张晓飞,李金霞,吕峰,等.6个仙客来品系叶片结构特征与耐热性综合评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(6):69-78.
Zhang X F, Li J X, Lü F, et al.Comprehensive evaluation of leaf structure characteristics and heat tolerance of six *Cyclamen persicum* lines[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(6):69-78.
**doi**: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202502002

# 6个仙客来品系叶片结构特征与耐热性综合评价

张晓飞[1,2],李金霞[1,2*],吕峰[3],董梦宇[4],路晓月[5],赵丽红[6],刘素素[6]

(1.河北省林业和草原科学研究院,河北 石家庄 050061;2.河北省森林城市建设技术创新中心,河北 石家庄 050061;
3.宁夏回族自治区农业勘察设计院,宁夏 银川 750002;4.石家庄市园林绿化管护中心,河北 石家庄 050000;
5.石家庄市森林防火监控中心,河北 石家庄 050057;6.河北农业大学 园林与旅游学院,河北 保定 071000)

**摘　要**:[目的]仙客来是国内外畅销盆花的重要种类之一,适宜冷凉气候,但受近年气候变化影响,生产成本逐渐提高、产品质量有所下降,筛选耐热仙客来品种,对于解决产业发展瓶颈具有重要意义。[方法]以6个仙客来品系'哈里奥2015''哈里奥2090''巴黎之吻''吉野(紫白)''山脊''腮云'为试材,测定其越夏后的叶面积、上表皮厚度、海绵组织厚度等13项叶片结构特征指标,通过聚类分析和相关性分析筛选出耐热性评价主要指标,再利用平均隶属函数法进行耐热性综合评价和排序。[结果]6个仙客来品系叶面积、叶长和叶宽平均值为39.43 $cm^2$、6.50 cm、7.08 cm,叶面积的变异系数最大为10.97%。解剖结构显示,6个仙客来品系中,'山脊'的筛管直径、组织结构紧密度、栅海比均最大,'吉野(紫白)'的叶片厚度、上下表皮厚度等指标均最大,'哈里奥2090'的栅栏组织厚度、筛管直径等指标均最小。聚类分析和相关性分析将13项叶片结构特征指标分为5类,其中5个反映仙客来耐热性的典型指标分别是叶片厚度、栅海比、栅栏组织厚度、叶面积和组织疏松度。采用隶属函数法对6个仙客来品系耐热性进行综合评价,耐热性由强到弱排序为:'山脊'>'吉野(紫白)'>'哈里奥2015'>'巴黎之吻'>'腮云'>'哈里奥2090'。[结论]综上,通过测定分析仙客来的叶片结构特征来对仙客来的耐热性进行综合评价具有可行性,可为更加科学、便捷的评价仙客来耐热性提供新思路,并为仙客来耐热种质筛选和耐热新品种选育提供参考。

**关键词**:仙客来;耐热性;叶片结构;综合评价
**中图分类号**:S682.2+9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)06-0069-10

## Comprehensive evaluation of leaf structural characteristics and heat tolerance in six *Cyclamen persicum* lines

Zhang Xiaofei[1,2], Li Jinxia[1,2*], Lü Feng[3], Dong Mengyu[4], Lu Xiaoyue[5], Zhao Lihong[6], Liu Susu[6]

(*1.Hebei Academy of Forestry and Grassland Science, Shijiazhuang 050061, China; 2.Hebei Forest City Construction Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050061, China; 3.Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Survey and Design Institute, Yinchuan 750002, China; 4.Shijiazhuang Landscaping Management and Care Centre, Shijiazhuang 050000, China; 5.Shijiazhuang Forest Fire Prevention and Control Centre, Shijiazhuang 050057, China; 6.College of Landscape and Travel, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China*)

**Abstract**:[Objective]*Cyclamen* is a major potted flower with significant market demand globally. It thrives in cool climates, but recent climate change has led to increased production cost and a decline in product quality. Selecting heat-tolerant *C. persicum* varieties is of great significance for overcoming developmental constraints in the industry.[Methods]Six *C. persicum* lines,

**收稿日期**:2025-02-04　　**修回日期**:2025-04-17
**基金项目**:中央引导地方科技发展资金项目(自由探索类基础研究)(246Z6308G);河北省科技厅现代种业科技创新专项(21326317D)
**作者信息**:张晓飞(ORCID:0009-0005-7504-327X),硕士,工程师,研究方向:园林植物引种栽培及遗传育种,E-mail:zxf202310@126.com
*通信作者:李金霞,硕士,高级工程师,研究方向:园林植物学,E-mail:lijinxia299@163.com

including 'Halios 2015', 'Halios 2090', 'Fleur in Vogue', 'Yoshino (Purple-White)', 'Sierra', and 'Halios Blush', were used as test materials. Thirteen leaf structural traits, including leaf area, upper epidermis thickness, and spongy tissue thickness, were measured after the summer period. Main indexes for heat-tolerance evaluation were identified using cluster and correlation analysis. The average membership function method was then applied to comprehensively assess and rank the heat-tolerance of the *C. persicum* lines. [Results]The mean leaf area, leaf length, and leaf width of the six *C. persicum* lines were 39.43 $cm^2$, 6.50 cm, and 7.08 cm, respectively, with leaf area showing the highest coefficient of variation (10.97%). Anatomical analysis revealed that 'Sierra' exhibited the largest values for sieve tube diameter, tissue compactness, and palisade-spongy ratio, while 'Yoshino (Purple-White)' had the highest values for leaf thickness and upper/lower epidermis thickness. In contrast, 'Halios 2090' showed the smallest values for palisade tissue thickness and sieve tube diameter. Cluster and correlation analysis categorized the 13 leaf structural characteristic indexes into five groups, from which five key traits were identified as representative of heat tolerance: leaf thickness, palisade-spongy ratio, palisade tissue thickness, leaf area, and tissue looseness. Based on the membership function evaluation, the heat tolerance of the six *C. persicum* lines was ranked in descending order as follows: Sierra>'Yoshino (Purple-White)'>'Halios 2015'>'Fleur in Vogue'>'Halios Blush'>'Halios 2090'. [Conclusion]This study demonstrated the feasibility of using leaf structural characteristics to comprehensively evaluate heat tolerance in *C. persicum*. The approach provides a scientific and efficient methodology for assessing heat-tolerance, and offers valuable insights for the selection of heat-tolerant *C. persicum* germplasms and the breeding of new resilient varieties.

