

几种樟树叶片结构比较分析及其与抗寒性评价的研究

王 宁¹,袁美丽²,苏金乐³

(1. 河南科技大学 林学院,河南 洛阳 471000;2. 洛阳市隋唐城遗址植物园,河南 洛阳 471002;

3. 河南农业大学 林学院,河南 郑州 450002)

摘 要:应用叶片离析法和石蜡制片技术,对猴樟、芳樟等几种樟树的叶片形态结构特征进行了研究,并运用聚类分析、相关性分析及隶属函数综合评价其抗寒性。结果表明:叶片解剖结构的叶片角质层、上下表皮、栅栏组织和海绵组织等 13 项指标聚为 5 类,依据相关指数的大小,从中筛选出角质层厚度、栅/海、细胞结构疏松度、叶脉突起度及海绵组织厚度等 5 项指标与樟树抗寒性密切相关。隶属函数法评判结果显示以猴樟的叶片解剖结构最有利于其抗寒,其次为芳樟、本樟和尾叶樟,而沉水樟叶片结构最不利于其耐寒。另外,发现细胞结构紧密度对几种樟树的排序结果与综合评价结果一致,也可用于樟树的耐寒性评价。

关键词:樟树;叶片形态结构;抗寒性;综合评价

中图分类号:S792.23

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2013)04-0043-07

Relationship Between Leaf Structure and Cold Resistance of Several Camphor Tree Species

WANG Ning¹, YUAN Mei-li², SU Jin-le³

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China;

2. The Sui & Tang Dynasties Relics Botanic Garden of Luoyang, Luoyang, Henan 471002, China;

3. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: The cold resistances of five camphor tree species (such as *Cinnamomum camphora*, *C. bodinieri*, *C. micranthum*, and so on) were evaluated by comprehensive appraisal index including clustering analysis, correlation analysis, and subordinate function value analysis based on the lamina anatomical structure and leaf epidermal characteristics. The results showed 13 indicators (such as the thicknesses of leaf cuticle, epidermis, palisade tissue, spongy tissue, etc.) were clustered into five categories. Indices such as cuticle thickness, the cell structure porosity, veins protruding, and spongy tissue thickness that were found to be closely correlated to the cold resistance were selected based on the size of the index. Membership function evaluation demonstrated that the leaf anatomical structure of *C. bodinieri* was the most beneficial to its cold resistance, followed by linalool-type, camphor-type, and *C. camphora*, but *C. micranthum* leaf structure however, was the most unfavorable to its cold resistance.

Key words: camphor tree; leaf anatomical structure; cold tolerance; comprehensive evaluation

耐寒性是植物对自然界低温适应的一种遗传特性,植物耐寒性与细胞形态结构的变化的相关性,主要体现在叶片结构、皮层与木质部的比例以及细胞器的适应性变化上^[1]。目前,由于植物生理生化指标易受环境的改变而表现出不同的变化,而植物

的形态和解剖结构,由于是长期特定环境条件下形成的结果,不会随环境因子的暂时改变而发生较大的变化,因此,在植物的抗逆性研究中,形态解剖结构特征也可作为一个重要的参考指标^[2]。与植物的其他器官相比,由于茎、叶等直接暴露于空气中,因

此其组织结构更容易受到环境变化的影响,也最能体现植物对生态条件的长期适应特点^[3-5]。叶片的形态变化与植物抗寒性的相关性主要表现在其解剖结构的差异上,如叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度等^[6-9]。叶、茎等结构特征与植物抗寒性的相关性,已在茶树^[10]、柑橘^[11]、苹果^[12]等植物上得到了证实。近年来,随着电镜等技术的发展,结合叶片解剖结构对植物进行抗寒性的研究也逐渐增多。随着全球气候的趋于变暖,樟树(*Cinnamomum camphora*)作为优良的园林绿化树种越来越受到北方城市的青睐。目前有关樟树的抗寒性研究多集中于相关生理生化指标的测定方面^[13-15],而关于叶片解剖结构与樟树抗寒性关系的研究尚未见有报道。为此,本研究以郑州市上街区已引种多年、且生长良好的不同种或类型的樟树为试验材料,通过对其叶片解剖结构特征的对比性研究,探讨其抗寒性与叶片解剖结构的关系,以期为耐寒樟树的引种和筛选提供科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省郑州市上街区,地理坐标东经 113°14′45″至 113°19′05″,北纬 34°35′至 34°40′,属暖温带季风气候。年平均气温 13.5~15.3℃,极端最低温为-16.5℃。土壤为褐土类。

