

川西高原 4 种苹果属植物叶片 解剖结构与其抗旱性分析

徐 扬, 陈小红*, 赵安玖

(四川农业大学 林学院, 四川温江 611130)

摘 要: 采用常规石蜡制片法和 NaOCl 法, 对川西高原地区 4 种苹果属植物叶片的解剖结构特征进行了观察, 并选取叶片厚度、上下表皮角质层厚度、上下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度等 14 项抗旱性相关指标进行测定, 运用方差分析、主成分分析和隶属函数法对 4 种苹果属植物的抗旱性进行了分析与综合评价。结果显示: (1) 4 种苹果属植物叶片上下表皮外均附有角质层, 表皮细胞排列紧密, 上表皮细胞明显大于下表皮细胞, 其中变叶海棠的角质层厚度和表皮细胞厚度均较大; 气孔均只分布在下表皮, 其中花叶海棠的气孔密度最大, 花叶海棠和湖北海棠的气孔长、宽最小; 栅栏组织由 2~3 层排列紧密的栅栏细胞组成, 海绵组织细胞排列疏松, 细胞间隙大, 其中山荆子的栅栏组织厚度、栅海比和叶片结构紧密度最大; 主脉均为外韧维管束, 其中湖北海棠维管束厚度最大, 且皮层中有时出现含晶细胞。(2) 所选 14 项指标中除下表皮角质层厚度外, 其余 13 项指标在 4 个树种间差异显著, 经主成分分析筛选出上表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度等 8 项指标作为 4 种苹果属植物抗旱性综合评价的代表性指标。(3) 隶属函数法分析结果表明, 4 种苹果属植物抗旱能力大小顺序为: 变叶海棠 > 山荆子 > 花叶海棠 > 湖北海棠。

关键词: 苹果属植物; 叶片解剖结构; 抗旱性评价

中图分类号: Q944.56

文献标志码: A

Drought Resistance Evaluation and Leaf Anatomical Structures of Four Species of *Malus* Plants in Western Sichuan Plateau

XU Yang, CHEN Xiaohong*, ZHAO Anjiu

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract: The selected leaf anatomical structures in terms of xeromorphic indices of the four species of *Malus* plants in western Sichuan plateau including thickness of leaves, cuticle thickness of upper and lower epidermis, thickness of upper and lower epidermis, thickness of palisade tissue and so on were observed and measured with paraffin sectioning method and NaOCl method, and the drought resistance of those plants were analyzed and evaluated by the methods of ANVOA, principal component analysis and membership function. The results were showed as follows: (1) the epidermal cell arrangements in four species of *Malus* plants were closeness and the sizes of upper epidermis were bigger than that of lower epidermis, with cuticle in surfaces of leaves. The thickest of epidermis and cuticle layer was observed on leaves of *Malus toringoides*. Meanwhile, the stoma only existed on lower epidermis and the densest stoma was found on leaves of *Malus transitoria*, which had the shortest stoma length and width as well as *Malus hupehensis*. In addi-

收稿日期: 2015-05-28; 修改稿收到日期: 2015-10-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAC09B05)

作者简介: 徐 扬(1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物生理、解剖研究。E-mail: 513522356@qq.com

* 通信作者: 陈小红, 博士, 讲师, 主要从事园林植物方面的研究。E-mail: 493491274@qq.com

tion, the palisade tissues in four species leaves were composed of 2 to 3 layers palisade cells, and spongy parenchyma cell arrangements were slacking with high intercellular space. The biggest thickness of palisade tissue, palisade tissue and sponge tissue ratio and leaf structure were observed in leaves of *Malus baccata*. Furthermore, main veins were consisted of collateral vascular bundle and the biggest thickness of vascular bundle existed in leaves of *Malus hupehensis*. Crystal cells were found occasionally in its cortex. (2) Except for the cuticle thickness of lower epidermis, the other xeromorphic indices were significantly different among four plants, and eight indices including cuticle thickness of upper epidermis, thickness of lower epidermis, thickness of palisade tissue and so on were selected as typical items for evaluation of drought resistance of four species. (3) The order of drought resistance capability of four species of *Malus* plants was presented as follow: *Malus toringoides* > *Malus baccata* > *Malus transitoria* > *M. hupehensis*.

Key words: *Malus* plants; leaf anatomical structures; drought resistance evaluation

川西高原位于青藏高原东南缘,处于中国最高一级阶梯青藏高原向第二级阶梯云贵高原和四川盆地的过渡地带,属于“山上有原,原上有山”的典型高原山原地貌,水热状况垂直变化极为显著,这一地区水资源极其短缺,岩体松散破碎,造林立地条件恶劣,森林植被分布不均,是中国西部典型的生态脆弱地区^[1]。虽然当地大力推进造林绿化事业,但生态景观现状仍有待进一步改善,如何在干旱缺水的条件下实现生态与绿化景观双赢的效果显得尤为重要,解决此难题的首要任务是筛选培育具有极强抗旱能力且兼具观赏功能的优秀树种资源。苹果属(*Malus*)是蔷薇科(Rosaceae)中极具观赏价值、且适应性极强的绿化树种,其中变叶海棠[*Malus toringoides* (Rehd.) Hughes]、花叶海棠[*Malus transitoria* (Batal.) Schneid.]、山荆子[*Malus baccata* (L.) Borkh.]和湖北海棠[*Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd.]作为生态绿化树种广泛用于川西高原地区。

