

不同文心兰品种耐热性指标筛选与评价体系构建

罗小燕^{1,2}, 罗远华³, 易双双^{1,2}, 李崇晖^{1,2}, 廖 易^{1,2}, 张志群¹, 郑碧兰¹,
陆顺教^{1,2*}

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101; 2. 农业农村部华南作物基因资源与种质创制重点开放实验室, 海南海口 571101; 3. 福建省农业科学院作物研究所, 福建福州 350000

摘 要: 为比较不同文心兰品种耐热性差异, 同时构建文心兰品种耐热性筛选的指标评价体系, 本研究对 38 个文心兰 (*Oncidium hybridum*) 常见栽培品种的叶片厚度、叶片含水量和高温半致死温度 (HLT₅₀) 等 7 个指标进行了测定, 并在高温胁迫条件下对不同品种的黄叶率和热害等级 (HIG) 进行观测, 通过分析不同指标间的相关性, 结合主成分分析筛选文心兰耐热性评价指标, 构建文心兰品种耐热性评价体系。结果表明: 38 个文心兰品种的耐热性存在显著差异; 叶片厚度、叶片含水量、HLT₅₀、黄叶率和 HIG 能较好地反映文心兰对高温胁迫的响应, 可作为文心兰耐热性的评价指标。基于耐热指数进行聚类分析, 可将 38 个文心兰品种分为耐热型品种 (12 个)、中等耐热型品种 (3 个) 和不耐热型品种 (23 个) 3 个类别。本研究结果为热区文心兰选材提供参考依据, 同时也为文心兰高耐热新品种的培育提供亲本资源。

关键词: 文心兰; 栽培品种; 耐热性; 聚类分析; 耐热评价体系

中图分类号: S682.31 文献标志码: A

Heat Tolerance Indexes Screening of Different *Oncidium* Cultivars and Construction of the Evaluation System

LUO Xiaoyan^{1,2}, LUO Yuanhua³, YI Shuangshuang^{1,2}, LI Chonghui^{1,2}, LIAO Yi^{1,2}, ZHANG Zhiqun¹,
ZHENG Bilan¹, LU Shunjiao^{1,2*}

1. Institute of Tropical Crops Genetic Resources, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Key and Open Laboratory of Crop Genetic Resources and Germplasm Creation in South China, Ministry of Agriculture & Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Crop Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350000, China

Abstract: This study was conducted to compare the difference of heat tolerance of different *Oncidium* cultivars, and to establish a system for evaluating identification indexes of *Oncidium* heat tolerance. Seven indexes, including the leaf thickness, leaf water content and high temperature semi-lethal temperature (HLT₅₀), of 38 common *O. hybridum* cultivars were measured, and the yellow leaf rate and heat injury grade (HIG) of different cultivars were observed under high temperature stress. The evaluation indexes of heat tolerance of *Oncidium* were screened by analyzing the correlation among different indexes and combining with principal component analysis, to establish the evaluation system of heat resistance of *Oncidium* cultivars. The results showed that the leaf thickness, leaf water content, HLT₅₀, yellow leaf rate and HIG could well reflect the response of *Oncidium* to high temperature stress, which could be taken as the index for evaluating *Oncidium* heat tolerance. The 38 cultivars could be classified into three categories: heat-tolerant cultivars (12 cultivars), moderate heat-tolerant cultivars (3 cultivars) and non-heat-tolerant cultivars (23 cultivars) by cluster analysis based on heat-tolerant index. The results of this study could provide a reference for material selection of *Oncidium* in hot area, and also provide parental resource for the breeding of *Oncidium* with high heat tolerance.

