

6 个高州油茶无性系叶片形态结构及耐热性比较

刘慧斌^{1,2}, 朱周俊^{1,2}, 赵君茹^{1,2}, 卢元贤³, 吴凯³, 袁德义^{1,2*}

1. 中南林业科技大学经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南长沙 410004; 2. 经济林育种与栽培国家林业局重点实验室, 湖南长沙 410004; 3. 清远市古朕茶油发展有限公司, 广东清远 511500

摘要: 研究高州油茶耐热性的评价指标体系以及筛选出耐热性强的品种, 为耐热性品种的选育和栽培提供理论依据。以 6 个高州油茶无性系为试材, 采用石蜡切片技术、指甲印迹法和图像软件分析, 测量叶片形态、解剖结构和叶片气孔相关的 14 项指标, 运用 SPSS 软件进行聚类分析和相关性分析, 筛选出影响耐热性的主要指标, 运用 Excel 软件分析平均隶属函数, 并进行耐热性综合评价和排序。结果表明: 高州油茶叶片由上下表皮细胞、叶肉组织细胞和主脉组成, 叶片为异面叶, 上表皮厚度大于下表皮厚度, 气孔分布在下表皮, 栅栏组织 1~2 层, 排列紧密, 海绵组织排列疏松, 主脉主要由上下表皮和紧密排列的维管束组成。6 个高州油茶无性系叶片形态和解剖结构均存在显著差异 ($P < 0.05$)。通过系统聚类将 14 项指标划分为 4 类, 即第 1 类包括叶长、叶宽和叶面积; 第 2 类包括叶厚、栅栏组织厚度、叶片结构紧密度和栅海比; 第 3 类包括上表皮厚度、下表皮厚度、叶片结构疏松度、海绵组织厚度和气孔密度; 第 4 类包括主脉厚度和维管束厚度。对 4 类中指标间的相关系数进行分析得出高州油茶耐热性的典型指标, 即叶面积、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和维管束厚度, 对 4 个典型指标运用隶属函数公式计算, 根据平均隶属度的大小进行综合计算和排序, 6 个高州油茶无性系耐热性大小顺序为: A16>A5>HMZ24>A11>HM19>HMZ25。影响高州油茶耐热性的叶片指标主要是叶面积、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和维管束组织厚度, 以某一项的指标进行分析时差异较大, 通过隶属函数法进行综合比较分析, 能够反映出高州油茶的耐热性差异。

关键词: 高州油茶; 叶片; 解剖结构; 耐热性

中图分类号: S794.4 文献标识码: A

Comparison of Leaf Morphological Structure and Heat Tolerance of Six *Camellia gauchowensis* Chang Clones

LIU Huibin^{1,2}, ZHU Zhoujun^{1,2}, ZHAO Junru^{1,2}, LU Yuanxian³, WU Kai³, YUAN Deyi^{1,2*}

1. Key Laboratory of Economic Forest Cultivation and Protection, Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Key Laboratory of Economic Forest Breeding and Cultivation State Forestry Administration, Changsha, Hunan 410004, China; 3. Qingyuan Guzhen Tea Oil Development Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500, China

Abstract: The evaluation index system of heat resistance of *Camellia gauchowensis* Chang was studied to screen out varieties with strong heat resistance, and to provide theoretical basis for the breeding and cultivation of heat resistant varieties. Using six *Camellia gauchowensis* Chang clones as the test materials, 14 leaf morpholog, anatomical structure and leaf stoma related indexes were measured by image software analysis, paraffin section and nail polish blotting methods. Cluster analysis and correlation analysis were performed by SPSS software to screen out the main indicators related to heat resistance. The average membership function was calculated by EXCEL software for comprehensive evaluation of heat resistance and ranking. The leaves of *C. gauchowensis* Chang were composed of upper and lower epidermal cells, mesophyll tissue cells and leaf midribs. The leaf was ectopic leaves, the thickness of the upper epidermis

收稿日期 2022-05-10; 修回日期 2022-07-08

基金项目 湖南省林业种苗专项 (No. 2021-5)。

作者简介 刘慧斌 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 经济林育种与栽培。*通信作者 (Corresponding author): 袁德义 (YUAN Deyi), E-mail: yuan-deyi@163.com。

was greater than that of the lower epidermis, the stomata was distributed in the lower epidermis, the palisade tissue was closely arranged 1–2 layers, and the spongy tissue was loosely arranged. leaf midribs were mainly composed of upper and lower epidermis and closely arranged vascular bundles. There were significant differences in leaf morphology and anatomical structure among the six clones ($P < 0.05$). The 14 indicators were divided into four categories by systematic clustering. Leaf length, leaf width and leaf area were in the first category, leaf thickness, palisade tissue thickness, leaf structure compactness and palisade-sea ratio were in the second category, thickness of the upper epidermis, the thickness of the lower epidermis, leaf structure porosity, spongy tissue thickness and stomatal density were in the third category, and thickness of the leaf midrib and the thickness of the vascular bundle were in fourth category. Leaf area, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness and vascular bundle thickness were found to be the typical indicators of heat resistance of *C. gauchowensis* Chang by correlation coefficients analysis. The membership function formula was used to calculate the four typical indicators, and the comprehensive calculation and sorting were carried out according to the average membership degree. The heat resistance ranking of the six *C. gauchowensis* Chang clones was A16>A5>HMZ24>A11>HM19>HMZ25. The leaf indicators affecting the heat resistance of *C. gauchowensis* Chang are mainly leaf area, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness and vascular bundle tissue thickness. There is a big difference in the analysis of a certain index, and the comprehensive comparative analysis through the membership function method can reflect the difference in heat resistance of *Camellia gauchowensis* Chang.