**Keywords**: *Cyclamen persicum*, Heat resistance, Leaf structure, Comprehensive evaluation

仙客来(*Cyclamen persicum* Mill)具品种多、花色艳、花型奇和花期长等特点,目前已发展成为国内外商品盆花中重要的种类之一[1-2]。仙客来原产地中海沿岸,适宜冷凉气候。在冷凉的环境中,其各项生理活动,如光合作用、呼吸作用以及养分吸收等,均处于较为高效的状态。而环境温度一旦超出仙客来的适宜范围,进入高温区间,其生命活动就会受到显著抑制,死亡率明显提升[3]。受全球气候变暖影响,近年来我国仙客来主产区河北、山东等地夏季温度居高不下[4],仙客来温室内越夏难度陡升,产品质量下降,生产成本显著提高。高温是仙客来产业发展的主要瓶颈之一。因此,探究仙客来的耐热机理和进行耐热性评价,对于筛选耐热仙客来种质和选育耐热仙客来新品种,以及解决产业发展瓶颈等方面具有重要意义。

植物的形态学特征是反映其抗逆性的重要因素[5-6]。植物主要通过叶片来感知外界环境变化,分析其结构特征能够直观反映植物对某一环境因子的适应性[7-8],因此通过对叶片解剖结构特征进行分析来评判植物抗逆性已经被广泛应用[9],可用来比较各个品种、品系或者无性系植物的耐旱、耐寒或耐热等抗逆指标。目前,相关研究在杜鹃花[10]、切花菊[11]、秋海棠[12]、铁线莲[13]、山茶[14]等花卉上已有报道,通过测定植物叶片厚度、栅栏组织厚度等指标,再利用聚类、隶属函数等分析方法综合评价或比较不同品种、品系或者无性系花卉的耐热性,这为筛选耐热仙客来品种提供了新的思路和方法。叶片厚度,上、下表皮厚度,组织结构紧密度,栅海比等指标常作为评价花卉耐热性的关键指标。关于仙客来耐热性研究的报道主要集中在生长特性和生理生化等方面[15-17],鲜见通过分析仙客来叶片解剖结构来评价其耐热性的报道。故本研究以6个仙客来品系为研究对象,观测各品系越夏后的表型性状,采用石蜡切片技术观测品系间叶片解剖结构的差异,综合评价不同品系仙客来的耐热性,旨在为仙客来耐热种质筛选和耐热品种的选育提供理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验在河北省石家庄市河北省林业和草原科学研究院温室内进行,日常管理温度控制在15~25 ℃,光照强度控制在10 000~30 000 Lx。试验材料为市场上主销仙客来品种姊妹交后代形成的6个品系,分别是'哈里奥2015''哈里奥2090''巴黎之吻''吉野(紫白)''山脊''腮云'。2023年11月下旬播种(草炭),2024年5月初上盆(直径15 cm;草炭:珍珠岩=4:1),正常水肥管理,以供后续试验使用。

### 1.2 试验方法

2024年7-8月,试验材料于温室内经自然高温胁迫处理60 d,室外最高温度42 ℃,温室内最高温

度35 ℃(图1)。2024年9月初,每个仙客来品系随机挑选5盆长势一致、健康无病的植株以供试验。叶面积测量:每盆选取成熟叶片5片,完整剪下,测量叶面积、叶长、叶宽。叶片解剖结构:每盆选取大小一致的成熟叶片5片,连带1~2 cm叶柄完整剪下,立即置于FAA固定液中[18],带回实验室备用;参照郭文文等[11]的方法制作石蜡切片,后进行全视野数字切片扫描(whole slide imaging),用CaseViewer 2.4软件查看并测量叶片厚度,上、下表皮厚度,栅栏组织厚度、海绵组织厚度、导管直径、筛管直径7个指标。之后计算栅海比、叶片结构紧实度、叶片结构疏松度,公式如下:

$$栅海比=\frac{TP}{TS} \tag{1}$$

$$叶片结构紧实度=\frac{TP}{LT} \tag{2}$$

$$叶片疏松度=\frac{TS}{LT} \tag{3}$$

式中,TP:栅栏组织细胞厚度;TS:海绵组织厚度;LT:叶片厚度。

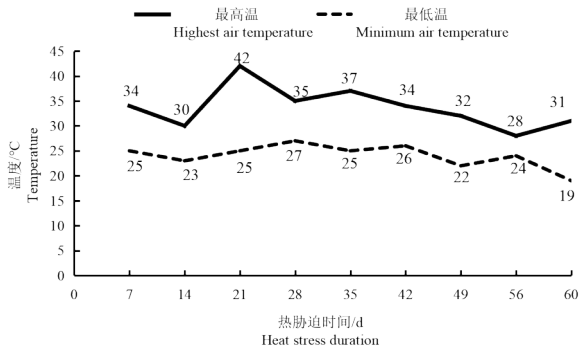



**图1　自然高温胁迫处理室外温度变化**

**Fig. 1**　Temperature variation during natural high temperature stress treatment

### 1.3　统计分析

使用Excel 2019软件进行数据处理及作图,采用SPSS 26.0软件进行Pearson相关性和系统聚类分析。对6个仙客来品系的13项指标(平均值)进行聚类分析,再进行相关性分析从中筛选出典型指标,并确定其权重。耐热性综合评价需先用隶属函数法计算各典型指标平均隶属度,再进行综合评价[10]。

## 2　结果与分析

### 2.1　仙客来叶片形态观测

6个品系仙客来叶片表型指标见图2和表1,叶面积、叶长和叶宽分别为34.29~44.78 $cm^2$、5.62~7.40 cm和6.34~7.81 cm,平均值分别为39.43 $cm^2$、6.50 cm、7.08 cm,其中叶面积变异系数最高,为10.97 %。叶面积、叶长和叶宽最大的均为'山脊',分别为44.78$cm^2$、7.40 cm、7.81 cm,最小的均为'吉野(紫白)',分别为34.29 $cm^2$、5.62 cm、6.34 cm,较'山脊'分别显著降低23.43%、24.05%、18.82%($P<0.05$)。