收稿日期 2023-08-01; 修回日期 2023-09-05

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2022XDNY155); 福建省农业科学院对外合作项目 (No. DWHZ202209)。

作者简介 罗小燕 (1980—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 热带花卉抗逆性精准评价及遗传育种。*通信作者 (Corresponding author): 陆顺教 (LU Shunjiao), E-mail: lushunjiao2014@163.com。

Keywords: *Oncidium hybridum*; cultivars; heat tolerance; cluster analysis; heat tolerance evaluation system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.07.006

文心兰群 (*Oncidium Alliance*) 约含 40 个属, 包括文心兰 (*Oncidium*)、宫文心兰 (*Oncidesa*)、蜡唇兰 (*Aspasia*)、蜘蛛兰 (*Brassia*)、蜗瘤兰 (*Cochlioda*)、凹唇兰 (*Camparettia*) 等, 多为附生, 也有岩生和陆生, 广泛分布于墨西哥南部、加勒比海地区、佛罗里达南部的部分地区以及南美洲^[1]。广义的文心兰 (*Oncidium*) 包括了文心兰属、其近缘属以及它们的属间杂交属植物。在商业生产中, 文心兰又名吉祥兰, 其独特的花型具有很高的观赏价值, 是全球最受欢迎的热带兰花之一, 主要以盆花和切花为主。我国文心兰产业从 2006 年开始引种, 现在福建、贵州、广东、海南等地都已形成一定规模的文心兰产业链。但是, 随着全球气候变暖, 夏季持续高温严重影响文心兰的生长, 导致其数量和质量均不稳定, 除生产成本大大提高之外, 其花卉品质和资源保存也受到极大的影响^[2]。

热带兰多分布于低纬度的热带、亚热带地区, 具有明显的气生根, 适宜生长的温度范围为 20~30 °C, 喜温但并不耐热, 高于 35 °C 时将出现滞育^[3-4]。高温会使兰花出现叶片变黄、萎蔫下垂、假鳞茎皱缩、局部溃烂等现象, 严重影响其生长发育和营养积累, 继而导致开花品质下降^[5-8]。目前针对热带兰在热胁迫过程中生理变化及其分子响应机制等方面已有诸多报道^[5, 8-12], 如杨华庚等^[13]比较了不同耐热性品种蝴蝶兰幼苗对高温胁迫的生理反应, 并分析了外源茉莉酸甲酯、钙和水杨酸对其耐热性的影响; 肖文芳等^[14]对不同蝴蝶兰品种耐热性进行比较测定并开展了综合评价。

热胁迫的不利影响可以通过利用各种遗传方法开发具有提高耐热性的作物来缓解^[15]。然而, 当前针对文心兰耐热性方面的研究较少, 仅有少量有关高温胁迫下文心兰部分生理指标变化的报道^[5, 7], 尚缺乏系统的耐热性筛选及评价方法。因此, 对文心兰栽培品种开展耐热性评价并建立文心兰耐热性评价体系是当前助力文心兰产业发展迫切需要开展的工作。本研究以 38 个文心兰栽培品种为材料, 分析文心兰耐热性与不同指标之间的相关性, 并对 38 个文心兰栽培品种的耐热性进行综合评价, 为文心兰生产筛选

优良品种提供依据和方法, 为文心兰高耐热新品种的培育提供亲本资源。

1 材料与方法

1.1 材料

38 个供试文心兰品种中, 20 份来自中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所热带花卉研究中心 (表 1, 材料来源编号 1), 另 18 份来自海南省文心兰生物技术有限公司 (表 1, 材料来源编号 2)。选取健康无病虫害的一年生成熟苗 (有花茎优先), 每个品种 25 株。

1.2 方法

1.2.1 形态指标和生理指标测定 选取正常生长、健康无病虫害的一年生成熟苗, 每个品种 20 株, 用于株高、冠幅、叶片厚度、叶面积、叶片水分含量、假鳞茎体积等指标的测定, 其中株高和冠幅用直尺测定; 叶片厚度用游标卡尺测定; 叶面积利用叶面积仪测定; 叶片含水量采用烘干法测定; 假鳞茎大小采取浸水法测定, 即取 500 mL 量筒, 装入适量清水, 记下水位刻度 (V_1), 将假鳞茎剪下, 完全浸入水中, 记下这时水位刻度 (V_2), 假鳞茎的体积即为 $V=V_2-V_1$ 。