Keywords: *Camellia gauchowensis* Chang; leaf; anatomical structure; heat resistance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.010

高州油茶 (*Camellia gauchowensis* Chang) 属山茶科 (Theaceae)、山茶属 (*Camellia*) 常绿乔木。具有树形高大、寿命长、果实大、单株产量高、出油率高等优点, 主要分布在我国广东大部分地区和海南等地区^[1-2]。油茶的正常生长发育需要适宜温度和充足的水分, 温度过低或者过高都会影响果实生长。近年来全球气候变暖, 温度持续升高, 当温度高过植物承受的范围, 植物就会受害, 产量就会降低, 因此研究油茶耐热性, 选育出耐热性较强的树种相当重要。

目前有关耐热性的研究主要集中在生理生化的水平上, 研究高温胁迫条件下的相对电导率、叶绿素含量、丙二醛含量和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性等变化, 反映植物的耐热性强弱^[3-4]。植物的生理生化指标在短期内环境的变化较为明显, 而植物的形态结构是长期特定环境下形成的, 也可以作为研究耐热性的参考指标^[5]。叶片是植物进行光合作用、呼吸作用和蒸腾的重要器官, 叶片表皮是直接和外界接触的组织, 对高温变化较为敏感, 叶片表皮结构的变化也能反映植物对环境的适应能力, 叶片是研究耐热性的主要器官^[6]。目前, 有关叶片解剖结构与植物耐热性的研究在砵根^[3]、洋水仙^[4]、珙桐^[7]、猕猴桃^[8]、杜鹃花^[9]、报春^[10]等植物上已有报道。而有关对油茶叶片解剖结构与耐热性关系的研究较少, 仅陈萍等^[11]在海南油茶开展了相关研究。有关高州油茶叶片解剖结构与其耐热性关系的研究未见报道。本研究

以 6 个高州油茶无性系为试材, 观察比较不同高州油茶无性系叶片形态、解剖结构和气孔的相关指标, 运用相关性分析和隶属函数法对其耐热性进行综合评价, 为高州油茶耐热品种的选育、引种栽培等提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

试验于 2020 年 9 月在广东省清远市古朕茶油发展有限公司高州油茶资源圃进行, 实验材料为 6 个高州油茶无性系, 编号分别为 HM19、HMZ25、HMZ24、A11、A5 和 A16。

1.2 方法

1.2.1 叶片形态测量 随机挑选 30 片叶片, 利用图像扫描仪对所选叶片进行扫描, 采用 Image-Pro-plus 软件测量叶片的长度、宽度和叶片面积。

1.2.2 叶片解剖结构测定 采用石蜡切片法进行叶片横切面解剖结构制作: 取出经卡诺固定液固定后的叶片, 经酒精脱水、二甲苯透明、石蜡包埋制成切片 (厚度 8 μm)、番红固绿染色、封片, 于光学显微镜下观察、拍照。

采用 Image-Pro-plus 软件测量其叶片厚度 (leaf thickness, LT)、上表皮厚度 (upper epidermis thickness, TU)、下表皮厚度 (lower epidermis thickness, TL)、栅栏组织厚度 (thickness of palisade tissue, TP)、海绵组织厚度 (thickness of

spongy tissue, TS)、主脉厚度(thickness of main vein, TMV)、木质部厚度(xylem thickness, XT)、韧皮部厚度(phloem thickness, PT)和维管束厚度(vascular bundle thickness, VB)。计算栅海比(palisade tissue-spongy tissue ratio, P/S)、叶片紧实度(tightness of tissue structure, TST)、叶片疏松度(looseness of tissue structure, TSL)及变异系数(coefficient of variation, CV)。其中, 栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度; 叶片组织紧实度=栅栏组织厚度/叶片厚度; 叶片结构疏松度=海绵组织厚度/叶片厚度。

1.2.3 气孔观察 采用指甲油印记法制片, 在显微镜及其成像系统下观察、拍照^[12]。采用Image-Pro-plus软件测量气孔密度(stomatal density, SD)和气孔长度(stomatal length, SL)。

1.3 数据处理

使用Microsoft Excel 2010软件进行原始数据的整理和简单的分析, 采用SPSS 25.0软件对数据进行相关性分析和系统聚类分析。相关指数公式^[13-14]为:

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

式中, R_i^2 为每类中各项指标的相关指数; n 为每类中的指标个数($i=1,2,3,\dots,n$); r 为每类中各项指标与同类其他指标的相关系数, 指标的相关指数越大, 典型性越强^[7]。运用隶属函数进行叶片耐热性评价分析。隶属函数公式为:

$$F(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{指标与耐热性呈正相关}) \quad (2)$$

$$F(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{指标与耐热性呈负相关}) \quad (3)$$

式中, $F(X_i)$ 为某一种群某一项耐热指标的隶属函数值; X_i 为该项耐热指标观测值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为6个高州油茶无性系该项耐热指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 叶片形态特征

6个高州油茶无性系的叶长、叶宽、叶面积均存在显著差异($P<0.05$, 表1)。叶长在6.73~9.16 cm之间, 平均为8.17 cm, A11最长, A5最短; 叶宽在3.40~4.50 cm之间, 平均为3.86 cm, HMZ25叶片最宽, A5叶片最窄; 叶面积变化范围为16.58~26.71 cm², 其中HMZ25叶面积最大, A5