1.2 试验材料与设计

选取上街区登封路行道树中引种栽植的 8 年生尾叶樟(*Cinnamomum caudiferum*)、猴樟(*C. bodinieri*)、沉水樟(*C. micranthum*)、樟(其中包括 2 种不同类型:1)芳樟(*C. camphora* var. *lialoolifera*):叶柄绿色,叶稍小;2)本樟(*C. camphora*):叶柄发红,叶稍大)共 5 种或类型,每种或类型选择生长势相近的 3 株作为研究对象,其生长状况(均值)如表 1 所示。为便于叙述,将上述树种依次标号为 I、II、III、IV 及 V。

表 1 供试樟树的生长状况

Table 1 The growth conditions of the three camphor tree species

树种	树高/m	冠幅 /m ²	胸径/cm
I	4.64	4.67	13.71
II	4.84	4.87	12.85
III	4.37	5.34	12.64
IV	4.96	5.14	13.21
V	4.49	4.89	14.37

2011 年 9 月选择 5 种或类型樟树的新鲜成熟叶片,从中部切取约 1 cm² 的小片,并立即用 FAA(甲醛:冰醋酸:50%乙酸,按 1:1:1 配制)固定备用。

1.3 试验方法

1.3.1 叶片横切解剖结构 采用常规石蜡制片方法,切片厚度为 10 μm,利用中性树胶进行封片。在光学显微镜下观察细胞结构,并用目镜测微尺分别测量叶片、叶脉、角质层、栅栏组织、上下表皮及海绵组织厚度和气孔大小。每项指标重复测定 10 次,取平均值,分别记作 TL、TV、TC、TP、TUN、TLE、TS 和 SS。

1.3.2 叶片表面结构 采用铬酸-硝酸离析法进行制片,将试材从 FAA 固定液取出放入不同称量瓶中,加入适量的离析溶液(10 %铬酸和 10 %硝酸等体积混合),随后放入 40℃烘箱中,2 d 后将离析液倒掉,并用蒸馏水反复清洗试材。用 Motic 数码显微镜进行观察和测定表皮细胞和气孔参数。每个组织参数重复观察 20 次。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 气孔面积及密度 气孔面积:在每种样品的扫描电镜照片上,随机选取 10 个气孔,分别测量每个气孔的长和宽,求其算术平均值,再除以电镜照片的实际放大倍率,即为每个气孔的实际长和宽。

$$\text{气孔面积}(\mu\text{m}^2) = \text{气孔长} \times \text{气孔宽}。 \quad (1)$$

气孔密度(DS:个·mm⁻²):随机选取 10 个视野,求其气孔密度的算术平均值,按下列公式计算每视野的气孔密度:

$$DS = n/s \quad (2)$$

式中:DS 为单个视野的气孔密度,n 为气孔个数,s 为视野面积(mm²)。

1.3.3.2 叶片组织结构紧密度、疏松度及叶脉突起度、栅海比值的计算。

细胞结构紧密度:

$$\begin{aligned} CTR &= \text{栅栏组织厚度} / \text{叶片厚度} \times 100 \% \\ &= TP / TL \times 100 \% \end{aligned} \quad (3)$$

细胞结构疏松度:

$$\begin{aligned} SR &= \text{海绵组织厚度} / \text{叶片厚度} \times 100 \% \\ &= TS / TL \times 100 \% \end{aligned} \quad (4)$$

叶脉突起度:

$$\begin{aligned} VDP &= \text{叶脉厚度} / \text{叶片厚度} \\ &= TV / TL \times 100 \% \end{aligned} \quad (5)$$

栅海比

$$\begin{aligned} P/S &= \text{栅栏组织厚度} / \text{海绵组织厚度} \\ &= TP / TS \end{aligned} \quad (6)$$

1.3.3.3 变异系数

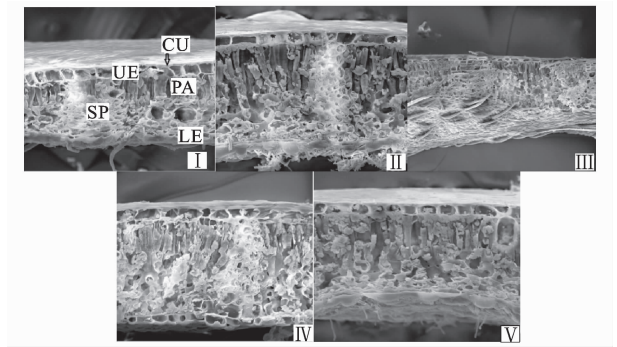
$$CV = (\text{标准差} / \text{平均值}) \times 100 \quad (7)$$

试验数据用 Excel 及 SPSS 统计软件进行相关分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同种樟树叶片表皮特征

图 1 看出,樟树叶片表皮包括上表皮和下表皮,均由单层细胞构成,上表皮细胞呈四边形,排列紧密(I,UE),下表皮细胞形状不规则(I,LE)。从测定结果可以看出(表 2),5 种或类型樟树的上表皮厚度均大于其下表皮。上表皮以 V 最厚,为 18.50 μm ,以 III 最薄,为 14.45 μm ,变异幅度较小,仅为 11.45%。下表皮厚度差别较大,变异系数达 47.40 %,最厚的为 IV,达 14.74 μm ,最薄的 II 仅为 5.49 μm 。