1.2.2 高温半致死温度测定 试验前将材料统一放置在人工气候室内进行适应性栽培 7 d, 每个品种 10 株, 将气候箱的光照强度控制在 240 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 光周期为 14 h/10 h (昼/夜), 温度控制在 28 °C/22 °C (昼/夜), 相对湿度 80%。统一浇水, 保持各盆土壤湿度基本一致。于第 8 天上午 9:00 左右, 采集顶部展开的嫩叶片, 迅速保存于自封袋, 用去离子水洗净擦干后, 剪成 0.5 cm^2 的碎片, 混匀后称取 0.2 g 置于装有 20 mL 去离子水的试管中, 分别在 25、35、40、45、50、55、60、65、70 °C 条件下水浴 20 min, 取出后室温静置 2 h 左右, 确保冷却至室温后用导电仪测定电导率 (C_t), 然后沸水浴 15 min, 取出静置冷却至室温后测定电导率 (C_m)。以 25 °C 下叶片的电导率为对照 (C_{ck}), 每个温度处理重复 3 次。根据公式求细胞伤害率: $y=(C_t-C_{ck})/(C_m-C_{ck})\times 100\%$ ^[16]。采用 Logistic 方程进行拟合计算, 方程的表达式为: $y=k/(1+ae^{-bt})$, 其中 y 为细胞伤害率, t 为不同的处理温度, k 为细胞伤害率的饱和

表 1 38 个文心兰栽培品种学名及来源
Tab. 1 Scientific names and sources of the 38 *Oncidium* cultivated cultivars

序号 No.	品种名 Cultivar	学名 Scientific name	材料来源 Source
1	糖心兰	<i>Oncidium Zelenkocidium</i> Kukoo	1
2	白梦香	<i>Oncidium</i> Twinkle (Fragrance Fantasy)	1
3	粉香水	<i>Oncidium</i> Jairak Fragrance (pink)	1
4	小樱桃	<i>Oncidium</i> Red M	1
5	紫薇	<i>Aliceara</i> Tahitian Dancer	1
6	小蜜蜂	<i>Oncidium</i> Flexuosa	1
7	散甘平白	<i>Gomcidumnia</i> Kamphaengsan white	1
8	新骑士	<i>Oncidesa</i> Gower Ramsey‘Sunkist’	1
9	水蜜桃	<i>Oncidesa</i> Sotoanum-barbata	1
10	皇帝	<i>Oncidium</i> Sweet Sugar‘Emperor’	1
11	火山皇后	<i>Oncidium</i> Gower Ramsey‘Volcano Queen’	1
12	巧克力文心	<i>Oncidium</i> Sharry Baby‘Sweet Fragrance’	1
13	天使文心	<i>Oncidium</i> Sweet Sugar‘Angel’	1
14	红樱桃	<i>Oncidium</i> Little Cherry	1
15	红香水	<i>Oncidium</i> Jairak Fragrance (red)	2
16	红孩儿	<i>Oncidium</i> Roseoides	1
17	天香	<i>Oncidium</i> Aka Baby	1
18	香妃	<i>Miltonidium</i> Issaku Nagata ‘Volcano Queen’	2
19	罗曼香	<i>Oncidium</i> Sharry Baby	1
20	未来之星	<i>Oncidium</i> Pacific Nova	1
21	黄金 3 号	<i>Oncidium</i> Gower Ramsey ‘No.3’	2
22	无斑香水	<i>Oncidium</i> Jairak Frangrance	1
23	甜红豆	<i>Oncidium</i> Boso Sweet	1
24	黄梦香	<i>Oncidium</i> Twinkle“yellow Fantasy”	2
25	白雪	<i>Oncidium</i> Tolumnia Snow Dancer	2
26	七彩湖	<i>Oncidesa</i> Hwuluduen Chameleon	2
27	香水美人	<i>Oncidium</i> Katrin Zoch	2
28	柠檬绿	Gower Ramsey ‘Lemon Heart’	2
29	芭蕾舞女	<i>Oncidium</i> Oncsa. Goldiana‘Golden Shower’	2
30	春枫	<i>Burrageara</i> Kilauea‘Hawaii’	2
31	蜘蛛兰	<i>Brassia</i> Verrucos	2
32	白仙女	<i>Dgmra</i> Winter Wonderland‘White Fairy’	2
33	黄莺	<i>Oncidium</i> Flexuosa yellow	2
34	雪莲	<i>Oncidium</i> Gower Ramsey‘White Jade’	2
35	蜜糖	<i>Oncidium</i> Sweet Sugar	2
36	三色香水	<i>Oncidium</i> Sharry Baby‘Tricolor’	2
37	黄猫	<i>Colmanara</i> Wildcat‘Gold Ring’	2
38	ONM4055	<i>Oncidium</i> Aloha Iwanaga	2