叶面积最小。A5的叶长、叶宽、叶面积均为最小。

表1 6个高州油茶无性系叶片形态大小

Tab. 1 Leaf size of six <i>C. gauchowensis</i> Chang clones				
无性系 Clone	叶长 LL/cm	叶宽 LW/cm	叶面积 LA/cm ²	叶型指数 LSI
HM19	8.45±0.65 ^b	3.63±0.40 ^d	22.57±3.70 ^{bc}	2.34±0.19 ^a
HMZ25	7.83±0.64 ^c	4.50±0.40 ^a	26.71±5.19 ^a	1.75±0.18 ^c
HMZ24	8.30±0.65 ^b	3.72±0.30 ^{cd}	21.82±3.22 ^c	2.23±0.1 ^b
A11	9.16±0.67 ^a	3.83±0.45 ^c	24.32±6.13 ^b	2.42±0.26 ^a
A5	6.73±0.51 ^d	3.40±0.30 ^c	16.58±2.61 ^d	1.99±0.12 ^d
A16	8.52±0.72 ^b	4.10±0.31 ^b	24.79±3.23 ^{ab}	2.08±0.20 ^c
最大值	9.16	4.50	26.71	2.42
最小值	6.73	3.40	16.58	1.75
均值	8.17±0.98	3.86±0.50	22.80±5.24	2.14±0.29
<i>F</i>	49.08	33.79	20.85	52.63
变异系数	0.12	0.13	0.23	0.14

注: 同列不同小写字母表示无性系间差异显著($P<0.05$)。

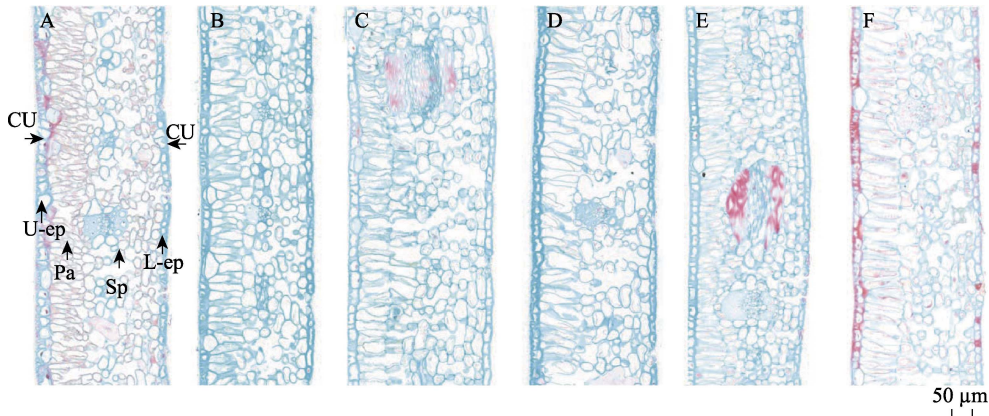
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among clones ($P<0.05$).

2.2 叶片解剖结构特征

2.2.1 叶表皮和气孔 高州油茶叶片结构由上表皮细胞、栅栏组织、海绵组织和下表皮细胞组成(图1)。油茶叶片为异面叶, 上表皮和下表皮均由一层长形、圆形、椭圆形细胞紧密排列组成, 且上表皮厚度均大于下表皮。气孔位于下表皮, 气孔为椭圆形或者扁圆形(图2)。

6个高州油茶无性系上表皮最厚为HM19, 厚度35.11 μm, 下表皮最厚为HM19, 厚度21.61 μm; 上下表皮最薄为A5, 分别为23.13、13.85 μm。油茶气孔分布在下表皮, 6个高州油茶无性系叶片气孔密度在126.75~183.09个/mm²范围内, 气孔长度为24.61~30.33 μm。气孔密度最大为HMZ25, 最小为A16。气孔长度最长为A16, 最短为HMZ24(表2)。

2.2.2 叶肉组织结构 6个高州油茶无性系的栅栏组织和海绵组织形态有明显差异(图1)。其中HMZ24和A5的栅栏组织由两层细胞组成, HMZ24两层栅栏组织长度相近, 排列疏松, A5上层栅栏组织要长于下层, 上层排列紧密, 紧挨海绵组织的下层栅栏组织排列疏松。HM19、HMZ25、A11、A16只有一层栅栏组织, HM19栅栏层细胞细长且排列较紧密, HMZ25、A11、A16栅栏层细胞短粗且排列疏松。海绵组织排列疏松, 细胞大小和形状明显不同。

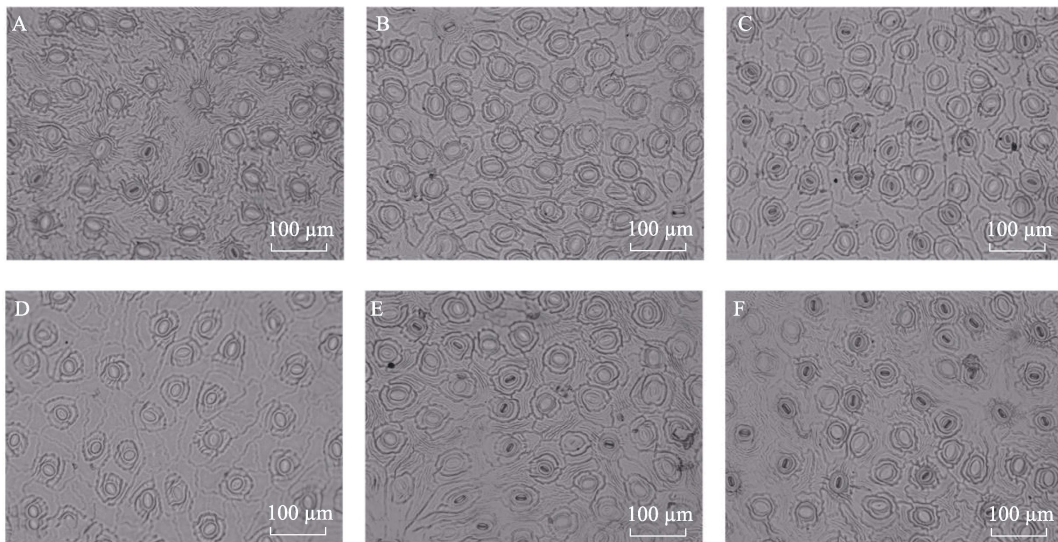


A: HM19; B: HMZ25; C: HMZ24; D: A11; E: A5; F: A16. Cu: 角质层; U-ep: 上表皮细胞; Pa: 栅栏组织细胞; Sp: 海绵组织细胞; L-ep: 下表皮细胞。

A: HM19; B: HMZ25; C: HMZ24; D: A11; E: A5; F: A16. Cu: Cuticle; U-ep: Upper epidermis cells; Pa: Palisade tissue; Sp: Spongy tissue; L-ep: Lower epidermis cells.