PA:栅栏组织;SP:海绵组织;CU:角质层;UE:上表皮;LE:下表皮。
图 1 不同樟树叶片结构结构

Fig. 1 The leaf anatomical structure of different camphor species

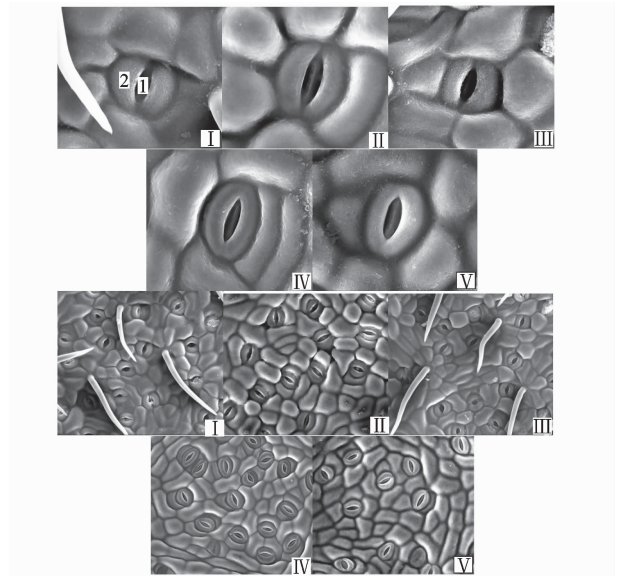
几种樟树叶片均仅上表皮披有角质层(图 1 的 I,CU)。从表 2 看出,5 个树种角质层的平均厚度为 3.478 μm ,最厚的有 II、IV,均在 4 μm 以上,最薄的为 III,仅为 2.51 μm 。

表 2 不同种樟树叶表皮特征					
Table 2 Leaf surface characters of different camphor species					
树种	上表皮厚度/ μm	下表皮厚度/ μm	气孔大小/ μm	角质层 / μm	气孔密度/(个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)
I	14.52 \pm 1.03	6.12 \pm 1.15	50.21	3.03 \pm 0.23	531.09
II	16.62 \pm 1.22	5.49 \pm 0.76	93.23	4.34 \pm 0.12	383.56
III	14.45 \pm 0.98	6.07 \pm 0.48	48.09	2.51 \pm 0.11	472.08
IV	17.92 \pm 1.32	14.74 \pm 2.01	52.07	4.04 \pm 0.09	457.32
V	18.50 \pm 1.69	8.07 \pm 1.31	62.20	3.47 \pm 0.19	280.30
平均值	16.40	8.10	61.16	3.48	424.87
CV/ %	11.45	47.40	30.62	21.31	22.69

2.2 不同种樟树叶肉结构特征

樟树叶片叶肉细胞由栅栏组织及海绵组织 2 部分构成。其中,栅栏组织由长柱型细胞排列构成,排列相对整齐且紧密(图 1 的 I,PA),海绵组织由不规则细胞构成,排列相对疏松(图 1 的 I,SP)。从测定结果可以看出(表 3),5 种或类型樟树栅栏组织的平均厚度为 71.71 μm ,变异系数达 37.18%,其中最厚的为 II,达 109.54 μm ,最大相差 2.44 倍。海绵组织主要参与下表皮细胞气孔的通气作用。海绵组织平均厚度为 55.49 μm ,变异系数相对较小,为 23.01%,其中以 IV 最厚,为 72.58 μm ,II 最薄,为 41.91 μm 。

不同种樟树的气孔分布于叶片下表皮,由 2 个肾形的保卫细胞构成,呈长椭圆形,且下陷(图 2)。从测定结果可以看出(表 2),樟树的气孔平均大小为 61.16 μm^2 ,平均密度为 424.87 个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ 。不同种樟树间气孔大小差异较大,变异系数达 30.62%,其中,面积最大的为 II,达 93.23 μm^2 。气孔密度变异幅度为 22.69%,超过 450 个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ 有 I、III 和 IV,最小的为 V,仅有 280.30 个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ 。



注:1. 气孔;2. 肾形保卫细胞。
图 2 不同种樟树叶片下表皮气孔观察
Fig. 2 Lamina down-epidermis stoma of different camphor species