叶是植物进行光合作用、蒸腾作用和气体交换的主要器官,对水分、温度和光照等环境因子的反应最为敏感和明显。因此,研究叶的形态解剖结构特征能较准确的揭示植物的抗旱机理^[2]。近年来,已有不少关于植物叶片解剖结构和抗旱性评价研究^[3-6],但针对苹果属植物的研究相对较缺乏^[7]。本试验通过对川西高原4种苹果属植物的叶片解剖结构特征进行研究,并综合分析评价其抗旱能力,以期揭示苹果属植物的抗旱机理和对策,为干旱地区的生态与景观树种的筛选提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

本试验材料均采自甘孜州炉霍县任达乡易日沟(31°11'24"N, 100°47'24"E),海拔高度3 096 m,选取

生境和长势较一致的变叶海棠、花叶海棠、山荆子和湖北海棠的代表性植株各5株,分别从东西南北4个方位采集4~6片成熟健康叶备用。

1.2 叶片组织结构观察

采用石蜡制片法^[8]。将采集的叶片沿中脉切成长、宽约为5 mm的小块,经FAA固定后用常规石蜡切片法制片,切片厚度为10~15 μm,番红-固绿双重染色,中性树胶封片。使用Olympus显微镜成像系统成像,测量叶片厚度、上下表皮角质层厚度、上下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度等指标,每项记录5张重复切片的10个视野,求其平均值。同时按下式分别计算栅海比、叶片结构紧密度和叶片结构疏松度。

栅海比 = 栅栏组织厚度 / 海绵组织厚度

叶片结构紧密度 = (栅栏组织厚度 / 叶片厚度) × 100%

叶片结构疏松度 = (海绵组织厚度 / 叶片厚度) × 100%

1.3 叶表面特征观察

采用NaOCl法^[9]。将叶片放入20% NaOCl溶液中浸泡至完全发白呈透明状,经上下表皮剥离后,用1%番红染色制片,于Olympus显微镜下成像,同时测量气孔的长度、宽度和密度等指标。每个材料观测5张重复切片的5个典型视野中气孔,求其平均值。

1.4 数据分析

运用Excel 2007及DPS 7.05对数据进行方差分析,SPSS 19.0作主成分分析,并利用模糊数学隶属函数值法对4种苹果属植物的抗旱性强弱进行评价,隶属函数公式为:

$$U(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{指标与抗旱性呈正相关})$$

$$U(X_i) = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{指标与抗旱性呈负相关})$$

式中, $U(X_i)$ 为某树种某一抗旱指标的隶属函数值, X_i 为该项抗旱指标值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为 4 个树种间该项抗旱指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 4 种苹果属植物叶片解剖结构特征比较

4 种苹果属植物的叶均为异面叶,且变叶海棠和花叶海棠叶多分裂,叶形较小,山荆子和湖北海棠叶不分裂,叶形较大。如表 1 所示,4 种苹果属植物的叶片厚度变化范围为 179.74~254.66 μm ,变叶海棠叶片最厚,湖北海棠叶片最薄。4 种植物叶片的上下表皮细胞外壁都具有角质层结构,方差分析显示,树种间叶片上表皮的角质层厚度差异极显著($P<0.01$),其中变叶海棠最厚(4.28 μm),湖北海棠最薄(2.38 μm),下表皮的角质层厚度未达到显著差异。4 种苹果属植物叶片的上下表皮都由 1 层排列紧密的细胞组成(图版 I,1~4),树种间表皮厚度达到了显著差异($P<0.05$),且上表皮细胞厚度(变幅为 12.87~17.54 μm)均大于下表皮细胞(变幅为 8.34~10.14 μm),其中变叶海棠叶片的上下表皮细胞都较厚。

气孔是叶表皮层气体进出的门户,其密度和大小通过影响植物的光合作用和水分代谢,进而影响植物的抗旱性。研究结果显示,4 种苹果属植物的气孔只分布在下表皮,上表皮未见分布,气孔密度在树种间达到极显著差异($P<0.01$),变化范围为 153.97~286.38 μm ,变异系数达 23.65%,花叶海棠气孔密度最大,山荆子和湖北海棠较小;气孔的长度和宽度在树种间也达到显著差异($P<0.05$),山荆子气孔长度、宽度最大,分别为 36.10 和 22.55 μm ,花叶海棠和湖北海棠的气孔长度、宽度均小,分别为 24.64 和 17.75 μm ,24.39 和 17.54 μm 。

