</i>	69.4 $\pm$ 1.1 e	0.8 $\pm$ 0.02 f	37.9 $\pm$ 1.8 e	472.9 $\pm$ 0.4 i	381.6 $\pm$ 0.6 b
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	27.1 $\pm$ 0.6 g	6.7 $\pm$ 0.17 a	73.2 $\pm$ 0.5 a	317.5 $\pm$ 1.1 k	224.4 $\pm$ 0.2 e
变异系数/% CV	31.13	84.34	19.35	26.92	43.71

注:TL. 叶片厚度;TUE. 上表皮厚度;TLE. 下表皮厚度;CTUE. 上表皮角质层厚度;LPT. 栅栏组织细胞层数;TPT. 栅栏组织厚度;TST. 海绵组织厚度;P/S. 栅栏组织/海绵组织厚度比;CLS. 叶片结构紧实度;TV. 中脉厚度;SD. 下表皮气孔密度。同列数据后标不同小写字母表示物种间在 $P=0.05$ 水平存在显著性差异。

Note:TL. Thickness of leaves;TUE. Thickness of upper epidermis;TLE. Thickness of lower epidermis;CTUE. Cuticle thickness of upper epidermis;LPT. Layers of palisade tissue;TPT. Thickness of palisade tissue;TST. Thickness of spongy tissue;P/S. Thickness ratio of palisade tissue to spongy tissue;CLS. Compactness of leaf structure;TV. thickness of vein;SD. Stoma density of lower epidermis. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among species at $P=0.05$ level.

2.1.2 叶 肉 从图 1 可看出,柠条的背、腹叶两面均发育为栅栏组织,为等面叶,其余植物种全为异面叶。从表 2 可以看出,供试植物除栅栏组织细胞层数外,栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织/海绵组织厚度比均表现出显著差异性。

叶片厚度变化于 153.7~296.2 μm ,其中沙枣叶片最厚(296.2 μm),其次为沙棘、河北杨,水蜡叶

片最薄;栅栏组织厚度变化于 58.1~182.6 μm ,柠条栅栏组织最厚,其次是河北杨、沙棘、沙枣、香荚蒾等,水蜡最薄;各供试植物间的栅栏组织细胞层数变化不一,其中以柠条层数最多(4~6),水蜡、欧洲白榆层数较少;海绵组织厚度变幅为 27.1~119.7 μm ,最厚的为沙枣,柠条最薄;供试植物中,柠条海绵组织已逐渐退化,其栅栏组织/海绵组织厚度比最