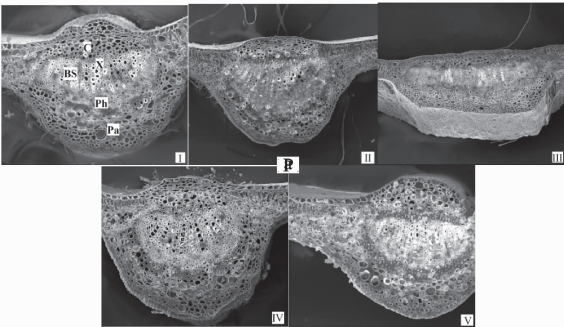
几种樟树细胞结构紧密度变化为 38.73%~63.11%,平均为 46.35%,变异系数为 20.89%,排列顺序为:II>IV>V>I>III。细胞结构疏松度变化范围为 24.15%~39.95%,平均为 37.31%,变异系数为 21.26%,排列顺序则为:III>I>V >IV>II。栅海比值中,仅有 III 叶片栅栏组织厚度小于海绵组织(图 1,III),其栅海比值为 0.85,其余几种樟树的栅栏组织厚度均明显大于海绵组织厚度,其中又以 II 最为明显,栅栏组织厚度达到海绵组织厚度的 2.61 倍,5 种或类型樟树栅海比值大小顺序为:II >IV>V>I>III(表 3)。

表 3 不同种樟树叶片与叶脉结构特征

Table 3 The measurements of leaf anatomical characters of different camphor species

树种	栅栏组织厚度 (TP)/μm	海绵组织厚度 (TS)/μm	叶片厚度 (TL)/μm	叶脉		栅海 厚度比 (P/S)	细胞结构 紧密度 (CTR)/%	细胞结构 疏松度 (SR)/%
				厚度 /μm	突起度 (VDP)			
I	44.94±3.34	43.62±4.15	109.20±9.17	437.89±15.38	4.01	1.03	41.15	39.95
II	109.54±7.01	41.91±2.49	173.56±11.26	775.81±29.89	4.47	2.61	63.11	24.15
III	50.58±4.23	59.51±3.37	130.61±8.30	468.89±21.03	3.59	0.85	38.73	45.56
IV	86.71±5.35	72.58±3.53	191.95±8.89	798.51±18.76	4.16	1.19	45.17	37.81
V	66.76±4.98	59.83±3.31	153.16±13.24	623.36±22.89	4.07	1.12	43.59	39.06
平均值	71.71	55.49	151.70	620.89	4.06	1.36	46.35	37.31
CV/%	37.18	23.01	21.74	26.97	7.80	52.32	20.89	21.26

各樟树叶片厚度测定值如表 3 所示,以 IV 最厚,为 191.95 μm,I 最薄,为 109.20 μm。不同种樟树叶脉的基本结构一致(图 3)。叶脉均为上表面略隆起,下表面凸现。从外至内,分别为表皮层、皮层和中柱。从测定结果可以看出(表 3),各树种间叶脉厚度差异不大,平均厚度为 620.89 μm,变异系数为 26.97%,以 IV 最厚,为 798.51 μm,最薄的 I 为 437.89 μm。叶脉突起度平均值为 4.06,除 III 外,其余树种 VDP 均超过 4。



C:厚角组织;X:木质部;BS:维管束鞘;Ph:韧皮部;Pa:薄壁组织

图 3 不同种樟树叶片叶脉观察

Fig. 3 The vein structure of different camphor species

2.3 不同种樟树抗寒性的综合评价

2.3.1 抗寒相关叶片解剖结构的筛选 采用分层聚类方法对樟树叶片解剖结构指标进行分析(图 4)。结果表明:欧式间距约为 7 时,13 项指标聚为 5 类,第 1 类包括 CTR、P/S 和 SS,第 2 类包括 TV、TUN、TP、TC、TL,第 3 类包括 DS、VDP,第 4 类包括 TS、TLE,第 5 类仅有 SR。

依据相关指数的大小从各类中选择典型的指标,相关指数的计算公式为^[16-17]:

$$R_i^2 = \sum r^2 / (n - 1) \tag{8}$$

式中: R_i^2 为每类中每个指标的相关指数, n 为同类中指标的个数, $i=1,2,\dots,n$, r 为同类中某一指标与其他指标之间的相关系数(表 4)。