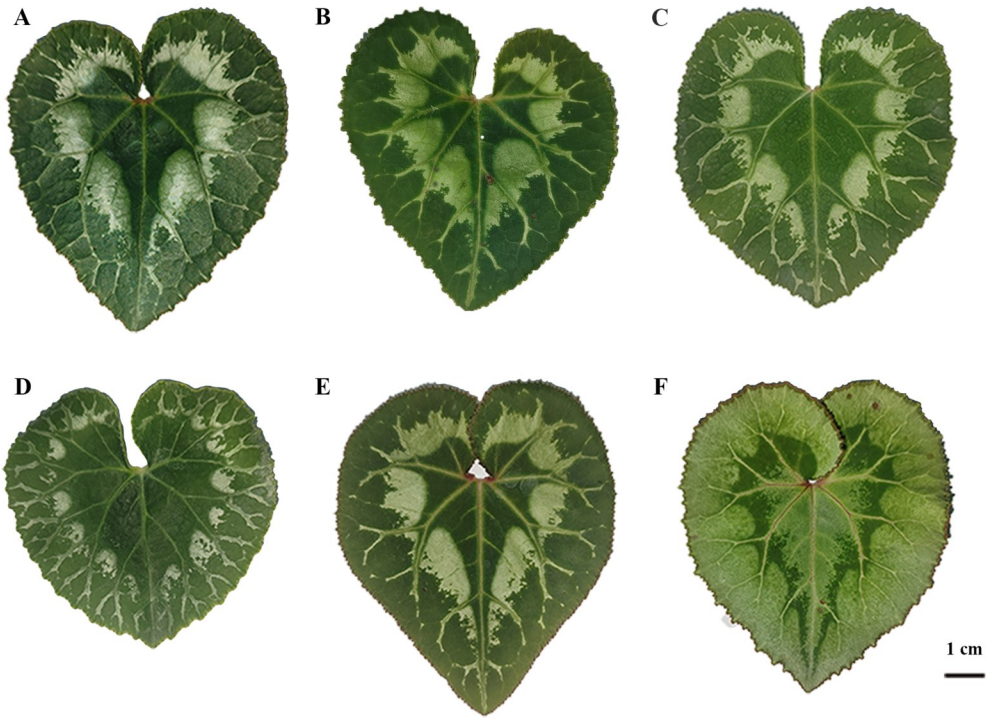
### 2.2　仙客来叶片解剖结构观察

仙客来叶片横切解剖结构见图3,6个仙客来品系叶片均由上下表皮、栅栏组织、海绵组织、叶脉和气孔组成。叶肉部分的栅栏组织由2~3层细胞组成,其中'哈里奥2015'、'吉野(紫白)'、'腮云'的栅栏组织细胞排列相对其它品系更为紧密,海绵细胞排列比较疏松,间隙也比较大,且各个品系的叶片细胞形态、大小均有所不同。

仙客来叶片主脉横切解剖结构见图4,各个品系的结构相似,主脉比较发达,有明显分化的木质部和韧皮部。叶脉处于栅栏组织和海绵组织中间,其组成主要包括厚角组织、木质部、韧皮部以及薄壁组织。叶脉之中还有导管和筛管等构成的维管系统,二者分别处于韧皮部和木质部之间。

由表2可见,6个仙客来品系的叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度分别为585.71~689.96、40.91~44.38、22.18~24.98 μm,即上表皮厚度均大于下表皮厚度。其中叶片厚度和上、下表皮厚度最大的均是'吉野(紫白)',厚度分别为689.96、44.38、24.98 μm,最薄的均是'腮云',厚度分别是585.71、40.91、22.18 μm,且2个品系的3个指标之间均呈显著差异($P<0.05$)。

栅栏组织厚度为121.28~165.79 μm,平均值为143.95 μm,最厚的是'吉野(紫白)',最薄的是'腮云',且2个品系呈显著差异。海绵组织厚度为393.01~452.81 μm,平均值为421.24 μm,最厚的是'吉野(紫白)',最薄的是'巴黎之吻',且2个品系呈显著差异($P<0.05$)。各品系的海绵组织厚度均比栅栏组织厚度大,栅海比为0.30~0.39,平




A:'哈里奥2015';B:'哈里奥2090';C:'巴黎之吻';D:'吉野(紫白)'E:'山脊';F:'腮云'

A: 'Halios 2015'; B: 'Halios 2090'; C: 'Fleur in Vogue'; D: 'Yoshino'; E: 'Sierra'; F: 'Halios Blush'

**图2 6个仙客来品系叶片形态特征**

**Fig.2** Morphological characteristics of leaves in six *C. persicum* lines

**表1 6个仙客来品系叶片表型指标**

**Table 1** Leaf phenotypic traits of six *C. persicum* Lines

| 叶片表型指标 Leaf phenotypic traits | | 叶面积/$cm^2$ Leaf area | 叶长/cm Leaf length | 叶宽/cm Leaf width |
|---|---|---|---|---|
| 品系 Lines | 哈里奥2015 | 41.75±2.25a | 7.25±0.14a | 7.27±0.31abc |
| | 哈里奥2090 | 34.79±1.36b | 5.90±0.04b | 6.78±0.17bc |
| | 巴黎之吻 | 36.73±0.77b | 5.98±0.40b | 6.67±0.24bc |
| | 吉野(紫白) | 34.29±1.71b | 5.62±0.20b | 6.34±0.24c |
| | 山脊 | 44.78±1.41a | 7.40±0.13a | 7.81±0.34a |
| | 腮云 | 44.22±1.28a | 6.84±0.27a | 7.63±0.41ab |
| 平均值 Mean | | 39.43 | 6.50 | 7.08 |
| 变异系数/% CV | | 10.97 | 10.69 | 7.44 |

注:表中同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: In the table, the different lowercase letters within the same column indicated significant differences at the $P<0.05$ level. This notation applies throughout the table unless otherwise stated.

均值为0.34,最大的是'山脊','哈里奥2090'和'腮云'最小。仙客来叶片结构紧实度和疏松度分别处于0.21~0.25、0.65~0.70,叶片结构紧实度最大的是'山脊',最小的是'哈里奥2090'和'腮云';叶片结构疏松度最大的是'哈里奥2090',最小的是'山脊'。各品系叶片结构紧实度和疏松度2个指标排序呈现相反的趋势,表明各品系之间的耐热性差异较大。