大(6.7),水蜡最小(0.8),其他植物种居中;叶片结构紧实度的变幅为 37.9%~73.2%,柠条最大,其次为香荚蒾、欧洲白榆、河北杨、沙棘,水蜡最小。综

合分析以上指标可知,柠条、沙枣、河北杨、欧洲白榆等具有较好的抗旱性,水蜡和金叶莢抗旱性较差。

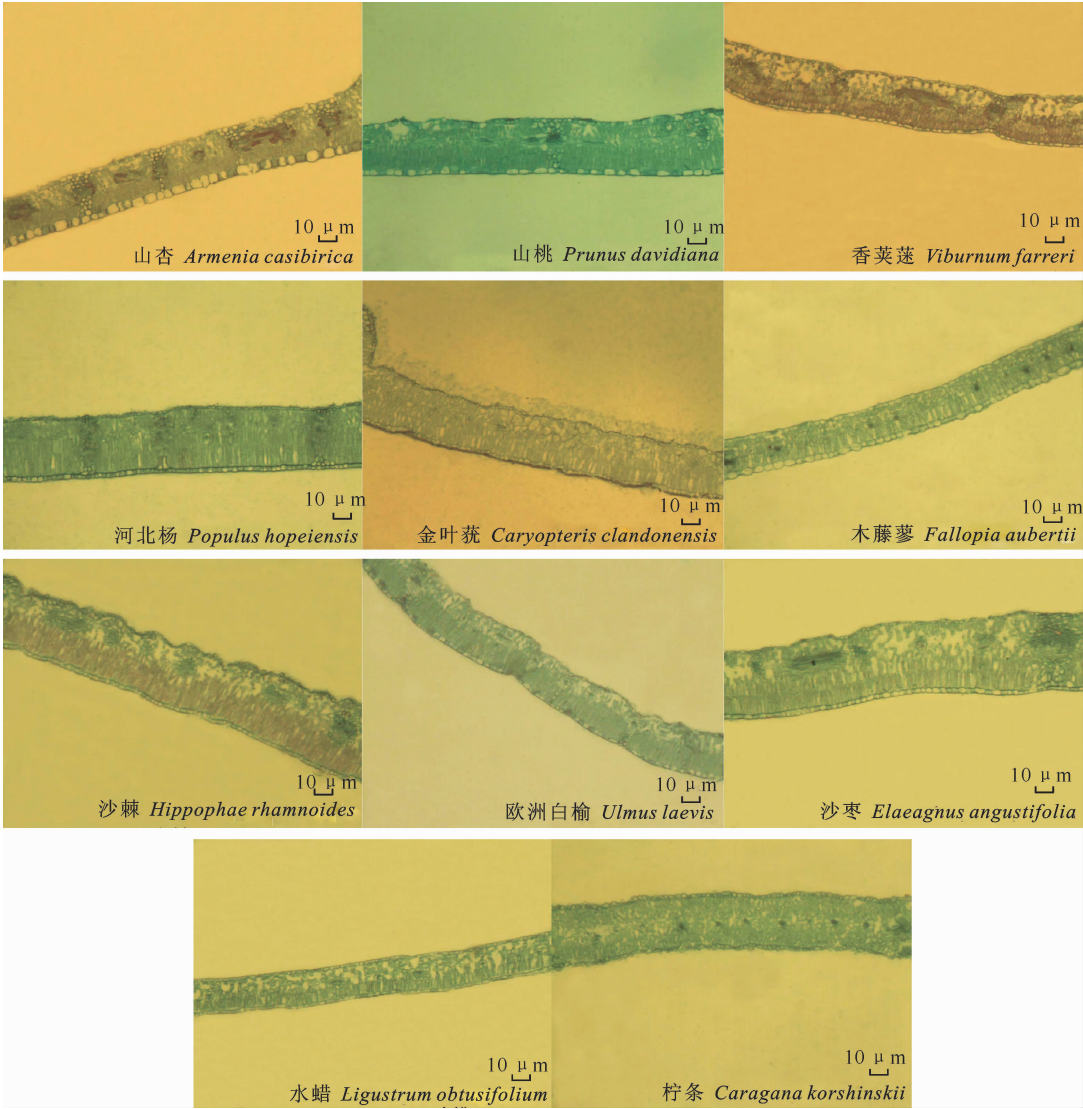


图 1 西宁市 11 种城市森林植物叶片横切面的显微结构(10×10)

Fig. 1 Micrograph leaf transection of the 11 urban forest plants in Xining (10×10)

2.1.3 叶脉 由表 2 可以看出,11 种城市森林植物叶片的中脉厚度不同,差异较大,变化于 317.5~915.2 μm,中脉厚度最大的是山桃,其次是欧洲白榆、木藤蓼、金叶莢等,而柠条中脉厚度最小,表明山桃、欧洲白榆、木藤蓼、金叶莢等抗旱性较强,而柠条抗旱性较差。

2.2 供试植物旱生指标的主成分分析

由表 2 可知,11 种植物的 11 个指标中,除了栅栏组织细胞层数差异不明显外,其余 10 个指标均差异显著,但重复间差异不显著。由于只有材料间存在显著差异且重复间差异不显著,进行主成分分析

才有意义^[14],因此本试验的 10 个抗旱指标可以用作主成分分析。

过多地选入相关密切的指标不仅不利于揭示类型特征,还会产生认识上的偏差,选择彼此独立的有代表性的指标才能获得最优的方案^[15]。主成分分析就是将分散在一组变量上的信息,集中到某几个综合指标和主成分上的统计分析方法,各指标在主成分中的载荷值不同,载荷值越大,说明其对主成分的贡献越大,典型性越强。