樟树解剖结构聚类分析所得 5 类指标中,各指标的相关指数计算结果如表 5 所示。同一类中,相关指数越大,表示该指标的代表性就越强,从表 5 可

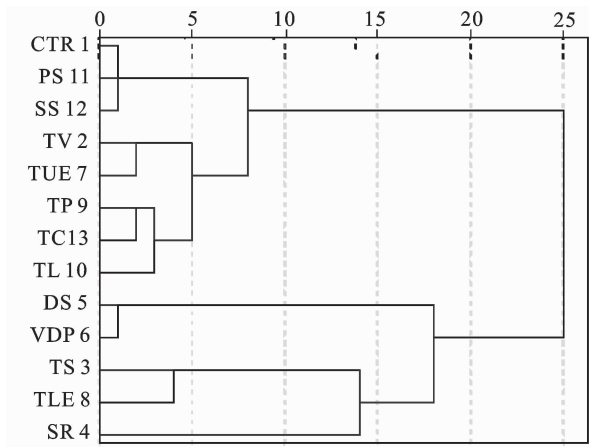


图 4 樟树叶片解剖结构指标的变量聚类分析

Fig. 4 Variable cluster analysis of 13 parameters of leaf structure

以看出,第 1 类中选取 P/S,第 2 类中选取 TC,第 3 类中,DS 与 VDP 相关指数大小相等,因 DS 对植物抗逆性影响存在不同观点^[18-19],因此该类中选取 VDP 指标,第 4 类中,TS 与 TLE 相关指数大小相等,因几种樟树之间 TLE 变异系数过大,因此选取 TS 作为此类的代表指标,第 5 类中仅 SR。

2.3.2 抗寒性综合评价 依据筛选出的 VDP、TC、TS、SR 及 P/S 等 5 个叶片解剖结构指标,采用 Fuzzy 数学中隶属函数法对不同种樟树的抗寒性进行综合评判。其中与樟树抗寒性呈正相关关系的 VDP、P/S 和 TC 采用公式: $f(x_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$;而与抗寒性呈负相关关系的 TS 及 SR 则采用公式: $f(x_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,式中, $f(x_i)$ 为隶属函数值; X_i 为指标测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 为某一指标测定值中的最大值和最小值。计算出 5 项指标的隶属函数值如表 6 所示,综合评判值为同一树种 5 项指标的平均值。从表中可以看出,综合评判值越大,表明叶片的结构对樟树的耐寒性越有利,5 种或类型樟树叶片解剖结构的评判结果顺序为 II>IV>V>I>III。

3 结论与讨论

植物生物学特征的差异是环境生态因子对植物

的影响和植物对不同环境的响应所引起的,也是植物适应性进化的结果^[20]。叶片作为植物进行光合、蒸腾等作用的重要器官,了解其结构特征对研究植物低温的适应性等具有重要意义^[5]。

表 4 叶结构指标的相关矩阵

Table 4 Correlative matrix of structural parameters in leaves													
指标	CTR	TV	TS	SR	DS	VDP	TUE	TLE	TP	TL	P/S	SS	TC
CTR	1												
TV	0.626 7	1											
TS	−0.462 3	0.288 6	1										
SR	−0.985 2	−0.618 6	0.485 8	1									
DS	−0.332 9	−0.769 4	−0.118 4	0.319 1	1								
VDP	−0.301 1	−0.688 4	−0.080 1	0.257 6	0.979 4	1							
TUE	0.285 0	0.896 2	0.485 6	−0.327 3	−0.766 6	−0.641 8	1						
TLE	−0.172 9	0.406 7	0.837 0	0.128 6	0.014 5	0.143 6	0.594 3	1					
TP	0.900 7	0.840 8	−0.033 8	−0.879 5	−0.408 7	−0.346 0	0.560 5	0.236 7	1				
TL	0.545 3	0.889 8	0.484 9	−0.526 6	−0.418 2	−0.330 6	0.767 3	0.665 7	0.854 8	1			
P/S	0.996 6	0.566 4	−0.523 7	−0.978 0	−0.294 9	−0.274 4	0.210 6	−0.244 6	0.866 0	0.480 9	1		
SS	0.967 6	0.624 8	−0.531 9	−0.945 2	−0.491 6	−0.482 0	0.294 9	−0.333 4	0.821 6	0.436 2	0.969 9	1	
TC	0.819 3	0.826 5	−0.018 8	−0.861 2	−0.383 2	−0.255 3	0.674 9	0.380 9	0.930 3	0.827 6	0.772 9	0.722 0	1

表 5 各类指标相关指数及排序

Table 5 Correlative indices and order of parameters in clusters			
分类	指标	相关指数	类中排序
1	CTR	0.964 8	2
1	P/S	0.967 1	1
1	SS	0.938 5	3
2	TV	0.746 3	2
2	TUE	0.540 4	5
2	TP	0.654 3	4
2	TC	0.751 3	1
2	TL	0.699 0	3
3	DS	0.959 1	1
3	VDP	0.959 1	1
4	TS	0.700 6	1
4	TLE	0.700 6	1
5	SR	—	

3.1 表皮特征与樟树抗寒性的关系

气孔是叶片内部组织与外界环境之间进行气体

交换,及植物水分散失的主要通道。S. B. Carpenter^[21]等及 D. M. Strobel^[22]等研究认为,气孔密度、大小主要受光照、温度和降水等生态因子的影响。H. M. Ro^[23]等研究认为,气孔的大小、密度、开闭灵敏度等均反映出植物对逆境适应能力的强弱。而气孔密度对植物抗逆性的影响却存在不同观点^[3,18]。谢庭味^[18]等研究发现,抗寒性强的木兰科(Magnoliaceae)植物具有气孔密度小等特点。而费松林^[7]研究认为,叶片气孔密度大,气孔面积与叶表面积比值则小,而气孔小型化的植物更具有抗逆性。本研究中,5 种或类型樟树叶片气孔密度平均为 424.87 个·mm^{−2},其中 V 气孔密度最小,而 I 最大,与综合评价结果明显不一致,因此,认为气孔密度大小与樟树抗寒性相关性不强,这可能与樟树种类多、分布范围广且生境条件较为复杂相关。