4 种苹果属植物叶片的栅栏组织紧邻且垂直于叶上表皮,由 2~3 层长圆柱状细胞紧密排列构成,靠近下表皮的海绵组织排列疏松,有细胞间隙(图版 I,1~4)。方差分析显示,栅栏组织厚度和海绵组织厚度在树种间达到了极显著差异($P<0.01$),山荆子的栅栏组织最厚(130.28 μm),排列紧密,海绵组织最薄(88.51 μm),胞间隙小;湖北海棠的栅栏组织最薄(60.71 μm),海绵组织较厚(99.14 μm),且细胞间隙大;山荆子的栅栏组织厚度和海绵组织厚度的比值(栅海比)最大(1.53),湖北海棠最小

表 1 4 种苹果属植物叶片解剖结构特征
Table 1 Characteristics of leaf anatomical structure of four *Malus* plants

指标 Index	变叶海棠 <i>M. toringoides</i>	花叶海棠 <i>M. transitoria</i>	山荆子 <i>M. baccata</i>	湖北海棠 <i>M. hupehensis</i>	变异系数 CV/%
TL/ μm	254.66±5.09aA	247.75±6.59bB	234.45±6.51cC	179.74±3.90dD	13.11
CTUE/ μm	4.28±0.49aA	3.70±0.43bB	2.64±0.40cC	2.38±0.31dD	26.96
CTLE/ μm	2.75±0.38aA	2.74±0.33aA	2.69±0.19aA	2.66±0.27aA	11.16
TUE/ μm	17.54±1.37aA	15.08±1.42bB	13.10±0.81cC	12.87±0.87cC	15.04
TLE/ μm	9.59±0.64bB	10.14±0.51aA	8.34±0.51cC	9.42±0.23bB	8.73
SD(个/ mm^2)	261.45±6.74bB	286.38±6.43aA	195.22±3.85cC	153.97±3.51dD	23.65
SL/ μm	29.81±1.22bB	24.64±1.16cC	36.10±1.48aA	24.39±1.03cC	17.18
SW/ μm	20.36±0.97bB	17.75±1.67cC	22.55±0.83aA	17.54±0.61cC	11.92
TPT/ μm	123.65±8.17bB	105.58±6.88cC	130.28±7.35aA	60.71±3.41dD	26.67
TST/ μm	103.68±4.70bB	108.29±3.51aA	88.51±4.31dD	99.14±1.73cC	8.24
P/S	1.27±0.17bB	0.98±0.16cC	1.53±0.19aA	0.60±0.06dD	34.71
TLS	0.54±0.04aA	0.45±0.02bB	0.55±0.04aA	0.34±0.01cC	19.21
LLS	0.37±0.02cC	0.44±0.02bB	0.37±0.02dC	0.51±0.02aA	14.89
TB/ μm	273.35±15.03bB	288.61±7.92bB	217.04±23.80cC	403.24±10.76aA	24.10

注:TL.叶厚;CTUE.上表皮角质层厚度;CTLE.下表皮角质层厚度;TUE.上表皮细胞厚度;TLE.下表皮细胞厚度;SD.气孔密度;SL.气孔长度;SW.气孔宽度;TPT.栅栏组织厚度;TST.海绵组织厚度;P/S.栅海比;TLS.叶片结构紧密度;LLS.叶片结构疏松度;TB.维管束厚度;同行小写字母表示物种间在 0.05 水平存在显著性差异,同行大写字母表示物种间在 0.01 水平存在显著性差异。下同。

Note: TL. Thickness of leaves; CTUE. Cuticle thickness of upper epidermis; CTLE. Cuticle thickness of lower epidermis; TUE. Thickness of upper epidermis; TLE. Thickness of lower epidermis; SD. Stoma density; SL. Stoma length; SW. Stoma width; TPT. Thickness of palisade tissue; TST. Thickness of sponge tissue; P/S. Palisade tissue and sponge tissue ratio; TLS. Tightness of leaf structure; LLS. Looseness of leaf structure; TB. Thickness of bundle. Different normal and capital letters indicate that materials in the same row have significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below.

(0.60)。4 个树种的叶片结构紧密度变化范围为 0.34~0.55,山荆子最大,湖北海棠最小;叶片结构疏松度则呈现相反的趋势(变幅为 0.37~0.51),山荆子和变叶海棠最小,湖北海棠最大。

4 种苹果属植物的主脉均属外韧型维管束,从近轴面到远轴面依次为表皮细胞,数层厚角组织,木质部,韧皮部,4~6 层薄壁细胞组成的皮层,厚角组织和表皮细胞,表皮细胞外壁被有较厚的角质层,木质部呈半月型辐射状排列,位于木质部和韧皮部之间有 2~4 层挤压变形的形成层,韧皮部的外围有数层发达的韧皮纤维(图版 I,5~8)。表 1 显示,4 个树种间的维管束厚度差异达到显著水平($P<0.05$),变化范围为 217.04~403.24 μm ,湖北海棠的皮层中有时出现含晶细胞(图版 I,8),且维管束最厚(403.24 μm),山荆子的维管束最薄(217.04 μm)。