主成分的特征值和贡献率是选择主成分的依据,经过主成分分析将 11 种植物的 10 个与抗旱性

有关的叶片旱生指标转化为了 4 个主成分。由表 3 代表原来的 11 个单项指标的 82.206%的信息。来看,前 4 个主成分的累积贡献率已达 82.206%,

表 3 西宁市 11 种城市森林植物叶片旱生指标的主成分载荷矩阵

Table 3 Principal components matrix of the 11 urban forest plants in Xining

指标 Index	主成分 Principal components			
	1	2	3	4
叶片厚度 Thickness of leaves	0.589	0.636	0.360	−0.099
上表皮厚度 Thickness of upper epidermis	−0.505	−0.069	0.636	0.143
下表皮厚度 Thickness of lower epidermis	−0.433	−0.619	0.021	−0.145
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	0.924	0.222	0.239	0.005
海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue	−0.229	0.862	0.273	−0.312
中脉厚度 Thickness of vein	−0.479	0.344	−0.012	0.665
栅栏组织厚度/海绵组织厚度 Palisade tissue/spongy tissue	0.776	−0.545	−0.044	0.130
叶片结构紧实度 Compactness of leaf structure	0.914	−0.191	0.078	0.186
上表皮角质层厚度 Cuticle of upper epidermis	0.117	0.560	−0.512	0.494
下表皮气孔密度 Stoma density of lower epidermis	−0.039	−0.306	0.585	0.484
特征值 Feature value	3.377	2.443	1.279	1.121
贡献率/% Contribution percentage	33.768	24.432	12.792	11.214
累积贡献率/% Accumulation contribution	33.768	58.200	70.992	82.206

第 1 主成分特征值为 3.377,贡献率为 33.768%,其中栅栏组织厚度、叶片结构紧实度的载荷值远远高于其他指标,2 个指标均与栅栏组织有很大关系。发达的栅栏组织是植物对强光生境的适应,大量的栅栏组织可增加水分从维管束到表皮间的运输效率和叶肉细胞的表面积,可保证光合作用对水分的需求,避免干旱地区强烈光照对叶肉细胞的灼伤,其次可以有效地利用衍射光进行光合作用^[2]。栅栏组织越厚、叶片结构紧实度越大、栅栏组织/海绵组织厚度比越高,则植物抗旱性越强。

第 2 主成分特征值为 2.443,贡献率为 24.432%,其中海绵组织厚度及叶片厚度有较高的载荷值。旱生植物除栅栏组织外,海绵组织特征也最能反映植物对光照的适应性^[16]。海绵组织细胞主要用于气体交换,也可进行光合作用。相对于栅栏组织,海绵组织越发达,植物抗旱性越差^[10]。叶片厚度越厚,植物的保水能力越强,植物抗旱能力越强。

第 3 主成分特征值为 1.279,贡献率为 12.792%,其中以上表皮厚度的载荷值较大。表皮主要起保护和贮水作用,较大的表皮细胞能贮藏更多的水分,有利于植物在干旱环境下生存。

第 4 主成分特征值为 1.121,贡献率为 11.214%,叶片中脉厚度有较高的载荷值。发达的中脉具有良好的水分、养分输送功能和保水、贮水作用,中脉越厚,植物抗旱性越强。

2.3 供试植物抗旱性综合评价

对品种进行综合评价,就是对影响事物或现象的每一个因素作出总的评价,赋予其一个非负实数,这种评价方法即隶属函数分析法^[17]。用隶属函数进行综合评价,弥补了方差分析的不足,它能对各品种的各项指标进行综合分析,从而对植物作出全面评价。根据主成分分析结果,筛选出栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度、中脉厚度 4 项指标作为抗旱性评价的主要指标。其中栅栏组织厚度、上表皮厚度、中脉厚度与植物抗旱性呈正相关,可用模糊隶属函数法计算;而海绵组织厚度与植物抗旱性呈负相关,可用反隶属函数计算。通过对 4 项指标的隶属函数值求平均值,按其大小排序得到 11 种城市森林植物基于叶片解剖结构的抗旱性综合评价结果(表 4)为:山桃>柠条>欧洲白榆>木藤蓼>山杏>河北杨>金叶莠>沙枣>沙棘>香荚蒾>水蜡。