表 6 不同种樟树抗寒性综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of the cold tolerance of all varieties							
树种	VDP	TC	TS	SR	P/S	综合评判值	抗寒性强弱
I	0.000 0	0.284 2	0.944 2	0.262 3	0.102 2	0.318 6	4
II	0.588 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.917 7	1
III	0.235 3	0.000 0	0.426 1	0.000 0	0.000 0	0.132 3	5
IV	1.000 0	0.836 1	0.000 0	0.361 9	0.195 5	0.478 7	2
V	0.294 2	0.524 6	0.415 7	0.303 5	0.150 8	0.337 7	3

角质层厚度与植物发育过程中的环境条件密切相关,角质化程度越高,对细胞的受冻和解冻的缓冲作用越有利,因此,角质层厚度可用于不同植物的抗寒性评价^[12,24]。韩善华^[25]等对沙冬青的抗寒性研究中发现,角质层厚是其耐寒的主要叶片结构特征。余文琴^[26]等对荔枝的抗寒性研究中发现,角质层厚度其抗寒性呈正相关。张惠斌^[27]等在对龙眼的抗寒性研究中也证明了这种观点。阮志平^[28]对布迪

椰子等 3 种棕榈植物的抗寒性研究中发现,角质层厚度与其抗寒性呈正相。朱栗琼^[2]等以角质层厚度作为耐寒性鉴定指标之一,对黄素梅、朱槿等 5 种灌木进行了抗寒性研究,并得到了理想的结果。郑志勇^[29]等对长绿期金银木的抗寒性研究中发现,角质层厚度可作为其耐寒性的鉴定指标。本研究中,几种樟树叶片角质层厚度中,以 II 最厚,其次为 IV、V、I,以 III 最薄,这与几种樟树抗寒性的综合评判结

果一致,因此认为角质层厚度可作为樟树抗寒性鉴定的指标。

3.2 叶肉结构特征与樟树抗寒性的关系

大量研究已经证明,植物叶肉解剖结构与其抗寒性密切相关。尹立荣^[30]等研究发现,抗寒性强的葡萄品种栅栏组织排列紧密且较厚,而海面组织排列疏松且较薄。王启明^[31]等研究发现,抗寒的月季品种栅栏组织较厚,而不耐寒的品种海绵组织较厚。郭见早^[32]等研究发现,抗寒性强的茶树具有栅栏组织厚、排列紧密,且叶肉组织发达、分化程度高等特点。余文琴^[26]等研究发现,栅栏组织厚度与荔枝抗寒性呈正相关。韩善华^[25]等对研究发现,沙冬青较耐寒的主要叶片特征为叶肉组织发达,且分化程度高,并具有栅栏组织厚、排列紧密等特点。蔡永立^[33]等研究认为,栅栏组织、海绵组织及叶片等厚度的增加都是植物对低温环境的适应结果。刘祖生^[34]等对茶树的抗寒性研中发现,海绵组织厚度与其抗寒性呈负相关。本研究发现,几种樟树叶片解剖结构中,以 II 的栅栏组织最厚,且其海绵组织最薄,这与其综合评价中其评判值最大结果一致。

单一结构特征如栅栏组织、海绵组织厚度,可能会随着植物随处环境条件的变化而发生改变,而 CTR、疏松度 SR 及 P/S 等指标,因体现了栅栏组织、海绵组织与叶片厚度之间存在的相互制约的遗传关系,因此,能较好的保持相对的稳定性^[35]。简令成^[11]等对多个柑橘的研究发现,柑橘的抗寒性与 CTR 呈正相关,而与 SR 呈负相关。何小勇^[36]等对不同种源翅荚木的抗寒性研究中,CTR 值越大,SR 值越小,种源的抗寒性越大。王奎玲^[37]等对耐寒山茶叶结构及耐寒性关系研究发现,栅栏组织所占叶肉组织的比例越大,栅/海值越大,则品种的耐寒性越强。陈力耕^[38]等对脐橙的抗寒性发现,CTR 与 SR 可作为不同品系耐寒性评价的依据,在郑志勇^[29]等、彭伟秀^[9]等对金银木及杏树的抗寒性研究中也证实了这一结论。李剑^[39]等对陕西茶树品种的抗寒性研究中发现,耐寒的品种普遍具有栅栏组织/海绵组织比值较高等特点。本研究中发现,几种樟树叶片解剖结构中,CTR 及 P/S 值大小排序结果一致,均为 II>IV>V>I>III,与综合评价结果一致,而 SR 值大小排序结果则与此相反。由此表明,CTR、P/S 及 SR 可用于不同种樟树的抗寒性评价,且樟树抗寒性与 CTR、P/S 呈正相关,而与 SR 呈负相关。