图 1 6 个高州油茶无性系叶片横切

Fig. 1 Leaf cross section of six *C. gauchowensis* Chang clones



A: HM19; B: HMZ25; C: HMZ24; D: A11; E: A5; F: A16.

图 2 6 个高州油茶无性系叶片下表皮气孔显微结构

Fig. 2 Microstructure of stomata in leaves of six *C. gauchowensis* Chang clones

表 2 叶表皮解剖结构和气孔特征

Tab. 2 Anatomical structure and stomatal characteristics of epidermis of leaves

无性系 Clone	叶片厚度 LT/ μm	上表皮厚度 TU/ μm	下表皮厚度 TL/ μm	气孔密度 SD/ mm^2	气孔长度 SL/ μm
HM19	330.28 \pm 6.52 ^b	35.11 \pm 3.53 ^a	21.61 \pm 2.64 ^a	152.79 \pm 5.19 ^b	29.78 \pm 2.66 ^a
HMZ25	294.90 \pm 7.76 ^d	24.20 \pm 2.26 ^c	19.94 \pm 2.62 ^b	183.09 \pm 7.47 ^a	27.25 \pm 2.86 ^b
HMZ24	354.95 \pm 8.92 ^a	28.46 \pm 3.59 ^b	20.47 \pm 2.18 ^{ab}	182.16 \pm 12.34 ^a	24.61 \pm 2.72 ^c
A11	307.81 \pm 11.01 ^c	24.22 \pm 3.32 ^c	16.89 \pm 2.37 ^d	138.43 \pm 17.63 ^c	25.84 \pm 1.02 ^c
A5	305.26 \pm 11.41 ^c	23.13 \pm 2.82 ^c	13.85 \pm 2.32 ^c	131.34 \pm 16.92 ^c	27.84 \pm 1.88 ^b
A16	330.93 \pm 13.98 ^b	23.31 \pm 2.12 ^c	18.37 \pm 2.83 ^c	126.75 \pm 11.27 ^c	30.33 \pm 1.76 ^a
均值	320.31 \pm 22.72	26.36 \pm 5.19	18.39 \pm 3.63	27.61 \pm 3.34	151.33 \pm 26.57
F	138.38	68.56	40.06	30.67	20.14
变异系数	0.07	0.20	0.20	0.12	0.18

注: 同列数据后不同小写字母表示无性系间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference between clones ($P < 0.05$).

高州油茶的叶肉解剖结构存在显著性差异 (表 3)。6 个高州油茶无性系的栅栏组织厚度在 82.43~137.41 μm 范围内, 其中最大为 HMZ24, 最小为 HMZ25。海绵组织厚度变化范围在 153.63~183.47 μm 之间, 厚度最大为 HM19, 最小为 A16。

海绵组织厚度均明显高于栅栏组织厚度, 栅海比均小于 1, 在 0.49~0.90 之间, 最大为 A16, 最小为 HM19。叶片结构紧实度范围在 0.27~0.41 之间, 最大为 A16, 最小为 HM19。叶片疏松度范围在 0.46~0.58 之间, 最大为 HMZ25, 最小为 A16。

表 3 6 个高州油茶无性系叶肉组织特征
Tab. 3 Mesophyll tissue characteristics of six *C. gauchowensis* Chang clones

无性系 Clone	栅栏组织厚度 TP/μm	海绵组织厚度 TS/μm	叶片结构紧实度 TST	叶片结构疏松度 TSL	栅海比 P/S
HM19	88.71±6.51 ^d	183.47±9.32 ^a	0.27±0.02 ^e	0.56±0.03 ^b	0.49±0.05 ^e
HMZ25	82.43±7.08 ^e	170.89±10.53 ^b	0.28±0.03 ^e	0.58±0.03 ^a	0.49±0.07 ^e
HMZ24	137.41±10.66 ^a	171.65±14.17 ^b	0.39±0.03 ^b	0.48±0.03 ^d	0.81±0.12 ^b
A11	101.09±12.37 ^c	166.48±15.51 ^{bc}	0.33±0.04 ^d	0.54±0.04 ^{bc}	0.62±0.11 ^d
A5	109.70±15.37 ^b	160.20±21.24 ^{cd}	0.36±0.05 ^c	0.52±0.06 ^c	0.70±0.16 ^c
A16	136.48±9.83 ^a	153.63±16.86 ^d	0.41±0.04 ^a	0.46±0.04 ^d	0.90±0.15 ^a
均值	109.08±23.61	167.78±17.66	0.34±0.06	0.53±0.06	0.67±0.19
F	127.50	12.43	69.63	34.41	57.20
变异系数	0.22	0.11	0.19	0.10	0.29