表 4 西宁市 11 种城市森林植物叶片旱性结构基于隶属函数法的综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation of the xeromorphic structure for the 11 urban forest plants in Xining

植物种 Speices	隶属函数值 Membership function values				隶属函数均值 Average of membership function	抗旱能力排序 Drought resistance capability order
	栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue	上表皮厚度 Thickness of upper epidermis	中脉厚度 Thickness of vein		
山杏 <i>Armenia casibirica</i>	0.275 7	0.405 1	1.000 0	0.373 4	0.513 5	5
山桃 <i>Prunus davidiana</i>	0.567 2	0.340 5	0.527 3	1.000 0	0.608 7	1
香荚蒾 <i>Viburnum farreri</i>	0.600 6	0.400 9	0.147 2	0.000 0	0.287 2	10

续表 4 Continued table 4

植物种 Species	隶属函数值 Membership function values				隶属函数均值 Average of membership function	抗旱能力排序 Drought resistance capability order
	栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue	上表皮厚度 Thickness of upper epidermis	中脉厚度 Thickness of vein		
河北杨 <i>Populus hopeiensis</i>	0.791 3	0.390 1	0.294 4	0.356 0	0.457 9	6
金叶莢 <i>Caryopteris clandonensis</i>	0.572 8	0.241 2	0.053 7	0.709 0	0.394 2	7
木藤蓼 <i>Fallopia aubertii</i>	0.119 2	0.587 5	0.534 2	0.871 9	0.528 2	4
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	0.767 7	0.127 8	0.008 7	0.294 4	0.299 6	9
欧洲白榆 <i>Ulmus laevis</i>	0.441 9	0.696 0	0.122 9	0.973 1	0.558 5	3
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	0.695 4	0.000 0	0.388 3	0.430 3	0.378 5	8
水蜡 <i>Ligustrum obtusifolium</i>	0.000 0	0.539 7	0.000 0	0.023 9	0.140 9	11
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1.000 0	1.000 0	0.171 2	0.079 9	0.562 8	2

3 结论与讨论

本研究中 11 种植物的叶片解剖特征表明:不同植物种间存在不同程度的差异,但因其均为西宁市应用频次较高的植物,与蔡永立等^[9]、史刚荣等^[12]、肖军等^[18]在华东、华南地区研究的植物相比,大都形成了对西北地区干旱强光环境的适应结构,如具有有效减少水分蒸发的发达角质层、增强贮藏水分能力的较厚叶片、避免强光灼伤和进行光合作用的发达栅栏组织、起输导和支持作用的发达中脉以及强光下利于植物蒸腾与散热的较大密度的气孔。

本研究还通过主成分分析将 11 种植物的抗旱鉴定指标归纳成栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度以及中脉厚度 4 个主成分,4 个主成分的累积方差贡献率为 82.206%,其中第 1 主成分的贡献率最高,为 33.768%,而第 1 主成分中又以栅栏组织厚度的载荷值最大,这与刘红茹等^[10]评价延安城区 10 种阔叶植物时选择的指标相同,说明栅栏组织是评价植物抗旱性的重要指标之一。上表皮厚度作为评价抗旱性的代表性指标,也在肖军等^[18]、韩刚等^[19]的论文中被多次提到。选择中脉厚度作为抗旱性代表指标,在张振师等^[20]的论文中也曾用到。而海绵组织作为植物抗旱性代表指标则较少提到,仅见于李晓储等^[21]对含笑叶片结构与抗旱性的分析中,说明本研究选择将海绵组织作为代表性抗旱指标仅针对供试的 11 种植物,不能广泛应用于其他植物。

隶属函数分析提供了一条在多指标测定基础上对研究对象某一特征进行综合评价的途径,避免了单一指标的片面性^[14]。不同植物在解剖结构上的抗旱机制可能不同,各种指标之间可能存在此消彼长的情况。因此,利用多指标对植物的抗旱性进行综合评价,能更好地揭示植物对干旱的适应机制,提高叶片抗旱鉴定的准确性。本试验在主成分分析的