容量, 本试验消除了本底干扰 k 为 100%, a 、 b 为方程参数, e 为常数。为了确定 a 、 b 的值, 方程经线性化处理得, $\ln[(1-y)/y]=\ln a-bt$; 设 $y'=\ln[(1-y)/y]$, 则当 $y=50\%$ 时, $y'=1$, $t=\ln a/b$, 即为高温半致死温度 (HLT_{50})。采用直线回归法求得方程参数 a 、 b , 代入公式 $T=\ln a/b$, 得到每个品种的 HLT_{50} 。

1.2.3 高温处理试验 试验前将材料统一放置在人工气候室内进行适应性栽培 7 d, 栽培环境参数同 1.2.2。于第 8 天开始高温胁迫试验, 将人工气候室温度提升至 42℃/38℃ (昼/夜), 高温处理时间为 8:00—20:00, 光照强度和时间及湿度条件均不变。试验过程中为减轻高温引发的干旱胁迫, 每隔 1 d 加一定量的水以补充基质水分。于高温胁迫处理第 2、4、6 天上午 8:00—9:00 统计黄叶率并观察假鳞茎的生长情况, 以确定热害等级。热害等级划分标准为: 1 级, 植株整体长势好, 无明显的伤害特征, 无或仅有极少量叶尖变黄, 黄叶率 $\leq 25\%$, 假鳞茎饱满; 2 级, 植株整体生长较好, 黄叶率在 25%~50%之间, 无焦叶, 假鳞茎正常; 3 级: 植株开始失水萎蔫, 黄叶率在 50%~75%之间, 有少量焦叶, 假鳞茎轻度失水; 4 级: 植株大部分干枯, 黄叶率在 75%~100%之间, 有焦叶, 假鳞茎皱缩; 5 级, 叶片完全焦枯。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Office Excel 2016 软件进行数据整理与图表绘制。在 SPSS 20.0 软件中进行差异显著性检验、双变量相关性分析、主成分分析和系统聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同文心兰栽培品种的指标测定

对 38 个文心兰栽培品种的株高、冠幅、假鳞茎大小、叶片面积、叶片厚度及叶片含水量测定发现, 不同文心兰品种间株高、冠幅、假鳞茎大小、叶片面积、叶片厚度及叶片含水量 (LWC) 差异较大 (表 2)。其中叶片面积差异系数最大, 为 99.98%, 红樱桃品种叶片面积最大, 为 13.60 cm², 七彩湖品种叶片面积最小, 仅为 0.26 cm²; 其次是假鳞茎大小, 变异系数 (CV) 为 65.10%, 巧克力文心品种假鳞茎最大, 为 24.55 cm³, 白梦香品种假鳞茎最小, 仅为 0.63 cm³; 株高、冠幅、叶片厚度的 CV 相差不大, 分别为 25.80%、28.70%、27.80%; 叶片含水量的差异系数最小, 为 10.8%。