注：同列数据后不同小写字母表示无性系间差异显著 (P<0.05)。

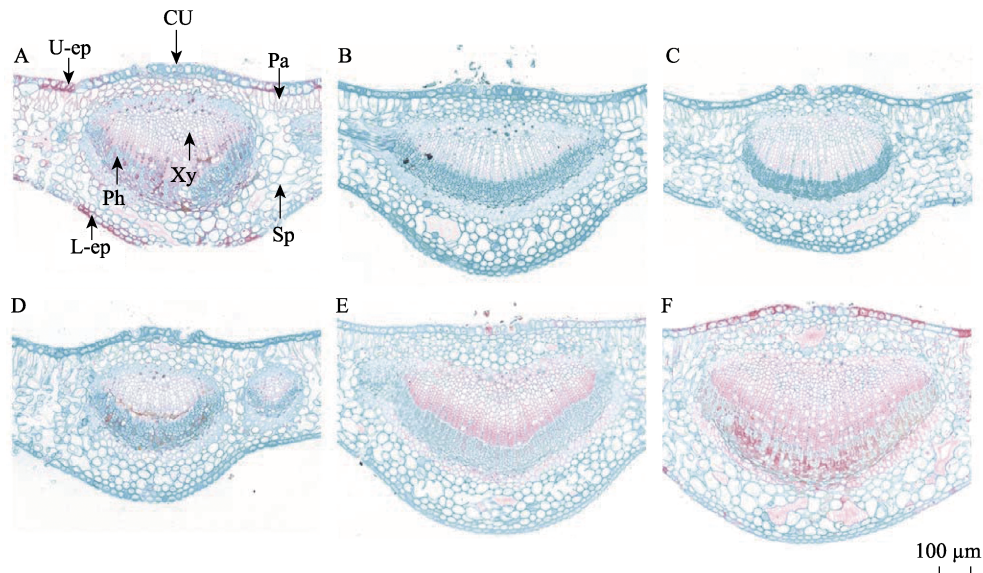
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference between clones (P<0.05).

2.2.3 主脉组织结构 主脉主要由上下两层表皮细胞、排列紧密的厚角组织、半月形辐射状排列的木质部、韧皮部组成 (图 3)。对 6 个高州油茶无性系主脉组织结构进行比较发现, 主脉厚度、木质部厚度、韧皮部厚度、维管束厚度均达到显著差异水平 (表 4)。6 个油茶无性系主脉厚度在

566.23~821.28 μm 范围内, 最大为 A16, 最小为 HMZ24。维管束厚度在 262.12~403.07 μm 范围内, 最大为 A16, 最小为 A11。

2.3 6 个高州油茶无性系耐热性综合评价

2.3.1 筛选高州油茶耐热性指标 高州油茶的叶片指标在品系间达到显著性差异, 选出具有代表



A: HM19; B: HMZ25; C: HMZ24; D: A11; E: A5; F: A16。Cu: 角质层; 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; Xy: 木质部; Ph: 韧皮部。

A: HM19; B: HMZ25; C: HMZ24; D: A11; E: A5; F: A16。Cu: Cuticle; U-ep: Upper epidermis cells; Pa: Palisade tissue; Sp: Spongy tissue; L-ep: Lower epidermis cells; Xy: Xylem; Ph: Phloem.

图 3 6 个高州油茶无性系叶片主脉横切面

Fig. 3 Cross section of main veins of leaves of six *C. gauchowensis* Chang clones

表 4 6 个高州油茶无性系叶片主脉特征

Tab. 4 Main vein characteristics of leaves of six *Camellia gauchowensis* Chang clones

无性系 Clone	主脉厚度 TMV/ μm	木质部厚度 XT/ μm	韧皮部厚度 PT/ μm	维管束厚度 VB/ μm
HM19	634.59 \pm 13.57 ^c	235.15 \pm 22.55 ^e	104.19 \pm 18.28 ^b	339.35 \pm 35.48 ^b
HMZ25	633.34 \pm 19.20 ^c	191.66 \pm 17.58 ^e	81.55 \pm 7.75 ^d	273.20 \pm 17.54 ^c
HMZ24	566.23 \pm 19.67 ^d	210.46 \pm 16.45 ^d	61.22 \pm 6.00 ^e	271.68 \pm 16.27 ^e
A11	574.85 \pm 19.97 ^d	175.65 \pm 13.72 ^f	86.48 \pm 6.31 ^d	262.12 \pm 13.44 ^c
A5	689.72 \pm 15.59 ^b	249.21 \pm 20.38 ^b	97.71 \pm 7.78 ^c	346.93 \pm 23.48 ^b
A16	821.28 \pm 36.31 ^a	289.72 \pm 13.45 ^a	113.36 \pm 5.11 ^a	403.07 \pm 14.45 ^a
均值	669.43 \pm 95.52	232.59 \pm 43.03	92.52 \pm 19.34	325.11 \pm 57.38
F	337.04	108.51	80.97	142.45
变异系数	0.14	0.19	0.21	0.18

注：同列不同小写字母表示无性系间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among clones ($P < 0.05$).

性的指标来代表耐热性。首先对 6 个高州油茶无性系叶片形态和解剖结构的 14 项指标运用 SPSS 软件进行聚类分析, 14 项指标可以分为 4 类: 第 1 类包括叶长、叶宽、叶面积; 第 2 类包括叶厚、栅栏组织厚度、叶片结构紧实度、栅海比; 第 3 类包括上表皮厚度、下表皮厚度、叶片结构疏松度、海绵组织厚度、气孔密度; 第 4 类包括主脉厚度和维管束厚度 (图 4)。运用 SPSS 软件对 14

项指标进行相关性分析, 获得相关系数矩阵 (表 5)。指标间的相关系数反映了各指标间的相关性。根据聚类分析结果和相关矩阵, 按照公式 (1) 计算 4 类中各指标的相关指数, 然后根据相关指数大小对其进行排序 (表 6)。4 类指标中的典型指标分别为: 第 1 类为叶面积; 第 2 类为栅栏组织厚度; 第 3 类为海绵组织厚度; 第 4 类为维管束厚度 (表 6)。