基础上选择了 4 个主要指标进行隶属函数分析,使试验结果更加可靠。

本研究对 11 种植物抗旱性的鉴定结果表明,柠条、山杏、欧洲白榆有较强的抗旱性,这与韩刚等^[19]、周泽生等^[22]、胡承海等^[23]的研究结论一致。而山桃抗旱性的强弱与朱粟琼等^[24]描述的山桃抗旱性有差异,可能是由于采样地点生境不同或植物抗旱评价所选择的指标不同造成的。本研究所选的 11 种植物中,山桃、柠条、欧洲白榆、木藤蓼、山杏的叶片均有明显的旱性结构,是适于阳坡、半阳坡大面积应用的抗旱造林和园林绿化植物;香荚蒾、水蜡的抗旱性相对较差,可在阴坡或半阴坡栽植。

植物的抗旱性评价指标有很多,本研究所选的 11 种植物中,除沙棘、柠条外,针对其他植物的研究很少见,本研究仅从叶片解剖结构水平对植物抗旱性进行了比较分析,有其局限性。近年来迅速发展的分子遗传学为植物的抗旱性研究提供了有利工具,尤其是已经创立的数量性状基因作图(Quantitative trait locus, QTL)方法,将会极大地促进植物抗旱性的遗传研究。从分子水平上阐明植物抗旱性的物质基础及其生理功能,从而通过基因工程手段进行抗旱基因重组^[23],以创造抗旱新类型,这应是当前研究的一个热点。有理由相信,对于旱半干旱地区植物抗旱性的深入研究,将对人类认识和保护脆弱的生态系统、合理保护与持续利用植物资源具有重要的理论和指导意义^[2]。

[参考文献]

[1] 田 英,倪细炉,于海宁,等. 6 种抗旱灌木叶片形态解剖学特征 [J]. 中国农学通报,2010,26(22):113-117.
Tian Y, Ni X L, Yu H N, et al. Studies on drought resistance on morphology anatomical structure of leave of six species shrubs [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26 (22): 113-117. (in Chinese)
[2] 何 涛,吴学明,贾静芬. 青藏高原高山植物的形态和解剖结构

及其对环境的适应性研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2574-2583.

He T, Wu X M, Jia J F. Research advances in morphology and anatomy of alpine plants growing in the Qinghai-Tibet plateau and their adaptions to environments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2574-2583. (in Chinese)

[3] 谭永芹, 柏新富, 朱建军, 等. 干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能 [J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6815-6823.

Tan Y Q, Bai X F, Zhu J J, et al. An analysis on the water status in twigs and its relations to the drought resistance in five woody plants living in arid zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6815-6823. (in Chinese)

[4] 史刚荣, 刑海涛. 淮北相山 8 个树种叶片的生态解剖特征 [J]. 林业科学, 2007, 43(3): 28-30.

Shi G R, Xing H T. Eco-anatomical characteristics of eight tree species in Xiangshan Mountain, Huaibei [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(3): 28-30. (in Chinese)

[5] 杜华栋, 徐翠红, 刘 萍, 等. 陕北黄土高原优势植物叶片解剖结构的生态适应性 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(2): 293-300.

Du H D, Xu C H, Liu P, et al. Foliar anatomical structures and ecological adaptabilities of dominant plants in the north Shaanxi Loess Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2010, 30(2): 293-300. (in Chinese)

[6] 史刚荣, 蔡庆生. 白三叶叶片解剖可塑性及其对光强的响应 [J]. 草地学报, 2006, 14(4): 301-303.

Shi G R, Cai Q S. Leaf anatomic plasticity of white clover and its response to different light intensities [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(4): 301-303. (in Chinese)

[7] 李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应 [J]. 植物学通报, 2005, 22(S1): 118-127.

Li F L, Bao W K. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environmental change [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005, 22(S1): 118-127. (in Chinese)

[8] Bosabalidis A M, Kofidis G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars [J]. Plant Science, 2002, 163(2): 375-379.

[9] 蔡永立, 达良俊. 亚热带东部壳斗科 6 种常绿植物叶的生态解剖 [J]. 应用与生物环境学报, 2002, 8(5): 460-466.