表 2 38 个文心兰常见栽培品种指标统计
Tab. 2 Statistics on indexes of 38 *Oncidium* cultivars

序号 No.	株高 Plant height/cm	冠幅 Crown breadth/cm	假鳞茎 Pseudobulb/cm ³	叶片面积 Leaf area/cm ²	叶片厚度 Vane thickness/cm	LWC/%
1	25.93±1.79	29.33±3.79	6.62±4.15	3.43±0.40	0.59±0.06	84.55±1.55
2	18.33±1.04	15.70±2.52	0.63±0.48	1.21±0.37	0.31±0.05	79.24±0.95
3	32.07±3.90	30.50±1.73	18.79±13.5	6.75±0.39	0.48±0.01	53.49±4.30
4	24.73±2.87	16.50±3.91	0.96±0.61	2.18±0.83	0.56±0.05	86.77±4.40
5	35.63±3.39	32.23±8.32	3.90±1.04	3.73±1.21	0.39±0.02	77.45±0.66
6	31.43±1.50	37.67±6.66	7.57±3.56	5.75±1.27	0.52±0.04	74.47±0.65
7	32.60±2.75	26.00±6.08	0.71±0.21	2.71±0.74	0.88±0.04	87.96±2.62
8	44.27±4.46	35.17±5.35	5.03±1.64	6.99±0.80	0.73±0.12	84.52±0.47
9	40.33±4.73	43.7±1.40	6.96±1.89	5.55±0.48	0.46±0.04	78.80±1.55
10	32.00±5.20	30.50±7.00	4.89±3.17	5.35±0.83	0.83±0.09	87.59±2.68
11	40.87±6.57	26.40±8.78	8.07±5.11	5.32±1.26	0.63±0.13	80.38±2.59
12	46.83±4.51	43.14±11.65	24.55±6.70	11.26±1.41	0.58±0.03	80.05±0.18
13	45.33±0.87	47.67±1.01	6.58±0.11	8.40±0.12	0.66±0.01	75.83±0.97
14	40.20±3.61	49.70±4.62	9.18±0.19	13.60±0.08	0.64±0.01	82.30±1.06
15	26.70±3.52	43.33±4.51	16.96±1.97	10.56±2.64	0.48±0.02	62.40±1.71
16	33.33±11.14	36.37±7.39	6.90±2.61	7.23±0.53	0.53±0.04	72.03±4.92
17	29.47±2.12	40.10±1.97	10.48±2.51	5.75±0.79	0.34±0.01	78.54±0.70
18	42.30±6.86	52.47±2.05	8.98±6.76	1.19±0.03	0.36±0.02	79.80±1.52
19	20.83±1.44	32.20±6.69	3.32±0.53	0.26±0.03	0.26±0.01	77.56±2.13
20	41.27±7.95	58.50±1.80	8.92±3.72	1.20±0.29	0.47±0.06	70.23±4.46
21	41.12±1.45	55.63±2.89	11.85±0.26	1.07±0.04	0.63±0.02	84.18±0.72
22	41.12±1.45	55.63±2.89	11.85±0.26	1.07±0.04	0.32±0.02	63.54±3.50
23	34.40±1.01	39.33±3.62	21.20±5.01	0.63±0.09	0.44±0.03	80.53±1.62
24	18.33±3.33	27.33±4.48	2.12±0.37	0.28±0.04	0.34±0.01	60.44±9.83
25	22.50±2.65	24.83±0.58	3.70±0.46	0.40±0.07	0.60±0.02	86.72±1.94
26	24.17±0.76	31.00±5.89	7.75±1.69	0.53±0.06	0.48±0.01	82.91±1.80
27	29.40±4.29	45.67±3.18	8.78±2.20	0.87±0.29	0.34±0.01	78.03±0.88
28	37.33±3.33	34.33±2.75	7.36±2.97	0.70±0.04	0.61±0.03	88.27±0.61
29	35.93±1.97	32.50±3.46	19.23±3.61	4.79±6.60	0.56±0.04	64.98±3.06
30	40.37±7.55	41.13±3.35	11.45±2.57	0.67±0.15	0.44±0.02	81.35±1.50
31	23.67±2.25	30.83±5.03	5.49±1.92	0.44±0.19	0.50±0.04	83.17±2.67
32	35.63±0.81	25.17±8.69	5.29±2.52	0.62±0.21	0.43±0.01	81.30±4.92
33	18.73±3.43	23.50±1.32	5.14±1.98	0.33±0.08	0.37±0.03	71.90±4.66
34	34.67±5.11	33.17±4.19	5.38±0.99	0.44±0.03	0.60±0.02	88.82±0.71
35	24.00±3.04	32.00±3.04	8.52±2.29	0.59±0.14	0.73±0.04	88.74±3.71
36	25.40±1.01	43.67±2.75	7.76±1.09	0.91±0.23	0.44±0.02	72.69±2.96
37	49.03±7.27	47.70±5.51	9.62±2.70	9.31±1.70	0.56±0.03	76.79±4.63
38	32.33±1.53	36.40±3.25	8.98±4.36	7.45±0.88	0.48±0.01	76.12±3.10
平均值	32.96	36.48	8.46	3.67	0.51	78.01
CV/%	25.80	28.70	65.10	99.80	27.80	10.80