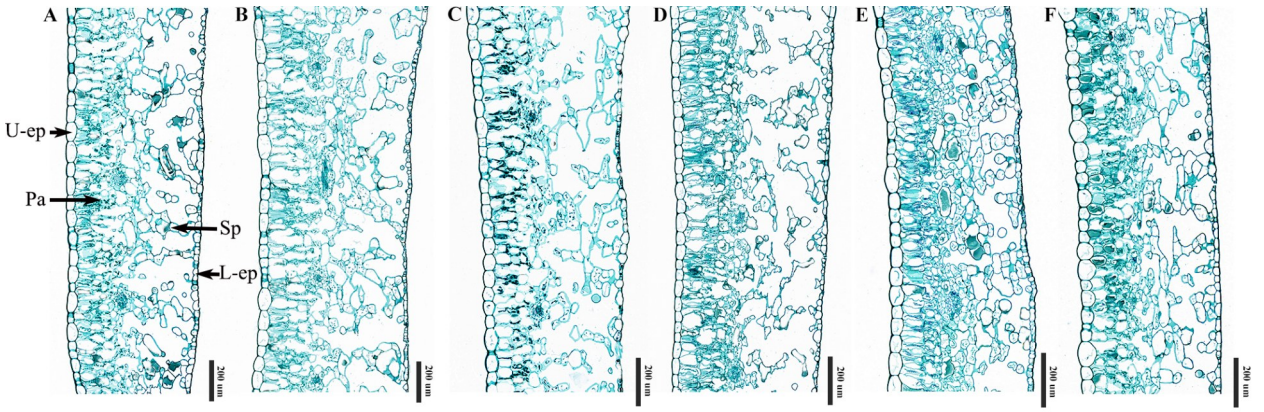
导管直径为10.10~12.51 μm,平均值为11.15 μm,最大的是'吉野(紫白)',最小的是'腮云',且2个品系呈显著差异($P<0.05$)。筛管直径处于8.99~11.08 μm,平均值为10.22 μm,最大的是'山脊',最小的是'哈里奥2090',且2个品系呈显著差异($P<0.05$)。6个品系中,'吉野(紫白)'和'山脊'的导管和筛管直径相对较大,表明其对于水分和营养的运输更高效,可能对高温的适应性更强。

'山脊'和'吉野(紫白)'均有一半以上指标从大到小排在前2名,'哈里奥2015'和'巴黎之吻'有一半左右指标排在中游,'腮云'有一半以上指标排名靠后,'哈里奥2090'近一半指标排名靠后。

### 2.3 仙客来叶片耐热性综合分析

#### 2.3.1 仙客来叶片结构指标聚类分析

根据6个仙客来品系的13项叶片结构指标进行系统聚类。选用组间联接法作为聚类分析的方法,并将平方欧式距离设定为度量样本间相似程

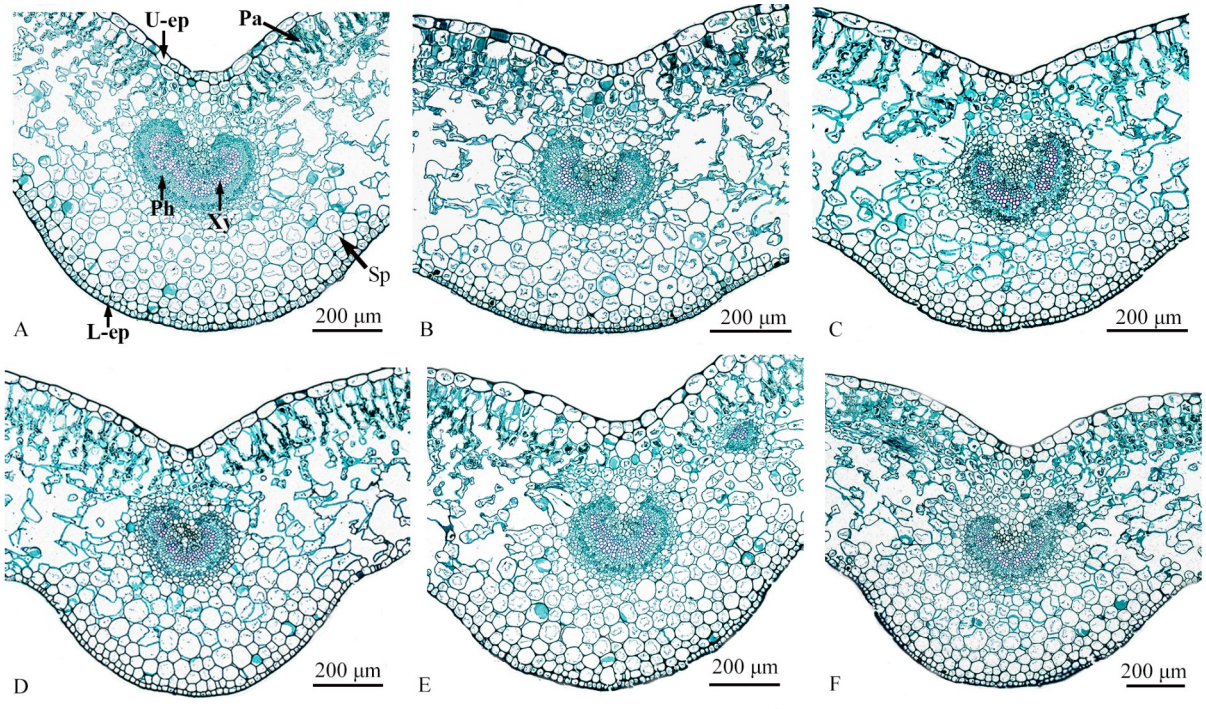



A:'哈里奥2015';B:'哈里奥2090';C:'巴黎之吻';D:'吉野(紫白)'E:'山脊';F:'腮云'。U-ep:上表皮细胞;Pa:栅栏组织细胞;Sp:海绵组织细胞;L-ep:下表皮细胞

A:'Halios 2015';B:'Halios 2090';C:'Fleur in Vogue';D:'Yoshino';E:'Sierra';F:'Halios Blush'. U-ep:Upper epidermis cells;Pa:Palisade tissue;Sp:Spongy tissue;L-ep:Lower epidermis cells

**图3　6个仙客来品系叶片横切**

**Fig.3**　Transverse sections of leaves in six *C. persicum* lines




A:'哈里奥2015';B:'哈里奥2090';C:'巴黎之吻';D:'吉野(紫白)'E:'山脊';F:'腮云'。U-ep:上表皮细胞;Pa:栅栏组织细胞;Sp:海绵组织细胞;L-ep:下表皮细胞;Ph:韧皮部;Xy:木质部

A:'Halios 2015';B:'Halios 2090';C:'Fleur in Vogue';D:'Yoshino';E:'Sierra';F:'Halios Blush'. U-ep:Upper epidermis cells;Pa:Palisade tissue;Sp:Spongy tissue;L-ep:Lower epidermis cells;Ph:Phloem;Xy:Xylem

**图4　6个仙客来品系叶脉横切**

**Fig.4**　Transverse sections of leaf veins in six *C. persicum* lines.

度的标准,分析结果见图5。当平方欧式距离为5时,13个指标性状可分为5类。第1类有3个指标,分别为叶片结构紧实度、筛管直径和栅海比;第2类有4个指标,为上表皮厚度、下表皮厚度、导管直径和栅栏组织厚度;第3类有2个指标,分别为叶片厚度和海绵组织厚度;第4类有3个指标,分别为叶长、叶宽和叶面积;第5类仅有叶片结构疏松度1个指标。