Cai Y L, Da L J. Ecological leaf anatomy of six evergreen species of Fagaceae in the eastern subtropical area of China [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(5): 460-466. (in Chinese)

[10] 刘红茹, 冯永忠, 王得祥. 延安城区 10 种阔叶园林植物叶片结构及其抗旱性评价 [J]. 西北植物学报, 2012, 32(10): 2053-2060.

Liu H R, Feng Y Z, Wang D X. Drought resistance evaluation and leaf structures of ten species of broad-leaved ornamental plants in Yan'an Urban [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2012, 32(10): 2053-2060. (in Chinese)

[11] 崔宏安, 刘莉丽, 陈铁山, 等. 葛藤不同类型叶耐旱结构的比较解剖学研究 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2211-2215.

Cui H A, Liu L L, Chen T S, et al. The comparative anatomical studies on the drought resistant structures of kudzu leaves of different varietie [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2211-2215. (in Chinese)

[12] 史刚荣, 汤 盈, 张 铮. 淮北相山恢复演替群落优势树种叶片的生态解剖 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 314-322.

Shi G R, Tang Y, Zhang Z. Leaf anatomy of dominant plant species in the successional communities of Xiangshan moutain, Huaibei, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2): 314-322. (in Chinese)

[13] 王宇超, 王得祥, 彭少兵, 等. 干旱胁迫对木本滨藜生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2010, 46(1): 62-67.

Wang Y C, Wang D X, Peng S B, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of woody saltbush [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 62-67. (in Chinese)

[14] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿抗旱性主成分及隶属函数分析 [J]. 草地学报, 2006, 14(2): 142-146.

Han R H, Lu X S, Gao G J, et al. Analysis of the principal components and the subordinate function of Alfalfa drought resistance [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(2): 142-146. (in Chinese)

[15] 江 川, 罗大庆, 王立辉. 西藏半干旱区 5 种灌木叶片结构的抗旱特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 13-17.

Jiang C, Luo D Q, Wang L H. Drought-resistant characteristics of leaf structures of five shrubs in Semi-arid Region of Tibet [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(4): 13-17. (in Chinese)

[16] 张海娜, 苏培玺, 李善家, 等. 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用 [J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4909-4918.

Zhang H N, Su P X, Li S J, et al. Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4909-4918. (in Chinese)

[17] 白重炎, 高尚风, 张 颖, 等. 12 个核桃品种叶片解剖结构及其抗旱性研究 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(7): 125-128.

Bai C Y, Gao S F, Zhang Y, et al. Analysis of anatomical leaf structure and drought resistance in 12 varieties of walnut [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(7): 125-128. (in Chinese)

[18] 肖 军, 袁 林. 四种阔叶树叶片解剖结构特征及其耐旱性比较研究 [J]. 泰山学院学报, 2010, 32(6): 117-120.

Xiao J, Yuan L. Four kinds of hardwood leaf anatomical characteristics and comparative study drought tolerance [J]. Journal of Taishan University, 2010, 32(6): 117-120. (in Chinese)

[19] 韩 刚, 李少雄, 徐 鹏, 等. 6 种灌木叶片解剖结构的抗旱性分析 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 43-46.

Han G, Li S X, Xu P, et al. Analysis of drought resistance on anatomical structure of leave of six species of shrubs [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 43-46. (in Chinese)

nese)

[13] 汪师孟,夏美君. 中国栎属木材的构造及物理力学性质 [J]. 北京林学院学报, 1983(3): 64-72.
Wang S M, Xia M J. Structures and some physical-mechanical properties of three Chinese oaks [J]. Journal of Beijing Forestry College, 1983(3): 64-72. (in Chinese)

[14] 梁 文. 五种栎木识别和材性探讨 [J]. 广西农学院学报, 1992, 11(1): 63-66.
Liang W. A study on the identification and propertites of wood of five species of *Quercus* [J]. Journal of Guangxi Agricultural College, 1992, 11(1): 63-66. (in Chinese)

[15] 刘志杰,虞木奎,方升佐,等. 壳斗科 4 个树种木材基本密度及燃烧值的变异分析 [J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 674-678.
Liu Z J, Yu M K, Fang S Z, et al. Variation analysis of wood basic density and caloric value of four tree species in Fagaceae [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(4): 674-678. (in Chinese)

[16] 汪秉全. 陕西木材 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1979.
Wang B Q. Shaanxi timbers [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1979.