2.2 不同文心兰品种在热胁迫条件下热害等级评价

对 38 个文心兰品种进行高温胁迫试验发现，

随着胁迫时间增加，文心兰表现为叶片失水，叶尖变黄，然后整片变黄，焦枯，严重时所有叶片干焦，假鳞茎皱缩，整个植株干枯死亡。依据黄

叶率、焦叶率、假鳞茎及植株整体长势等将 38 个供试文心兰品种在热胁迫过程中的热胁迫伤害情况分成 5 个热害等级（表 3）。在高温胁迫过程中受到 1 级热害的品种 7 个：散甘平白、皇帝、天

表 3 38 个文心兰栽培品种在热胁迫条件下的热害等级
Tab. 3 Heat damage grades of 38 *Oncidium* cultivars under heat stress conditions

序号 No.	黄叶率 Rate of yellow leaves/%			HIG
	2 d	4 d	6 d	
2	57.51±2.67	98.15±4.67	100.00±0.00	5
3	56.53±3.00	97.78±4.67	100.00±0.00	5
14	44.86±2.00	100.00±5.00	100.00±0.00	5
26	34.34±2.00	83.91±4.00	100.00±0.00	5
27	4.34±2.33	90.95±5.00	100.00±0.00	5
33	48.15±2.67	94.21±4.33	100.00±0.00	5
38	0.00±0.00	63.45±2.51	100.00±0.00	5
5	45.15±2.33	90.48±4.33	98.41±4.67	4
9	33.55±1.67	76.54±3.33	87.39±4.00	4
15	36.75±2.00	77.92±3.67	98.19±4.67	4
16	36.06±2.00	87.88±4.33	96.97±4.67	4
17	14.44±1.00	52.22±2.67	75.56±4.33	4
18	10.37±0.67	60.90±1.33	96.67±3.00	4
19	32.22±1.67	73.93±3.67	96.10±4.33	4
20	35.81±2.31	77.23±3.01	88.85±2.35	4
22	31.03±2.00	62.97±3.33	87.28±4.00	4
23	3.33±1.02	17.01±2.13	84.87±2.22	4
24	25.71±1.21	67.55±1.54	90.75±2.12	4
29	56.35±0.12	78.95±1.25	98.72±0.14	4
31	34.17±2.00	80.41±4.00	94.73±4.67	4
32	38.25±2.00	70.51±3.67	94.40±4.33	4
36	38.98±1.56	90.38±2.57	98.76±1.98	4
37	30.61±2.51	68.19±1.24	93.11±2.45	4
1	6.96±0.67	17.81±1.33	51.11±2.67	3
4	4.86±0.67	18.74±1.33	51.89±2.67	3
12	20.70±1.00	56.84±3.00	67.19±3.00	3
6	10.80±1.00	23.50±1.33	34.12±2.00	2
8	4.93±0.67	26.46±1.67	43.80±1.67	2
11	12.80±1.00	33.88±1.67	40.39±2.00	2
30	6.35±0.33	20.81±1.33	49.73±2.67	2
35	5.03±0.67	19.42±1.33	39.98±2.00	2
7	0.00±0.00	0.00±0.00	1.52±0.33	1
10	0.00±0.00	0.00±0.00	4.44±0.33	1
13	0.00±0.00	19.15±1.00	21.62±1.33	1
21	0.00±0.00	0.00±0.00	4.16±1.00	1
25	0.00±0.00	6.95±0.67	14.81±1.33	1
28	3.89±1.00	9.06±1.12	10.34±1.23	1
34	0.00±0.00	2.39±0.33	3.38±0.65	1