本研究中,选择叶片表皮特征和叶肉解剖结构的 13 项指标进行测定,依据可测性、变异性和相关性等原则,采用聚类分析法,将 13 个叶片结构特征

指标聚为 5 类,并筛选出具有代表的 VDP、TC、TS、SR 及 P/S5 个指标,作为不同种樟树耐寒性与叶片解剖结构特征关系研究的参考依据。植物耐寒是叶片解剖结构中多指标交互作用的结果,单独从各指标分析,不同种樟树的耐寒程度排序不尽一致,因此有必要进行综合分析比较。而隶属函数分析是一个在多指标测定的基础上,对植物的某一特性进行综合评价的简单且有效的方法,因此,可避免因采用单个指标进行评价而造成的片面性^[37]。隶属函数分析作为一种有效的方法已广泛应用于花椒^[40]、葡萄^[41]、香椿^[42]等植物的抗逆性鉴定。本研究结合隶属函数分析的应用,对几种樟树的综合评价结果显示,以猴樟的叶片结构最有利于其抗寒,其次为芳樟、本樟和尾叶樟,而以沉水樟叶片结构最不利于其抗寒。

参考文献:

[1] KRATSEH H A, WISE R R. The ultrastuture of chilling stress[J]. Plant Cell Environ, 2000, 23: 337-350.

[2] 朱栗琼, 招礼军, 林大庆, 等. 5 种绿化灌木茎叶解剖结构及其耐寒性比较[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 267-270.

ZHU L Q, ZHAO L J, LIN D Q, et al. Comparison on leaf stem anatomical structures and cold tolerance of five shrub species[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 267-270. (in Chinese)

[3] 李正理, 张新英. 植物解剖学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 261-266.

[4] 王勋陵, 王静. 植物形态结构与环境[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989: 11-12.

[5] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 328-330.

[6] JACKSON L W R. Effect of shade on leaf structure of deciduous tree species[J]. Ecology, 1967, 48: 498-499.

[7] 费松林, 方精云, 樊拥军, 等. 贵州梵净山亮叶水青冈叶片和木材的解剖学特征及其与生态因子的关系[J]. 植物学报, 1999, 41(9): 1002-1009.

FEI S L, FANG J Y, FAN Y J, et al. Anatomical characteristics of leaves and woods of *Fagus lucidai* and their relationship to ecological factor in mountain Fanjingshan, Guizhou, China[J]. Acta Botanica Sinica, 1999, 41(9): 1002-1009. (in Chinese)

[8] 苗芳, 张嵩午, 王长发, 等. 低温小麦种子叶片结构及某些生理特性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 408-412.

MIAO F, ZHANG S W, WANG C F, et al. Leaf structure and some physiologic characteristics of low temperature wheat germplasm[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 408-412. (in Chinese)

[9] 彭伟秀, 杨建民, 张芹, 等. 不同抗寒性的杏品种叶片组织结构比较[J]. 河北林果研究, 2001, 6(2): 145-147.

PENG W X, YANG J M, ZHANG Q, et al. A comparison among apricot varieties with different cold hardness in leaf tis-

sue structure[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2001, 6(2): 145-147. (in Chinese)

[10] 陈席卿. 茶叶叶片解剖结构与抗寒性的相关性研究[J]. 蚕桑茶叶通讯, 1980(3): 11-14.

[11] 简令成, 孙德兰, 施国雄, 等. 不同柑桔种类叶片组织的结构与抗寒性的关系[J]. 园艺学报, 1986, 13(3): 163-168.

JIAN L C, SUN D L, SHI G X, *et al.* Leaf tissue structure in the cell of different kinds of citrus and its relation to cold hardiness[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1986, 13(3): 163-168. (in Chinese)

[12] 黄义江, 王宗清. 苹果属果树抗寒性的细胞学鉴定[J]. 园艺学报, 1982, 9(3): 23-30.

HUANG Y J, WANG Z Q. Cytological determinations of cold resistance of fruit trees (*Malus* genus)[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1982, 9(3): 23-30. (in Chinese)

[13] 薛建辉, 苏敬, 刘金根, 等. 5 个常绿阔叶园林树种对低温变化的生理响应[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 38-42.

XUE J H, SU J, LIU J G, *et al.* Physiological responses of five evergreen broadleaved ornamental tree species to low temperature variations during winter season[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2009, 33(4): 38-42. (in Chinese)

[14] 谢晓金, 郝日明. 南京地区 12 种常绿阔叶树种冬季抗寒性动态变化[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 2149-2154.