表2 仙客来叶片解剖结构指标

**Table 2** Anatomica structural parameters of *C. persicum* leaves

| 品系 Lines | 叶片解剖结构指标 Anatomica structural parameters | 叶片厚度/μm Leaf thickness | 上表皮厚度/μm Upper epidermis cells | 下表皮厚度/μm Lower epidermis cells | 栅栏组织厚度/μm Palisade tissue | 海绵组织厚度/μm Spongy tissue | 导管直径/μm Vessel diameter | 筛管直径/μm Sieve tube diameter—spongy ratio | 叶片结构紧实度 Leaf compactness | 叶片结构疏松度 Leaf looseness | 栅海比 Calculated palisade—to—spongy ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 哈里奥2015 | 662.39±11.04a | 43.41±0.69ab | 24.31±0.17ab | 147.57±2.75b | 440.29±7.23a | 10.72±0.03c | 10.37±0.12a | 0.22±0.00bc | 0.66±0.01b | 0.34±0.01b |
| | 哈里奥2090 | 618.69±2.49b | 42.04±0.69abc | 23.29±0.86ab | 131.89±3.56cd | 435.09±7.35a | 10.94±0.04c | 8.99±0.25b | 0.21±0.00c | 0.70±0.01a | 0.30±0.01c |
| | 巴黎之吻 | 599.21±5.84bc | 41.37±0.88bc | 24.38±0.63ab | 142.96±6.50bc | 393.01±3.81b | 10.88±0.18c | 11.07±0.19a | 0.24±0.01ab | 0.66±0.00b | 0.36±0.01a |
| | 吉野(紫白) | 689.96±15.10a | 44.38±0.73a | 24.98±0.71a | 165.79±2.43a | 452.81±8.80a | 12.51±0.23a | 10.61±0.17a | 0.24±0.00ab | 0.66±0.00b | 0.37±0.01a |
| | 山脊 | 615.19±12.50bc | 44.22±0.60a | 23.93±0.74ab | 154.19±3.86ab | 399.22±7.51b | 11.77±0.07b | 11.08±0.13a | 0.25±0.01a | 0.65±0.01b | 0.39±0.01a |
| | 腮云 | 585.71±6.36c | 40.91±0.74c | 22.18±1.10b | 121.28±2.62d | 407.03±3.98b | 10.10±0.05c | 9.18±0.51b | 0.21±0.01c | 0.69±0.00a | 0.30±0.01c |
| | 平均值Mean | 628.53 | 42.72 | 23.84 | 143.95 | 421.24 | 11.15 | 10.22 | 0.23 | 0.67 | 0.34 |
| | 变异系数/%CV | 5.77 | 3.18 | 3.79 | 10.05 | 5.34 | 6.98 | 8.23 | 6.80 | 3.09 | 9.61 |

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same column indicated significant differences at the $P<0.05$ level. This notation applies throughout the table unless otherwise stated.

6个仙客来品系叶片结构聚类谱系图的结果显示,平方欧式距离为5时,6个仙客来品系可以划分为3类(图6)。各指标在这3类中的平均表现见表3,可见,第1类群为'哈里奥2090'和'山脊',栅海比较小、叶片结构疏松度较高,叶片结构最为疏松。第2类群为'哈里奥2015'、'腮云'和'巴黎之吻',叶面积最大、海绵组织厚度最小。第3类群仅有'吉野(紫白)',其叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度为所有类群中最大的

2.3.2 仙客来叶片结构指标相关性分析

表4可见,13个指标之中,叶面积与叶长、叶宽,叶长与叶宽,筛管直径与组织结构紧密度、栅海比,以及组织紧密度与栅海比,均呈极显著正相关($P<0.01$);呈极显著负相关($P<0.01$)的仅有筛管直径与组织结构疏松度;叶片厚度与海绵组织厚度、上下表皮厚度与栅栏组织厚度、栅栏组织厚度与导管直径和栅海比、上表皮厚度与导管直径、筛管直径与组织结构紧密度和栅海比指标之间呈显著正相关($P<0.05$);叶片紧实度与栅海比、叶片疏松度呈显著负相关($P<0.05$)。

综合聚类和相关性分析的结果,计算5类指标每一类指标中每个指标的相关指数,并经整理、排序,得到6个仙客来品系叶片结构的相关指数及排序(表5)。确定每一类指标中的典型指标有2个原则,首先看每个指标的相关指数,分属同一类的指标中相关指数最大的即为典型指标;如果2个及以上指标的相关指数相同且最大,则需要再看各指标变异系数,变异系数大的则选为典型指标。由表5可知,栅海比是第1类中相关指数最大的指标,为0.963,则确定栅海比作为第1类的典型指标。栅栏组织厚度是第2类中相关指数最大的指标,为0.901,则确定栅栏组织厚度为第2类的典型指标。第3类指标中叶片厚度和海绵组织厚度2个指标指数相同且最大,但叶片厚度变异系数(5.77%)大于海绵组织厚度(5.34%),故以叶片厚度为典型指标。叶面积是第4类中相关指数最大的指标,为0.953,则确定叶面积作为第4类的典型指标。第5类仅有叶片结构疏松度1项指标,则其为第5类的典型指标。