2.3.2 6 个高州油茶无性系耐热性综合评价 根据表 6 筛选出的耐热性密切相关的 4 项指标 (叶面积、栅栏组织厚度、海绵组织厚、维管束厚度),

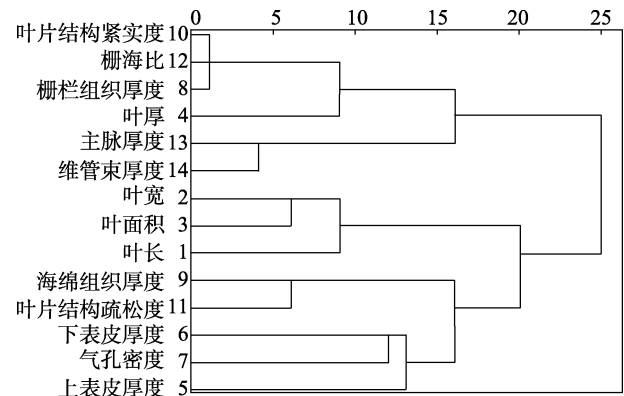


图 4 14 项叶片解剖结构特征的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of 14 leaf anatomical structure characteristics

表 5 叶片结构指标的相关矩阵

Tab. 5 Correlative matrix of leaf structure indexes

指标 Index	叶长 LL	叶宽 LW	叶面积 LA	叶厚 厚度 LT	上表皮 厚度 TU	下表皮 厚度 TL	栅栏组 织厚度 TP	海绵组 织厚度 TS	紧实度 TST	疏松度 TSL	栅海比 P/S	主脉 厚度 MVT	维管束 厚度 TB	气孔密 度 SD
叶长	1													
叶宽	0.364**	1												
叶面积	0.522**	0.648**	1											
叶厚	0.232**	-0.188*	-0.056	1										
上表皮厚度	0.165*	-0.199**	-0.021	0.365**	1									
下表皮厚度	0.299**	0.201**	0.273**	0.363**	0.500**	1								
栅栏组织厚度	0.081	-0.119	-0.086	0.574**	-0.187*	-0.093	1							
海绵组织厚度	0.046	-0.083	0.033	0.271**	0.318**	0.303**	-0.479**	1						
紧实度	0.012	-0.078	-0.094	0.299**	-0.349**	-0.259**	0.947**	-0.687**	1					
疏松度	-0.092	0.080	0.082	-0.374**	0.062	0.074	-0.849**	0.776**	-0.865**	1				
栅海比	0.035	-0.066	-0.087	0.326**	-0.260**	-0.189*	0.932**	-0.747**	0.974**	-0.940**	1			
主脉厚度	-0.105	0.096	0.003	-0.045	-0.297**	-0.139	0.363**	-0.437**	0.443**	-0.422**	0.472**	1		
维管束厚度	-0.116	0.009	-0.078	0.095	-0.157	-0.166	0.327**	-0.310**	0.372**	-0.369**	0.395**	0.870**	1	
气孔密度	-0.073	0.141	0.077	-0.070	0.428**	0.433**	-0.226	0.217	-0.298*	0.256	-0.276	-0.535**	-0.555**	1

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

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

表 6 各类指标相关指数及排序

指标编号 Index No.	叶片解剖结构指标 Leaf anatomic structure index	相关指数 Correlation index	类中排序 Order in category
1	叶长	0.202	3
	叶宽	0.276	2
	叶面积	0.346	1
2	叶厚	0.175	4
	栅栏组织厚度	0.698	1
	叶片紧实度	0.645	2
	栅海比	0.641	3
3	上表皮厚度	0.135	3
	下表皮厚度	0.134	4
	海绵组织厚度	0.211	1
	气孔密度	0.121	5
	叶片结构疏松度	0.169	2
4	主脉厚度	0.757	1
	维管束厚度	0.757	1

应用隶属函数法,运用公式(2)、(3),求出平均隶属函数值,对6个油茶无性系的耐热性进行综合评价。隶属函数值越大,耐热性越强。结果表明6个高州油茶无性系的平均隶属值在0.125~0.793之间,其中A16平均隶属值最高,为0.793, HMZ25平均隶属度最低,为0.125。6个油茶无性系耐热性强弱依次为:A16>A5>HMZ24>A11>HMZ19>HM25(表7)。

表 7 6 个高州油茶无性系耐热性综合评价

Tab. 7 Comprehensive evaluation of heat tolerance of six *C. gauchowensis* Chang clones

无性系 Clone	栅栏组 织厚度 TP	海绵组 织厚度 TS	维管束 厚度 TB	叶面积 LA	平均隶属度	排序 Order
					Average value of membership function	
HM19	0.114	0.000	0.548	0.410	0.268	5
HMZ25	0.000	0.422	0.079	0.000	0.125	6
HMZ24	1.000	0.396	0.068	0.483	0.487	3
A11	0.340	0.569	0.000	0.235	0.419	4
A5	0.496	0.780	0.602	1.000	0.720	2
A16	0.983	1.000	1.000	0.189	0.793	1

3 讨论

温室效应导致气候变暖,温度升高会使植物产生热害,直接影响植物的外部形态和植物体内活性酶以及渗透调节物质^[15],植物的光合作用也会受到影响^[16]。植物叶片是直接感受外界环境变

化最大的器官,对外界环境的变化较为敏感,是植物进化过程中可塑性最大的器官,其结构特征能够在一定程度上体现植物本身对所在环境的适应性变化,长期的高温对植物叶片造成外部形态以及内部结构发生变化^[17]。