XIE X J, HAO R M. Dynamic changes of cold hardiness in winter in twelve evergreen broad-leaved species from Nanjing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2149-2154. (in Chinese)

[15] 姚方, 吴国新, 梅海军. 自然降温过程中 3 种樟树渗透调节物质的动态变化[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(3): 378-383.

YAO F, WU G X, MEI H J. Dynamic changes in osmotic adjustment substance of three camphor species under natural cooling[J]. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33(3): 378-383. (in Chinese)

[16] 梁文斌, 李志辉, 许仲坤, 等. 桉木无性系叶片解剖结构特征与其耐旱性的研究[J]. 中南林科技大学学报, 2010, 30(2): 16-22.

LIANG W B, LI Z H, XU Z K, *et al.* A study of leaf tissue characteristic and drought resistance of *Alnus cremastogyne* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(2): 16-22. (in Chinese)

[17] 韩刚, 李少雄, 徐鹏. 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)

[18] 谢庭味, 欧阳美珊. 13 种木兰科树种叶片解剖与其抗寒性[J]. 武汉植物学研究, 1989, 7(3): 234-238.

XIE T W, OUYANG M S. Anatomy of the leaves and freezing hardiness of thirteen species of Magnoliaceae[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1989, 7(3): 234-238. (in Chinese)

[19] 李正理. 旱生植物的形态和结构[J]. 生物学通报, 1981(4): 9-12.

[20] 戴怡龄, 安黎哲, 陈拓, 等. 寒区不同海拔橘黄罂粟叶片结构特征的比较研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(3): 495-503.

DAI Y L, AN L Z, CHEN T, *et al.* Comparative study on characteristics of leaf structure of *Papaver croceum* Ldb. (Papaveraceae) in two altitudes habitat at cold regions[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 495-503. (in Chinese)

[21] CARPENTER S B, SMITH N B. Stomatal distribution and size in southern appalachian hardwoods[J]. Can. J. Bot., 1975, 53: 1153-1156.

[22] STROBEL D M, SUNDBERG M D. Stomatal density in leaves of various xerophytes preliminary studies[J]. J. Minn. Acad. Sci., 1984, 49: 7-9.

[23] RO H M, KIM P G, LEE I B, *et al.* Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh. Cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature[J]. Trees, 2001, 15: 195-203.

[24] 房用, 李秀芬, 慕宗昭, 等. 茶树抗寒性研究进展[J]. 经济林研究, 2004, 22(2): 69-72.

FANG Y, LI X F, MU Z Z, *et al.* Development of research on anti-frigidity of tea tree[J]. Nonwood Forest Research, 2004, 22(2): 69-72. (in Chinese)

[25] 韩善华, 李劲松. 沙冬青叶片结构特征及其与抗寒性的关系[J]. 林业科学, 1992, 28(3): 198-201.

HAN S H, LI J S. Characteristics of leaf structure of *Amopiptanthus mongolicus* and its relation with cold resistance[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1992, 28(3): 198-201. (in Chinese)

[26] 余文琴, 刘星辉. 荔枝叶片细胞结构紧密度与耐寒性的关系[J]. 园艺学报, 1995, 22(2): 185-186.

SHE W Q, LIU X H. The relationship between leaf cell structure in litchi and its cold tolerance[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1995, 22(2): 185-186. (in Chinese)

[27] 张惠斌, 刘星辉. 龙眼叶片组织细胞结构特性与耐寒性的关系[J]. 园艺学报, 1993, 20(1): 1-7.

ZHANG H B, LIU X H. Cold tolerance of longyan in relation to cell structure in leaf tissues[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1993, 20(1): 1-7. (in Chinese)

[28] 阮志平. 引种棕榈植物的耐寒适应性机制研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.

[29] 郑志勇, 石进朝, 王德芳. 长绿期金银木耐寒性与叶片组织结构的关系[J]. 华北农学报, 2009, 24(Supp.): 331-333.

ZHENG Z Y, SHI J C, WANG D F. Studies on blade tissue structure and its relations to cold resistance of *Lonicera maachii* ‘Changlvqi’ [J]. Acta Abriticulae Boreali-Sinica, 2009, 24(Supp.): 331-333. (in Chinese)

[30] 尹立荣, 孙克娟, 宋润刚, 等. 葡萄叶片组织结构与抗寒性的关系[J]. 特产研究, 1990(3): 13-18.

[31] 王启明, 张根慧, 陈宝晶. 蔷薇属植物抗寒性指标的研究[J]. 吉林林学院学报, 1993, 9(1): 51-58.

WANG Q M, ZHANG Y H, CHEN B J. Study on hardiness indicators of the genus *Rosa* [J]. Journal of Jilin Forestry Institute, 1993, 9(1): 51-58. (in Chinese)