[17] 姜笑梅,张立非,刘 鹏. 拉丁美洲热带木材 [M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2008.
Jiang X M, Zhang L F, Liu P. Latin America tropical timber [M]. Second edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008. (in Chinese)

[18] 成俊卿,杨家驹,刘 鹏. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
Cheng J Q, Yang J J, Liu P. China woods will [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. (in Chinese)

[19] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry. Wood physical-mechanical properties of main species in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982. (in Chinese)

[20] 刘一星,赵广杰. 木质资源材料学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
Liu Y X, Zhao G J. Wood resources in materials science [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004. (in Chinese)

(上接第 85 页)

[12] 惠刚盈, Gasow K V, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择 [J]. 林业科学研究, 2004, 17(6): 687-692.
Hui G Y, Gasow K V, Hu Y B. The selection of standard angle of the neighbourhood pattern, a stand spatial structure parameter [J]. Forest Research, 2004, 17(6): 687-692. (in Chinese)

[13] Gadow K V, Hui G Y. Characterizing forest spatial structure and diversity [C]//Sustainable Forestry in Temperate Regions. Sweden: University of Lund, 2002.

[14] 胡艳波,惠刚盈,戚继忠,等. 天然红松阔叶林的空间结构分析 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 523-530.
Hu Y B, Hui G Y, Qi J Z, et al. Analysis of the spatial structure of natural Korean pine broad leaved forest [J]. Forest Research, 2003, 16(5): 523-530. (in Chinese)

[15] 邓送求, 闫家锋. 南京紫金山枫香风景林空间结构分析 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 117-122.
Deng S Q, Yan J F. Spatial structure of scenic forest of *Liquidambar formosana* in Nanjing Zijin Mountain [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences, 2010, 34(4): 117-122. (in Chinese)

[16] Dungan J L, Perry J N, Dale R T, et al. A balanced view of scale in spatial statistical analysis [J]. Ecography, 2002, 25: 626-640.

(上接第 92 页)

[20] 张振师,薛智德,崔宏安,等. 延安地区 3 种灌木叶旱性结构的解剖研究 [J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 32-35.
Zhang Z S, Xue Z D, Cui H A, et al. Anatomical study of xeromorphism of the leaves in cuttings of three brushes in Yan'an region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 32-35. (in Chinese)

[21] 李晓储,黄利斌,张永兵,等. 四种含笑叶解剖性状与抗旱性的研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 177-181.
Li X C, Huang L B, Zhang Y B, et al. Studies on leaf anatomic indexes and their relations to drought resistance of the four species of *Michelia* [J]. Forest Research, 2006, 19(2): 177-181. (in Chinese)

[22] 周泽生,李 立,王晗生. 黄土高原能源林植物选择研究之一: 19 种旱生植物叶片解剖特征的镜检 [J]. 水土保持学报, 1989, 3(1): 20-30.
Zhou Z S, Li L, Wang H S. Selection of the Loess Plateau of energy forest plants: Eleven 19 kinds of xerophytic leaf anatomical characteristics of microscopic [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(1): 20-30. (in Chinese)

[23] 胡承海,兰 建. 辽西地区树种叶片结构的分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 1993, 24(4): 269-273.
Hu C H, Lan J. Tree leaf structure analysis in Western Liaoning [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1993, 24(4): 269-273. (in Chinese)

[24] 朱栗琼,李吉跃,招礼军. 六种阔叶树叶片解剖结构特征及抗旱性比较 [J]. 广西植物, 2007, 27(3): 431-434.
Zhu L Q, Li J Y, Zhao L J. Comparison on leaf anatomical structures and drought resistance of six broad-leaved plant species [J]. Guihaia, 2007, 27(3): 431-434. (in Chinese)