2.2 4 种苹果属植物抗旱结构指标的主成分分析

表 1 结果显示,所测指标中,除下表皮角质层厚度在种间的差异不显著外,其余 13 项指标在种间的差异均达到显著或极显著水平,且变异系数较大(8.24%~34.71%),因此,作为评价 4 种苹果属植物抗旱性的指标,这 13 项指标具有较高的灵敏度与显著的代表性。但这些指标间可能具有一定的相关性,使得信息相互重叠,增加了分析问题的复杂性和认识的偏差。主成分分析是在较好的保留原有信息的基础上,将多个具有相关关系的指标转换为新的数量较少且彼此独立互不关联的综合指标^[10]。因此,利用主成分分析对上述 13 项指标进行筛选,依据累积贡献率 $\geq 85\%$ 的原则抽取主成分,根据各主成分中每个指标载荷量的大小筛选出贡献较大的指标。

主成分分析结果显示(表 2),前 2 个主成分的累积贡献率达到 96.632%,较好概括了 13 个指标的大部分信息,因此提取前 2 个主成分。第 1 主成分特征值为 7.824,贡献率为 60.184%。绝对载荷值排序的前 4 位分别为栅栏组织厚度、叶片结构紧密度、叶片结构疏松度和栅海比,表明第 1 主成分主要反映了叶肉组织特征;第 2 主成分特征值为 4.738,贡献率为 36.448。绝对载荷值排序的前 4 位分别为海绵组织厚度、下表皮细胞厚度、上表皮角质层厚度和气孔密度,表明第 2 主成分主要反映了叶肉组织特征和叶表皮结构特征。

表 2 主成分载荷矩阵表
Table 2 Principal components matrix

指标 Index	主成分 Principal component	
	1	2
叶厚 Thickness of leaves	0.815	0.557
上表皮角质层厚度 Cuticle thickness of upper epidermis	0.445	0.874
上表皮细胞厚度 Thickness of upper epidermis	0.424	0.809
下表皮细胞厚度 Thickness of lower epidermis	-0.436	0.896
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	0.990	0.100
海绵组织厚度 Thickness of sponge tissue	-0.326	0.944
栅海比 Palisade tissue and sponge tissue ratio	0.984	-0.172
叶片结构紧密度 Tightness of leaf structure	0.998	0.036
叶片结构疏松度 Looseness of leaf structure	-0.987	-0.083
气孔长度 Stoma length	0.834	-0.548
气孔宽度 Stoma width	0.869	-0.479
气孔密度 Stoma density	0.437	0.859
维管束厚度 Thickness of bundle	-0.963	0.036
特征值 Feature value	7.824	4.738
贡献率 Contribution/%	60.184	36.448
累积贡献率 Accumulation contribution/%	60.184	96.632

表 3 4 种苹果属植物 8 项指标的隶属函数值及抗旱综合评价表
Table 3 Membership function of eight indexes of four *Malus* plants and comprehensive evaluation on their drought resistance

指标 Index	变叶海棠 <i>M. toringoides</i>	花叶海棠 <i>M. transitoria</i>	山荆子 <i>M. baccata</i>	湖北海棠 <i>M. hupehensis</i>
上表皮角质层厚度 Cuticle thickness of upper epidermis	1.000 0	0.691 8	0.138 0	0.000 0
下表皮细胞厚度 Thickness of lower epidermis	0.696 0	1.000 0	0.000 0	0.600 3
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	0.904 7	0.644 9	1.000 0	0.000 0
海绵组织厚度 Thickness of sponge tissue	0.232 9	0.000 0	1.000 0	0.462 7
栅海比 Palisade tissue and sponge tissue ratio	0.720 4	0.408 6	1.000 0	0.000 0
叶片结构紧密度 Tightness of leaf structure	0.958 9	0.510 7	1.000 0	0.000 0
叶片结构疏松度 Looseness of leaf structure	0.720 4	0.408 6	1.000 0	0.000 0
气孔密度 Stoma density	0.811 7	1.000 0	0.311 5	0.000 0
隶属函数平均值 Average of membership function	0.755 6	0.583 1	0.681 2	0.132 9
抗旱能力排序 Drought resistance capability order	1	3	2	4

2.3 4 种苹果属植物的抗旱性综合评价

根据绝对载荷值越大,该指标对主成份的贡献越大,代表性越强的原则,表 2 中共筛选出上表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、叶片结构紧密度、叶片结构疏松度和气孔密度 8 项指标作为代表性指标。通过隶属函数计算 8 个典型指标的隶属值,并对平均值进行排序,结果如表 3 所示,均值越大,抗旱性越强。因此,4 种苹果属植物的抗旱大小排序为:变叶海棠>山荆子>花叶海棠>湖北海棠。