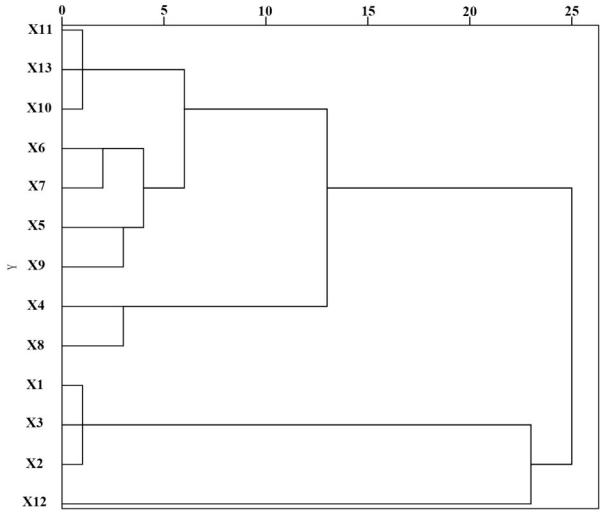
2.3.3 仙客来耐热性综合评价

应用隶属函数法,用前文筛选出的5个典型指标对6个仙客来品系进行耐热性综合评价,平均隶

**表3　仙客来13项叶片结构指标的平均表现**

**Table 3**　Mean values of 13 leaf anatomical structural parameters in *C. persicum*

| 叶片结构指标 Leaf anatomical structural parameters | | 叶面积/$cm^2$ Leaf area | 叶长/cm Leaf length | 叶宽/cm Leaf width | 叶片厚度/μm Leaf thickness | 上表皮厚度/μm Upper epidermis cells | 下表皮厚度/μm Lower epidermis cells | 栅栏组织厚度/μm Palisade tissue | 海绵组织厚度/μm Spongy tissue | 导管直径/μm Vessel diameter | 筛管直径/μm Sieve tube diameter | 叶片结构紧实度 Leaf compactness | 叶片结构疏松度 Leaf looseness | 栅海比 Calculated palisade-to-spongy ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 类群 | 1 | 39.79 | 6.65 | 7.30 | 616.94 | 43.13 | 23.61 | 143.04 | 417.16 | 11.36 | 10.04 | 0.23 | 0.68 | 0.35 |
| Class | 2 | 40.90 | 6.69 | 7.19 | 615.77 | 41.90 | 23.62 | 137.27 | 413.44 | 10.57 | 10.21 | 0.22 | 0.67 | 0.33 |
| group | 3 | 34.29 | 5.62 | 6.34 | 689.96 | 44.38 | 24.98 | 165.79 | 452.81 | 12.51 | 10.61 | 0.24 | 0.66 | 0.37 |




X1:叶面积;X2:叶长;X3:叶宽;X4:叶片厚度;X5:上表皮厚度;X6:下表皮厚度:X7:栅栏组织厚度;X8:海绵组织厚度;X9:导管直径;X10:筛管直径;X11:栅海比;X12:叶片结构紧实度;X13:叶片结构疏松度。表4同

X1: Leaf area; X2: Leaf length; X3: Leaf width; X4: Leaf thickness; X5: Upper epidermis cells; X6: Lower epidermis cells; X7: Palisade tissue; X8: Spongy tissue; X9: Vessel diameter; X10: Sieve tube diameter; X11: Calculated palisade-to-spongy ratio; X12: Leaf compactness; X13: Leaf looseness. The same as Table 4

**图5　6个仙客来品系13个叶片结构指标的聚类分析图**

**Fig. 5**　Dendrogram of cluster analysis for 13 leaf anatomical structural parameters in six *C. persicum* lines

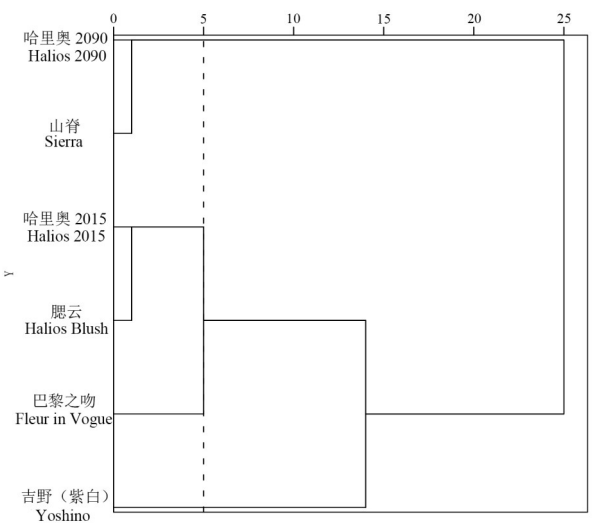



**图6　6个仙客来品系叶片的聚类分析图**

**Fig. 6**　Dendrogram of cluster analysis of leaves in six *C.persicum* lines

属度的值即代表不同品系仙客来的耐热性,数值越大则耐热性越强,反之则越弱。根据各典型指标与耐热性的相关性来判定隶属函数公式,正相关则采用正隶属函数公式,负相关则相反。5个典型指标中,仅组织结构疏松度与仙客来的耐热性呈负相关,采用反隶属函数公式计算,其余指标计算均采用正隶属函数公式。6个仙客来品系耐热性综合评价见表6,'山脊'的平均隶属度最高,为0.80,耐热性最强;其次为'吉野(紫白)';而'哈里奥2090'的平均隶属度最小,为0.13,耐热性最差。6个品系耐热性排序为:'山脊'>'吉野(紫白)'>'哈里奥2015'>'巴黎之吻'>'腮云'>'哈里奥2090',排序结果与栅栏组织厚度、筛管直径、叶片结构疏松度、栅海比的排序结果相似,与叶片结构紧实度的排序趋势相反,表明该耐热性排序比较可靠。

## 3　讨论

受全球气候变暖影响,夏季温度持续偏高,高温会影响植物的表型、生理、光合等多个方面,从而影响植株的正常生长[19]。叶片是植物感受外界变化最直接、最敏感的器官,通过观测叶片形态以及解剖结构特征是分析植物的生态适应性的方法之一,可用来评判不同品种植物的耐热性[20]。

6个仙客来品系栅栏组织厚度、筛管直径、栅

**表4 6个仙客来品系13个叶片结构指标的相关性分析**

**Table 4** Correlation analysis of 13 leaf anatomical structural parameters in six *C. persicum* lines

| 指标 Parameters | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X2 | 0.938** | | | | | | | | | | | |
| X3 | 0.967** | 0.921** | | | | | | | | | | |
| X4 | −0.413 | −0.223 | −0.500 | | | | | | | | | |
| X5 | −0.022 | 0.162 | −0.058 | 0.776 | | | | | | | | |
| X6 | −0.476 | −0.290 | −0.583 | 0.741 | 0.681 | | | | | | | |
| X7 | −0.264 | −0.120 | −0.362 | 0.777 | 0.889* | 0.911* | | | | | | |
| X8 | −0.500 | −0.335 | −0.507 | 0.854* | 0.475 | 0.359 | 0.367 | | | | | |
| X9 | −0.396 | −0.323 | −0.422 | 0.683 | 0.836* | 0.740 | 0.904* | 0.388 | | | | |
| X10 | 0.063 | 0.136 | −0.074 | 0.270 | 0.528 | 0.760 | 0.761 | −0.265 | 0.540 | | | |
| X11 | 0.006 | 0.024 | −0.079 | 0.225 | 0.594 | 0.684 | 0.785 | −0.278 | 0.719 | 0.927** | | |
| X12 | −0.201 | −0.297 | −0.047 | −0.389 | −0.650 | −0.739 | −0.798 | 0.141 | −0.543 | −0.965** | −0.871* | |
| X13 | 0.061 | 0.130 | −0.041 | 0.365 | 0.713 | 0.749 | 0.860* | −0.153 | 0.735 | 0.949** | 0.977** | −0.940** |

注:**表示极显著相关($P<0.01$),*表示显著相关($P<0.05$)。

Note:** indicated extremely significant difference ($P<0.01$), and * indicates significant difference($P<0.05$).