不同无性系的高州油茶的栅栏组织厚度、维管束厚度、海绵组织和叶面积与耐热性的排序基本一致,油茶耐热性与栅栏组织厚度、维管束厚度呈正相关,与海绵组织厚度和叶面积呈负相关。栅栏组织厚度大小顺序为:A16>A5>A11>HMZ25,海绵组织厚度大小顺序为:HMZ25>A11>A5>A16,栅栏组织厚度较大,海绵组织厚度较小,耐热性较强,与前人结果^[7,9,18]相似,栅栏组织可以增强植株在光合作用中对水分和光能的利用效率,减少叶表面水分蒸发^[19]。海绵组织厚度主要反映植物对弱光环境或中生、湿生环境的适应,这些环境往往温度较低、植株耐热性较弱^[20]。在植物感受到外界高温胁迫时,为了适应环境而增加栅栏组织厚度,减少海绵组织厚度,使海绵组织细胞结构变疏松。叶脉维管束是植物叶片主要的输导组织,为叶片提供无机养分和水分,并往地下部分输送光合产物,并具有保水、贮水功能各器官^[21-22]。叶脉维管束组织厚度越大,养分和水分的利用效率越高,植物体的生命力越旺盛,其抗逆性越强^[23-24]。主脉厚度和维管束厚度能增强植物的耐热性,本研究中维管束厚度大小顺序为:A16>A5>HM19>HMZ25,与耐热性顺序基本一致。叶片面积最大为HMZ25,耐热性较差,叶面积最小为A5,耐热性较强,表明叶片的面积大小与耐热性呈负相关性^[25]。在6个高州油茶无性系中,耐热性最强的A16维管束厚度最大,海绵组织厚度最小,耐热性最差的HMZ25栅栏组织厚度最小,叶面积最大,A5叶面积最小,HM19海绵组织厚度最大,维管束厚度最小为A11。

单一指标不能准确评定耐热性,平均隶属函数法通过整合平均具有代表性的耐热性指标来综合评价,减少单方面指标带来的误差,是一种常用的综合性评价方法^[26-28]。本研究通过系统聚类、相关性分析与隶属函数分析法,将14项指标分为4类,再从4类中通过相关指数,选出典型的耐热性指标,通过隶属函数法进行综合性评定。叶片的4项叶片解剖结构指标(叶面积、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、维管束厚度)可以作为高州油茶的耐热性的评定指标,研究结果表明:6

个高州油茶无性系耐热性顺序为：A16>A5>HMZ24>A11>HMZ19>HM25。

参考文献

- [1] 朱雯, 许逸林, 徐佳琦, 戚嘉敏, 奚如春. 高州油茶优树果实性状评价[J]. 福建林业科技, 2016, 43(4): 43-48.
ZHU W, XU Y L, XU J Q, QI J M, XI R C. Analysis and assessment on the characters of fruits from plus tree of *Camellia gauchowensis*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2016, 43(4): 43-48. (in Chinese)
- [2] 曾武, 刘喻娟, 黎建伟, 张应中, 蔡坚. 高州市油茶现状及发展对策[J]. 广东林业科技, 2012, 28(5): 79-81.
ZENG W, LIU Y J, LI J W, ZHANG Y Z, CAI J. The present situation and development strategy of *Camellia gauchowensis* in Gaozhou[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2012, 28(5): 79-81. (in Chinese)
- [3] 李月婷. 3个砧根品种对高温胁迫的生理生化响应及耐热性综合评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.
LI Y T. The physiological and biochemical responses of 3 *Heuchera micrantha* cultivars to high temperature stress and comprehensive evaluation of heat resistance[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [4] 卞阿娜, 吕燕玲, 潘东明. 洋水仙的耐热性生理指标研究初探[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2016, 29(3): 70-75.
BIAN A N, LYU Y L, PAN D M. Preliminary study on heat resistant physiological indexes of *Daffodils*[J]. Journal of Minnan Normal University (Natural Science), 2016, 29(3): 70-75. (in Chinese)
- [5] 容丽, 陈训, 汪小春. 百里杜鹃杜鹃属13种植物叶片解剖结构的生态适应性[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1084-1088.
RONG L, CHEN X, WANG X C. Leaf anatomical characters and its ecological adaptation of 13 species of *Rhododendron* in Baili Azalea area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(3): 1084-1088. (in Chinese)
- [6] 曾惠敏, 赵冰. 28个八仙花品种叶片解剖结构与植株耐旱性的关系[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 10-19.
ZENG H M, ZHAO B. Relationship between leaf anatomical structure and drought tolerance of 28 *Hydrangea* cultivars[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(1): 10-19. (in Chinese)
- [7] 张腾驹, 陈小红, 刘静, 康喜坤. 四川省不同天然种群珙桐叶片解剖结构与其耐热性的关系[J]. 植物研究, 2019, 39(2): 208-221.
ZHANG T J, CHEN X H, LIU J, KANG X K. Relationship between anatomical structures and heat resistance of *Davidia involucrata* natural populations in Sichuan province[J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(2): 208-221. (in Chinese)
- [8] 彭永宏, 章文才. 猕猴桃叶片耐热性指标研究[J]. 武汉植物学研究, 1995(1): 70-74.
PENG Y H, ZANG W C. Studies on the resistance indices of kiwifruit leaves[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1995(1): 70-74. (in Chinese)
- [9] 申惠翡, 赵冰, 徐静静. 15个杜鹃花品种叶片解剖结构与植株耐热性的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3895-3904.
SHEN H F, ZHAO B, XU J J. Relationship between leaf anatomical structure and heat resistance of 15 *Rhododendron* cultivars[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3895-3904. (in Chinese)
- [10] 胡伟娟, 张启翔, 潘会堂, 董玲玲. 报春叶片解剖结构与耐热性的关系[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(3): 363-368.
HU W J, ZHANG Q X, PAN H T, DONG L L. Relationship between leaf anatomical structure and heat resistance of *Primula*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(3): 363-368. (in Chinese)
- [11] 陈萍, 王笃雄, 罗健, 张健, 叶天文, 袁德义. 海南油茶叶片解剖结构与耐热性比较[J]. 热带林业, 2020, 48(3): 4-10.
CHEN P, WANG D X, LUO J, ZHANG J, YE T W, YUAN D Y. The comparison between leaf anatomic structure and heat resistance of *Camellia hainanica*[J]. Tropical Forestry, 2020, 48(3): 4-10. (in Chinese)
- [12] 楼柏丹, 姚岚. 几种观察植物表皮气孔方法的比较[J]. 生物学教学, 2015, 40(9): 42-43.
LOU B D, YAO L. Comparison of several methods for observing stomata of plant epidermis[J]. Teaching Biology, 2015, 40(9): 42-43. (in Chinese)
- [13] 凌瑞, 戴中武, 代晓雨, 吴春梅, 翟俊文, 郑泽新, 吴沙沙. 8个绣球品种耐热性综合评价与耐热指标筛选[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2209-2218.
LING R, DAI Z W, DAI X Y, WU C M, ZHAI J W, ZHENG Z X, WU S S. Evaluation of heat tolerance and screening the index for the assessment of heat tolerance in cultivars of *Hydrangea*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2209-2218. (in Chinese)
- [14] 汤佳乐, 卜范文, 张平, 林文力, 吴念庆, 徐海. 7种猕猴桃种质耐热性综合评价[J]. 湖南农业科学, 2018, 399(12): 21-25.
TANG J L, BU F W, ZHANG P, LIN W L, WU N Q, XU H. Comprehensive evaluation of 7 kiwifruit germplasm to heat resistance[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018, 399(12): 21-25. (in Chinese)
- [15] 陈培琴, 郁松林, 詹妍妮, 康喜亮. 植物在高温胁迫下的