3 讨 论

变叶海棠的叶厚较其他树种大,一般认为较厚的叶片储水性能较强^[11]。变叶海棠和花叶海棠叶多分裂,叶形较小,山荆子和湖北海棠叶不分裂,叶形较大,较小的叶表面积和体积比有利于植物减小蒸腾面积。4 种苹果属植物叶片的解剖结构特征研究表明,变叶海棠叶片的上表皮角质层最厚,而湖北海棠上表皮角质层最薄,这与杨静慧等^[12]的研究结果较一致。角质层结构可有效减少水分蒸发,提高植物的折光性,从而避免强光照引起的伤害^[13-15]。变叶海棠的上下表皮细胞都较厚,关于表皮细胞对植物抗旱性的影响,王耀之等^[16-17]认为抗旱性强的植物叶表皮细胞较小,而刘红茹等^[18-19]认为较大的表皮细胞有利于植物增强抗旱性。笔者对比分析上述观点发现,前者植物叶表皮细胞较小指的是叶表皮细胞的长、宽较小,这与李正理^[20]提出的较小的叶表面积有利于减少叶蒸腾的观点相呼应,后者较大的叶表皮细胞指的是叶表皮细胞厚度较大,因为较厚的表皮细胞具有一定的贮水能力^[21-22],这一点与本研究结果相一致。此外,密集的表皮毛结构可减缓叶的水分代谢,保持叶面空气湿度,从而抵御干旱^[23],花叶海棠的叶下表皮密被绒毛,变叶海棠叶下表皮在叶脉处分布较多柔毛,而山荆子和湖北海棠叶片只在幼嫩期具有稀疏柔毛,不久即脱落至无毛^[24]。

4 种苹果属植物的气孔都只分布在下表皮,这与尹秀玲等^[25]对蔷薇科植物叶片气孔的研究结果一致,上表皮无气孔,可减少强日照引起的水分流失。本文结果显示,花叶海棠气孔密度最大,花叶海棠和湖北海棠的气孔长、宽最小。史晓霞等^[26-27]的研究表明,气孔大小与抗旱性呈负相关,气孔密度与抗旱性呈正相关,气孔小而数目多的植物在水分充足时大大提高了光合效率,水分缺乏时又通过较小

的气孔器控制水分散失^[28],也有研究显示,气孔密度越小,抗旱能力反而越强,此类观点认为较小的气孔密度增加了气体交换阻力,相应的也减少了叶的蒸腾能力^[29-30]。赵翠仙等^[31]认为气孔小而数目多的气孔特征主要为少浆汁抗旱植物所具有,而多浆汁植物则主要以气孔大而数目少为抗旱特征。

山荆子的栅栏组织厚度、栅海比、叶片结构紧密度均为最大,海绵组织厚度最小,说明山荆子的栅栏组织发育程度最好,栅栏组织细胞中含有丰富的叶绿体,因此较厚的栅栏组织有利于增强植物光合作用,从而在干旱环境中更好地生存。4 个树种的维管束厚度差异较大,湖北海棠维管束最厚,皮层中有时出现含晶细胞。发达的维管组织有利于植物水分和养分等的运输,从而抵御干旱环境^[32-33],同时,苏培玺等^[34]认为干旱环境中植物的含晶细胞渗透势较高,从而具有较强的吸水能力。

王勋陵等^[35]认为植物利用叶器官采取的应对策略大致分为保护型、节约型、忍耐型、强壮型和逃避型,有的植物采取其中一种对策,有的植物则同时采取多种对策。变叶海棠主要利用表皮外厚的角质层增强折光性,防止强日照引起的水分散失从而加强对叶片的保护作用,以及利用较厚的叶片和表皮细胞贮藏更多的水分,提高叶片的保水能力,使植物即使在水分供应不足的情况也能忍耐干旱,采取了保护和忍耐型对策,这与元宝山南方红豆杉叶片采取的主要对策相类似^[36]。花叶海棠主要通过气孔的双重作用增强抗逆性,即在水分亏缺时,较小的气孔可减少水分散失,保存有限水分并加以充分利用;在水分较充足时通过密集的气孔尽力耗水,以提高光合作用强壮植株,采取了节约和强壮型对策,这与樱花等植物类似^[18];山荆子主要通过发达的同化组织最大限度的提高光合生产力达到自身强壮来抵抗干旱环境的胁迫,采取了强壮型对策,这与沙柳叶片采取的抗旱对策相类似^[35];湖北海棠主要依靠发达的疏导组织保持植物在干旱环境下的水分、养分吸收能力,并在水分亏缺时通过较小的气孔控制蒸腾失水,采取了强壮和节约型对策,这与杨柴等^[37]植物类似。

为了进一步评价 4 种苹果属植物的抗旱能力,本研究通过主成分分析筛选出上表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片结构紧密度、叶片结构疏松度、栅海比、气孔密度 8 项指标为主要的抗旱评价指标,并采用隶属函数法进行综合评价,结果显示,4 种苹果属植物抗旱