**表5 6个仙客来品系13个叶片结构的相关指数及排序结果**

**Table 5** Correlation indices and ranking results of 13 leaf structures of six strains of *C. persicum*

| 分类 Classify | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 指标 Indicator | 叶片结构紧实度 | 栅海比 | 筛管直径 | 下表皮厚度 | 栅栏组织厚度 | 上表皮厚度 | 导管直径 | 叶片厚度 | 海绵组织厚度 | 叶面积 | 叶宽 | 叶长 | 叶片结构疏松度 |
| 相关指数 Correlation index | 0.952 | 0.963 | 0.938 | 0.777 | 0.901 | 0.802 | 0.827 | 0.854 | 0.854 | 0.953 | 0.944 | 0.930 | — |
| 排序 Ordering | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 |

**表6 6个仙客来品系耐热性综合评价排序表**

**Table 6** Comprehensive evaluation and ranking table of heat tolerance of six *C. persicum* cultivar

| 品系 Lines | 叶片厚度/μm Leaf thickness | 栅栏组织厚度/μm Palisade tissue | 栅海比 Calculated palisade−to−spongy ratio | 叶面积/μm Leaf area | 叶片结构疏松度 Leaf looseness | 平均隶属度 Average membership | 耐热性排序 Heat resistance sorting |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 哈里奥2015 Halios 2015 | 662.39 | 147.57 | 0.34 | 41.75 | 0.66 | 0.63 | 3 |
| 哈里奥2090 Halios 2090 | 618.69 | 131.89 | 0.30 | 34.79 | 0.70 | 0.13 | 6 |
| 巴黎之吻 Fleur in Vogue | 599.22 | 142.96 | 0.36 | 36.73 | 0.66 | 0.49 | 4 |
| 吉野(紫白) Yoshino | 689.96 | 165.79 | 0.37 | 34.29 | 0.66 | 0.73 | 2 |
| 山脊 Sierra | 615.19 | 154.19 | 0.39 | 44.78 | 0.65 | 0.80 | 1 |
| 腮云 Halios Blush | 585.71 | 121.28 | 0.30 | 44.22 | 0.69 | 0.22 | 5 |

海比的排序与其最终耐热性的排序结果基本相似,表明栅栏组织厚度等3个指标与仙客来的耐热性密切相关。'山脊'的栅栏组织厚度排名靠前,且海绵组织厚度排名靠后,最终耐热性排名第1,栅栏组织厚度大,海绵组织厚度小,其对高温的抗性就越强,这与山茶[14]、月季[21]等植物的研究结果类似,叶片栅栏组织厚度越厚,其耐热性则越高,海绵组织厚度则相反。其主要原因在于栅栏组织厚

度是反映植物对水、肥、光照等吸收利用效率高低的指标之一,栅栏组织越厚,植物吸收和利用养分的效率越高,新陈代谢速度越快,其耐热能力乃至对逆境的适应性也就越好;而海绵组织厚度与植物在低温、弱光环境下或者是湿生等环境的耐受能力相关,海绵组织越厚,植物耐热能力越差[22]。植物在遭受高温环境时,为了适应环境、减缓高温的伤害,栅栏组织会变厚,同时海绵组织变薄[23]。6个仙客来品系的耐热性排序跟叶面积、叶宽、叶长的排序差异较大,无明显的相关性,与周志雄[12]、刘慧斌等[23]研究结果不同,可能是与仙客来自身的物种特性相关。

植物的耐热性受多方面因素的影响,需要进行综合评判[24]。而对多个品种、品系或种的植物进行聚类分析,并利用隶属函数从多个指标中筛选出典型指标进行综合评判,是当前研究评价植物抗逆性的主流方法之一[25]。6个仙客来品系13项叶片结构指标中,'山脊'和'吉野(紫白)'有近一半的指标从大到小排名第1,'腮云'和'哈里奥2090'一半以上指标均排名靠后,表明'山脊'和'吉野(紫白)'可能耐热性较强,而'腮云'和'哈里奥2090'较差。为了对各品系耐热性进行综合分析,将13类指标分为5类并从中选出每一类的经典指标,分别是叶片厚度、栅海比、栅栏组织厚度、叶面积和组织疏松度,这也与高山油茶[21]、铁线莲[14]等的耐热性综合评价研究中筛选出来的指标相似。综合评价的结果为:'山脊'>'吉野(紫白)'>'哈里奥2015'>'巴黎之吻'>'腮云'>'哈里奥2090',与栅栏组织厚度、筛管直径、栅海比的排序结果相似。

本研究从叶片形态与解剖结构等方面综合评价了仙客来的耐热性,可为筛选、培育耐热仙客来新品种提供理论依据和评价筛选方法,也可为球根花卉耐热机制研究提供形态学资料。但是植物耐热机制是多方面因素综合调控的,后续还应调查生理生化指标,以及从基因、代谢物等分子水平进行更深入的研究,进一步揭示仙客来的耐热机制。

## 4　结论

本研究发现,不同品系仙客来的叶片结构存在一定差异,耐热性强弱也有所不同。通过聚类分析和相关性分析,将13类指标分为5类并确定每一类中的典型指标,分别是叶片厚度、栅海比、栅栏组织厚度、叶面积和叶片结构疏松度。再利用隶属函数进行综合评价,结果表明6个仙客来品系耐热性从高到低依次为:'山脊'>'吉野(紫白)'>'哈里奥2015'>'巴黎之吻'>'腮云'>'哈里奥2090'。

## 参　考　文　献


[1]张小会,程琳.温度对仙客来生理生化指标及生长特性的影响[J].湖北农业科学,2022,61(11):97-100,106.
Zhang X H, Cheng L. The influence of temperature on the physiological and biochemical indexes and growth characteristics of *Cyclamen*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(11): 97-100, 106.

[2]Marshall J, Whitlock K, Colburn C, et al. First report of Anthracnose caused by *Colletotrichum theobromicola* on *Cyclamen persicum* in South *Carolina*, USA[J]. Plant Disease, 2023.

[3]赵志新,林艳,郭伟珍. 地中海仙客来叶纹变异及其基因控制模式[J]. 中国农学通报,2015,31(10):124-128.
Zhao Z X, Lin Y, Guo W Z. Leaf veins variation and gene control mode of *Cyclamen hederifolium* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(10): 124-128.