- 生理研究进展[J]. 中国农学通报, 2006(5): 223-227.
- CHEN P Q, YU S L, ZHAN Y N, KANG X L. A review on plant heat stress physiology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006(5): 223-227. (in Chinese)
- [16] 汪炳良, 徐敏, 史庆华, 曹家树. 高温胁迫对早熟花椰菜叶片抗氧化系统和叶绿素及其荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2004(8): 1245-1250.
- WANG B L, XU M, SHI Q H, CAO J S. Effects of high temperature stress on antioxidant systems, chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameters in early *Cauliflower* leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004(8): 1245-1250. (in Chinese)
- [17] 贾思振. 夏菊耐热性综合评价及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- JIA S Z. The study on comprehensive evaluation of heat-tolerance and heat-tolerant mechanism in summer *Chrysanthemum*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [18] 梁雯, 赵冰, 黄文梅. 热锻炼对高温胁迫下2个杜鹃花品种耐热性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(9): 24-30.
- LIANG W, ZHAO B, HUANG W M. Effects of heat acclimation on heat resistance of two *Rhododendron* cultivars[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(9): 24-30. (in Chinese)
- [19] 吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 李艳锋, 赵红霞, 王媛. 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6033-6043.
- LYU J H, WANG X, FENG Y M, LI Y F, ZHAO H X, WANG Y. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6033-6043. (in Chinese)
- [20] 曾建亮, 邓全恩, 李建安, 程军勇, 邓先珍, 姜德志. 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, CHENG J Y, DENG X Z, JIANG D Z. Relationship between leaf anatomic structure and cold tolerance in six *Camellia oleifera* cultivars[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(1): 117-124. (in Chinese)
- [21] 王怡. 三种抗旱植物叶片解剖结构的对比观察[J]. 四川林业科技, 2003(1): 64-67.
- WANG Y. Contrasts and observations of dissecting structures of three drought-resistant plant leaf slices[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2003(1): 64-67. (in Chinese)
- [22] 邢全, 石雷, 刘保东, 崔洪霞, 张金政. 枇杷叶莖莲叶片解剖结构及其生态学意义[J]. 园艺学报, 2004(4): 526-528.
- XING Q, SHI L, LIU B D, CUI H X, ZHANG J Z. Morphological and anatomical characters of leaf in *Viburnum rhytidophyllum* and its ecological significance[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004(4): 526-528. (in Chinese)
- [23] WEI L C, WEN J Y, HSIAO-FENG L O, DER-MING Y E H. Physiology, anatomy, and cell membrane thermostability selection of leafy radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis* Pers.) with different tolerance under heat stress[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 179: 367-375.
- [24] 王涛, 田雪瑶, 谢寅峰, 张往祥. 植物耐热性研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2013, 28(5): 719-726.
- WANG T, TIAN X Y, XIE Y F, ZHANG W X. Research advance on heat-stress tolerance in plants[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2013, 28(5): 719-726. (in Chinese)
- [25] 郑文俊. 六种菊属植物的耐热性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004.
- ZHENG W J. Studies on the heat resistance of six *Dendranthema* Mums[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [26] 宋洪元, 雷建军, 李成琼. 植物热胁迫反应及耐热性鉴定与评价[J]. 中国蔬菜, 1998(1): 50-52.
- SONG H Y, LEI J J, LI C Q. Identification and evaluation of plant thermal stress response and heat resistance[J]. Chinese Vegetables, 1998(1): 50-52. (in Chinese)
- [27] 聂文娟, 孟焕文, 程智慧, 王明钦. 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, 227(20): 22-25.
- NIE W J, MENG H W, CHENG Z H, WANG M Q. Research on technique of heat tolerance identification in seedling stage of cucumber under natural high temperature[J]. Northern Horticulture, 2010, 227(20): 22-25. (in Chinese)
- [28] 郭燕, 张树航, 李颖, 张馨方, 王广鹏. 中国板栗238份品种(系)叶片形态、解剖结构及其抗旱性评价[J]. 园艺学报, 2020, 47(6): 1033-1046.
- GUO Y, ZHANG S H, LI Y, ZHANG X F, WANG G P. Evaluation of leaf morphology, anatomy and drought resistance of 238 species (lines) of *Chestnut* in China[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(6): 1033-1046. (in Chinese)