能力大小排序为:变叶海棠>山荆子>花叶海棠>湖北海棠。杨静慧等^[38]通过研究生理生化响应对几种苹果属植物进行的抗旱性评价结果显示变叶海棠抗旱性优于花叶海棠,花叶海棠优于湖北海棠,与本文研究结果相符。孙志虎等^[39]在评价山荆子等植物的抗旱性研究中认为,山荆子属耐旱性较强的树种,但关于山荆子和其他苹果属植物抗旱性的比较研究鲜有报道。根据评价结果,建议在川西高原干旱较严重的阳坡和半阳坡等地区栽种变叶海棠、

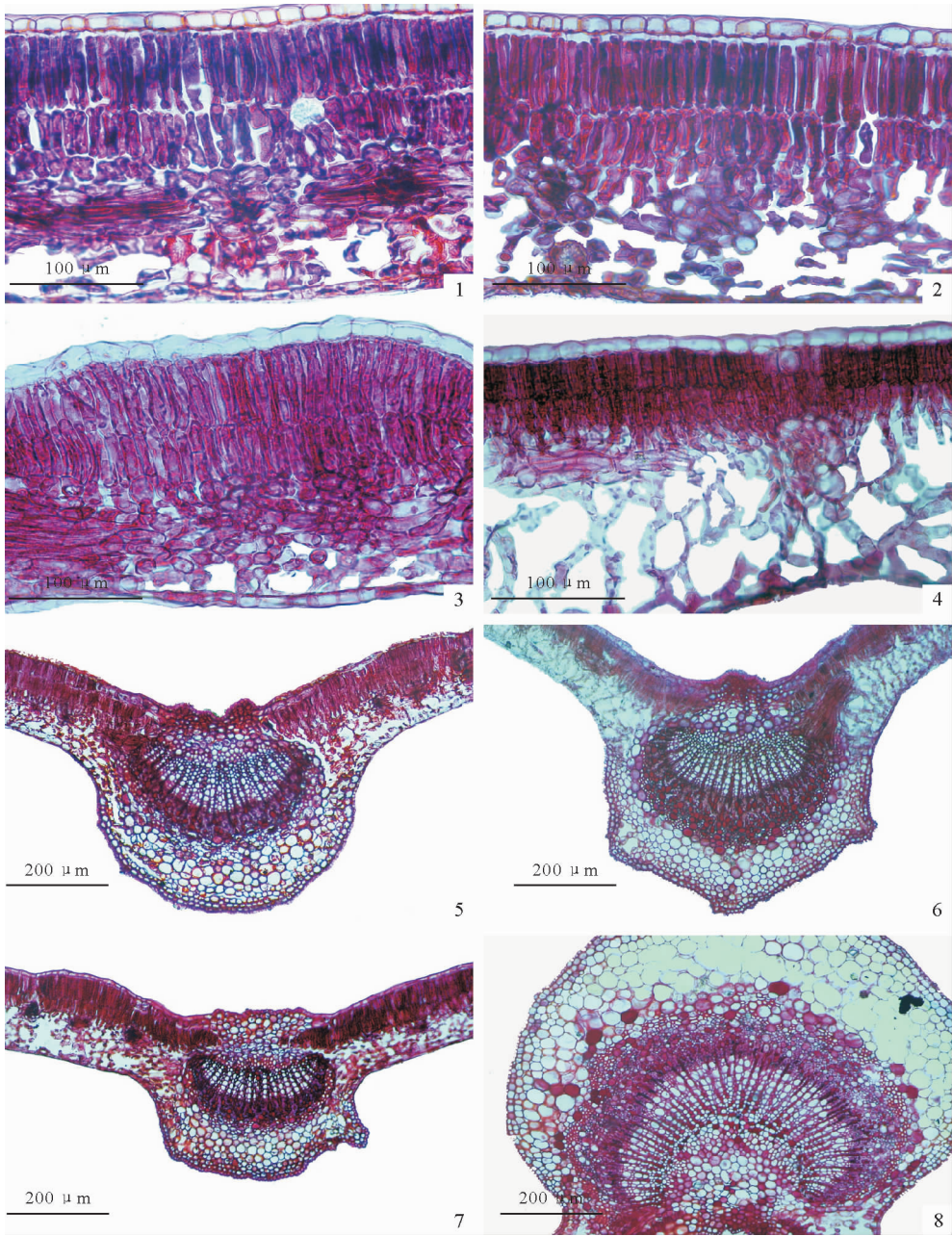
山荆子和花叶海棠,而在水分含量相对充足的阴坡和半阴坡栽种湖北海棠。

植物长期受到干旱生境的影响,其形态结构、解剖特征、生理生化活动均发生了一系列适应性变化^[40]。本研究仅从叶片解剖结构特征分析了4种苹果属植物的抗旱性,具有一定的局限性,在以后的研究中还应从植物的生理生化反应与基因遗传等方面全面透析植物的抗旱机理,这对干旱半干旱地区生态观赏树种的选择和利用具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] YAO Y B(姚玉璧),ZHANG Q(张 强),WANG J S(王劲松),*et al.* The response of drought to climate warming in southwest in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报),2014,**23**(9):1 409—1 417(in Chinese).
- [2] QIU Q(邱 权),PAN X(潘 昕),LI J Y(李吉跃),*et al.* Morphological traits and physiological characteristics in drought tolerance in 20 shrub species on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报),2014,**38**(6):562—575(in Chinese).
- [3] JIN L F(金龙飞),FAN F(范 飞),LUO X(罗 轩),*et al.* Studies on leaf anatomical structures of mango and its relations to drought resistance[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*(西南农业学报),2012,**25**(1):232—235(in Chinese).
- [4] WANG Q SH(王情世),FAN J F(樊军锋),ZHOU Y X(周永学),*et al.* Research on drought resistance on anatomical structure of leaves of two new poplar clones[J]. *Journal of Northwest A&F University*(Nat. Sci. Edi.)(西北农林科技大学学报·自然科学版),2012,**40**(5):45—56(in Chinese).
- [5] LIU B(刘 滨),GU L(鼓 励),ZHENG L P(郑丽萍),*et al.* Drought resistance study of 10 major ornamental shrub in Ningxia[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2013,**33**(9):1 808—1 816(in Chinese).
- [6] GE L(葛 变),HUANG D(黄 冬),MA H CH(马焕成),*et al.* Comparison of leaves anatomical structures and related drought resistance among different populations of *Dodonaea viscosa* in Yunnan hot-dry valley[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境),2015,**29**(5):138—143(in Chinese).
- [7] ZHAO X M(赵秀明),WANG F(王 飞),HAN M Y(韩明玉),*et al.* Relationship between leaf anatomical structures and drought resistance of newly introduced apple dwarf rootstocks[J]. *Journal of Northwest A&F University*(Nat. Sci. Edi.)(西北农林科技大学学报·自然科学版),2012,**40**(5):136—142(in Chinese).