[4]河北省气象局.河北省2024年度十大天气气候事件[EB/OL].(2025-01-02)[2024-04-15]. http://he.cma.gov.cn/xwdt/gzdt/202501/t20250107_6777013.html.
Hebei Meteorological service. Top Ten Weather and Climate Events in Hebei Province in 2024 [EB/OL]. (2025-01-02) [2024-04-15]. http://he.cma.gov.cn/xwdt/gzdt/202501/t20250107_6777013.html.

[5]岑湘涛,沈伟,牛俊乐,等.基于植物叶片解剖结构的抗逆性评价研究进展[J].北方园艺,2021(18):140-147.
Cen X T, Shen W, Niu J L, et al. Research progress of stress resistance evaluation based on the anatomy of plant leaves[J]. Northern Horticulture, 2021(18): 140-147.

[6]Arruda T F L, Lima G S, Silva A A R D, et al. Salicylic acid as a salt stress mitigator on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth of precocious-dwarf cashew in the post-grafting phase [J]. Plants, 2023, 12(15): 2783.

[7]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.

[8]Strashok O. Comparative analysis of heat resistance of ornamental urban plants in kyiv [J]. Journal of Ecological Engineering, 2022, 23(3):145-153.

[9]位杰,张琦,林彩霞,等.不同梨品种(系)叶片解剖结构及其与抗寒性的关系[J].河南农业科学,2021,50(8):103-112.
Wei J, Zhang Q, Lin C X, et al. Relationship between cold

tolerance and leaf structure of different pear varieties (strains) [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(8): 103-112.

[10]郭文文, 卓么草, 韩嘉华, 等. 色季拉山杜鹃花属植物叶片解剖结构特征与抗逆性评价[J]. 河南农业科学, 2024, 53(6): 111-119.
Guo W W, Zhuo M C, Han J H, et al. Anatomical structure and stress resistance evaluation of leaves of *Rhododendron* L. in the shergyla mountain [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(6): 111-119.

[11]黄淦, 李美婷, 赵艳莉, 等. 不同切花菊品种的高温生理响应及耐热性综合评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2024, 56(1):92-103.
Huang G, Li M T, Zhao Y L, et al. Comprehensive evaluation of high temperature physiological response and heat tolerance of different cut *Chrysanthemum* cultivars[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2024, 56(1): 92-103.

[12]周志雄, 王龙远, 郭微, 等.7种秋海棠属植物叶片解剖结构分析与耐热性评价[J]. 广东农业科学, 2023, 50(9):173-180.
Zhou Z X, Wang L Y, Guo W, et al. Analysis on leaf anatomy of 7 *Begonia* species and evaluation on their heat tolerance[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(9): 173-180.

[13]喇燕菲, 邓建智, 覃耿敏, 等. 6个铁线莲品种叶片解剖结构与植株耐热性的比较[J]. 分子植物育种, 2024, 22(16): 5424-5433.
La Y F, Deng J Z, Qin G M, et al. Comparison of leaf anatomy and plant heat tolerance in six *Clematis* cultivars[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(16): 5424-5433.

[14]陈子銮, 苏丹萍, 贺涛, 等. 山茶属6种植物叶片解剖结构的耐热性分析[J]. 亚热带植物科学, 2022, 51(4): 256-263.
Chen Z L, Su D P, He T, et al. Heat resistance analysis of six species of *Camellia* based on leaf anatomy [J]. Subtropical Plant Science, 2022, 51(4): 256 - 263.

[15]贾志国, 张丽, 肖建忠, 等. 仙客来品种间耐热性比较研究[J].北方园艺, 2008(11): 122-124.
Jia Z G, Zhang L, Xiao J Z, et al. Studies on heat tolerance in *Cyclamen* of different cultivars[J]. Northern Horticulture, 2008 (11): 122-124.

[16]Bálint J, Benedek K, Csorba A B. Assessing the effect of plant growth stimulants and retardants on *Cyclamen* "Halios $F_1$ salmon rose" cultivar[J]. Horticulturae, 2024, 10(1): 53.

[17]Pouris. J, Levizou E, Karatassiou M, et al.The influence of the partitioning of sugars, starch, and free proline in various organs of *Cyclamen graecum* on the biology of the species and its resistance to abiotic stressors[J]. Plants, 2022, 11(9):1254.

[18]Sobrado M A. Relationship of water transport to anatomical features in the mangrove *Laguncularia racemosa* grown under contrasting salinities [J]. New Phytologist, 2007, 173(3): 584-591.

[19]孙永江, 王琪, 邵琪雯, 等. 高温胁迫对植物光合作用的影响研究进展[J]. 植物学报, 2023, 58(3): 486-498.
Sun Y J, Wang Q, Shao Q W, et al. Research advances on the effect of high temperature stress on plant photosynthesis [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2023, 58(3): 486-498.

[20]Fang Y J, Xiong L Z. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2015, 72(4): 673-689.

[21]王巧巧. 高温胁迫下不同药剂对藤本月季耐热性的生理影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
Wang Q Q. Physiological effects of different insecticides on heat tolerance of climbing rose under high temperature stress [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.

[22]曾建亮, 邓全恩, 李建安, 等. 6个油茶品种叶片解剖结构与耐寒性的关系[J]. 经济林研究, 2020, 38(1): 117-124.
Zeng J L, Deng Q E, Li J A, et al. Relationship between leaf anatomic structure and cold tolerance in six *Camellia oleifera* cultivars [J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(1): 117-124.

[23]刘慧斌, 朱周俊, 赵君茹, 等. 6个高州油茶无性系叶片形态结构及耐热性比较[J]. 热带作物学报, 2023, 44(4): 737-745.
Liu H B, Zhu Z J, Zhao J R, et al. Comparison of leaf morphological structure and heat tolerance of six *Camellia gauchowensis* Chang clones [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(4): 737-745.

[24]聂文娟, 孟焕文, 程智慧, 等. 自然高温条件下黄瓜耐热性成株期鉴定技术研究[J]. 北方园艺, 2010(20): 22-25.
Nie W J, Meng H W, Cheng Z H, et al. Research on technique of heat tolerance identification in seedling stage of cucumber under natural high temperature [J]. Northern Horticulture, 2010(20): 22-25.

[25]周迎雪, 李沛瞳, 苏江硕, 等.37份菊花近缘种的抗旱性评价[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(6): 1060-1068.
Zhou Y X, Li P T, Su J S, et al. Evaluation of drought resistance in 37 accessions of *Chrysanthemum* related species [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(6): 1060-1068.

(编辑:郭玥微)