- [8] MA X F(马小芬),WANG X F(王兴芳),LI Q(李 强),*et al.* The analysis of drought resistance and the comparison of anatomical structures of the leave of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge introduced from different regions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境),2013,**27**(6):92—96(in Chinese).
- [9] HONG Y P(洪亚平),CHEN ZH R(陈之瑞). Improvement on NaOCl method used for the liable-to-roll-up leaf epidermis[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报),2002,**19**(6):746—748(in Chinese).
- [10] 朱建平. 应用多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2012:93—100.
- [11] GUO G G(郭改改),FENG B(封 斌),MA B L(麻保林),*et al.* Leaf anatomical structures of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. and their drought resistance analysis[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2013,**33**(4):720—728(in Chinese).
- [12] YANG J H(杨静慧),YANG H T(杨焕婷). The cuticle thickness of leaves and drought-resistance in several *Malus* species[J]. *Journal of Tianjin Agricultural College*(天津农学院学报). 1996,**3**(3):27—29(in Chinese).
- [13] 刘捷平. 植物形态解剖学[M]. 北京:北京师范学院出版社,1991:310—311.
- [14] KOSMA D K,BOURDENX B,BERNARD A,*et al.* The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*,2009,**151**(4):1 918—1 929(in Chinese).
- [15] XUE ZH D(薛智德),HAN R L(韩蕊莲),HOU Q CH(侯庆春),*et al.* Anatomical study of xeromorphism of leaves in cutting for five brushes in Yan'an region[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2004,**24**(7):1 200—1 206(in Chinese).
- [16] WANG Y ZH(王耀之),WANG X L(王勋陵),LI W(李 蔚),*et al.* Observation on leaf structure of some species in desert steppe[J]. *Journal of Lanzhou University*(Nat. Sci. Edi.)(兰州大学学报·自然科学版),1983,**19**(3):87—96(in Chinese).
- [17] MENG Q J(孟庆杰),WANG G Q(王光全),DONG SH F(董邵峰),*et al.* Studies on leaf parameter and its relations to drought resistance of peaches[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报),2005,**20**(1):65—67(in Chinese).
- [18] LIU H R(刘红茹),FENG Y ZH(冯永忠),WANG D X(王得祥),*et al.* Drought resistance evaluation and leaf structures of ten species of

- broad-leaved ornamental plants in Yan'an urban area[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, **32**(10): 2 053—2 060 (in Chinese).
- [19] LIU H R(刘红茹), FENG Y ZH(冯永忠), WANG D X(王得祥), *et al.* Drought resistances and leaf structures of five Oleaceae ornamental plants in Yan'an[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2013, **41**(2): 75—81(in Chinese).
- [20] LI ZH L(李正理). Morphology and structures of xerophyte[J]. *Bulletin of Biology* (生物学通报), 1981, (4): 9—12(in Chinese).
- [21] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 192.
- [22] KOU J C(寇建村), YANG W Q(杨文权), JIA ZH K(贾志宽), *et al.* Study on leaves anatomical structures relative to drought resistance of *Medicago sativa* varieties[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2008, **36**(8): 67—72(in Chinese).
- [23] ZHAO SH W(赵述文), ZOU SH H(邹淑华), SUN X L(孙晓陆). Leaf surface structure of different soybean cultivars by scanning electron microscope[J]. *Agricultural Science in Jilin* (吉林农业科学), 1991, (1): 89—92(in Chinese).
- [24] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第 36 卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 375, 378, 392—393.
- [25] YIN X L(尹秀玲), WEN J(温 静), LIU X(刘 欣), *et al.* Study on leaf stoma density of 12 representative genus of Rosaceae family [J]. *Northern Fruits* (北方果树), 2008, (1): 4—6(in Chinese).
- [26] SHI X X(史晓霞), ZHANG G F(张国芳), MENG L(孟 林), *et al.* Relationship between the leaf tissue characteristic and drought resistance of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) [J]. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2008, **28**(5): 584—588(in Chinese).
- [27] ZHANG Y(张 义), WANG D X(王得祥), SONG B(宋 彬), *et al.* Leaf anatomical structure based drought resistance evaluation of 11 urban forest plants in Xining City[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2014, **42**(8): 86—98(in Chinese).
- [28] LI J Y(李吉跃). Mechanisms of drought tolerance in plants[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1991, **13**(3): 92—100(in Chinese).
- [29] LIU ZH B(刘照彬), NING J(宁 俊), LÜ J ZH(吕建洲), *et al.* Change of stomatal density and opening degree of *Poa pratensis* L. treatment with S3307[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2009, **40**(4): 488—490(in Chinese).
- [30] ZHANG P P(张盼盼), MU F(慕 芳), SONG H(宋 慧), *et al.* Anatomical structure and drought resistance in Broomcorn Millet leaf [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery* (农业机械学报), 2013, **44**(5): 119—126(in Chinese).
- [31] ZHAO C X(赵翠仙), HUANG Z CH(黄子琛). A preliminary study of xeromorphism of some important xerophytes growing in Tungeli desert[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1981, **23**(4): 278—283(in Chinese).
- [32] AREND M, FROMM J. Seasonal change in the drought response of wood cell development in the poplar[J]. *Tree Physiology*, 2007, **27**(7): 985—992.
- [33] SEARSON M J, THOMAS D S, MONTAGU K D. Wood density and anatomy of water-limited eucalypts[J]. *Tree Physiology*, 2004, **24**(11): 1 295—1 302.
- [34] SU P X(苏培玺), AN L ZH(安黎哲), MA R J(马瑞君), *et al.* Kranz anatomy and C4 photosynthetic characteristics of two desert plants, *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(1): 1—7(in Chinese).
- [35] WANG X L(王勋陵), MA J(马 骥). A study on leaf-structure and the diversity of xerophytes ecology adaptation[J]. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 1999, **19**(6): 787—792(in Chinese).
- [36] LI F Y(李凤英), LIANG SH CH(梁士楚). Anatomical structure and environmental adaptability of *Taxus wallichiana* var. *mairei* in Yuanbaoshan[J]. *Guihaia* (广西植物), 2013, **33**(2): 219—224(in Chinese).
- [37] 杨小玉. 5 种沙生灌木叶片解剖结构与抗旱性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [38] YANG J H(杨静慧), YANG E Q(杨恩琴), YANG H T(杨焕亭). A study on drought resistance of genus *Malus* seedling[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 1996, **11**(2): 81—86(in Chinese).
- [39] SUN ZH H(孙志虎), WANG Q CH(王庆成). The drought resistance of four broad-leaved species in the north of China with PV technique[J]. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2003, **39**(2): 33—38(in Chinese).
- [40] PLLARDY S G. Physiology of woody plants[M]. New York: Academic Press, 2010: 354—364.



图版 I 示川西高原 4 种苹果属植物叶片解剖结构的显微观察

1~4. 分别为变叶海棠、花叶海棠、山荆子、湖北海棠叶片横切, 上表皮细胞均较下表皮细胞大, 栅栏组织与海绵组织分化明显, 其中山荆子的栅栏组织最发达, 湖北海棠的海绵组织最发达; 5~8 分别为变叶海棠、花叶海棠、山荆子、湖北海棠主脉结构, 均为外韧维管束, 其中湖北海棠的维管束远厚于其他 3 种苹果属植物, 维管束组织也最发达, 且皮层中有含晶细胞分布。

Plate I The microscopic observation of leaf anatomical structure of four species of *Malus* plants in western Sichuan plateau

Fig. 1—4. The vane crosscut of *Malus toringoides*, *Malus transitoria*, *Malus baccata* and *Malus hupehensis*. The upper epidermal cells are all larger than the lower epidermal cells. The palisade tissue and sponge tissue are differentiated obviously. The palisade tissue of *Malus baccata* is the most developed, and the sponge tissue of *Malus hupehensis* is the most developed; Fig. 5—8. The main vein of *Malus toringoides*, *Malus transitoria*, *Malus baccata* and *Malus hupehensis*. All of them have the collateral vascular bundle. The vascular bundle of *Malus hupehensis* is much thicker than that of other three, the vascular tissue is also the most developed, and there are some crystal cells exist in the cortex of *Malus hupehensis*.

(编辑: 潘新社)