使文心、黄金三号、白雪、柠檬绿、雪莲；热害等级为 2 级的品种 5 个：蜜糖、小蜜蜂、新骑士、火山皇后、春枫。这 12 个品种在胁迫至 6 d 时依然生长良好，虽有失水症状，但仅有少数叶片变黄或是干枯，表现出较强的耐热性。而红樱桃、红香水、七彩湖、香水美人、紫薇、白梦香、黄梦香等品种，全株超过 3/4 的叶片干枯、假鳞茎失水皱缩，受热害程度最严重，胁迫至 6 d，植株完全枯死，对高温的耐受性相对较弱。

2.3 不同文心兰品种高温半致死温度测定

对 38 个文心兰品种的叶片进行不同的温度胁迫并测定细胞伤害率发现，随着温度的升高叶片的细胞伤害率先缓慢增加，当温度为 55~60 ℃ 时急剧增加，后又缓慢增加，细胞伤害率随处理温度的升高呈典型的“S”型变化（图 1）。说明这 38 个文心兰品种叶片的细胞伤害率与处理温度的关系用 Logistic 描述是合适的。根据公式计算 38 个文心兰栽培品种的高温半致死温度（ HLT_{50} ）发现，不同文心兰品种间 HLT_{50} 存在明显差异，其范围为 57.1~67.6 ℃，平均 61.9 ℃（表 4）。38 个文心兰品种中， HLT_{50} 在 60 ℃ 以下的品种 8 个；60~65 ℃ 之间的品种 23 个；65 ℃ 以上的品种 7 个。可以看出，耐热性好的品种 HLT_{50} 相对较高，耐热性差的品种 HLT_{50} 相对较低。

2.4 文心兰品种不同测试指标间的相关性分析

将 38 个参试品种的不同指标数据，包括株高、冠幅、假鳞茎、叶片面积、叶片厚度、叶片含水量（LWC）、 HLT_{50} 与高温胁迫试验测出的黄叶率、热害等级（HIG）进行 Pearson 相关性分析（表 5）。结果表明，文心兰的株高与冠幅、假鳞茎、叶片面积之间存在极显著正相关，但与叶片厚度、LWC、HIG 无显著相关性；HIG、黄叶率与叶片厚度、LWC、 HLT_{50} 之间呈极显著负相关，与株高、冠幅、假鳞茎、叶片面积无显著相关性，说明文心兰的耐热性与其株型大小相关性不大，而与叶片厚度、LWC 和 HLT_{50} 密切相关。

2.5 文心兰耐热性评价指标筛选

主成分分析结果表明，前 3 个主成分累计贡献率达 82.198%，特征值均大于 1，因此前 3 个主成分作为 38 个文心兰品种耐热性评价的主要因子。主成分 1 的特征值为 5.273，贡献率为 50.934%，其中，HIG、黄叶率、 HLT_{50} 、叶片厚度、LWC 有较大的载荷量；主成分 2 的特征值为

2.397, 贡献率分别为 21.793%, 其中株高、冠幅、假鳞茎、叶片面积有较大的载荷量; 主成分 3 的特征值为 1.036, 贡献率分别为 9.421%, 其中叶片面积、叶片厚度、冠幅、黄叶率有较大载荷量。

综合相关性分析和主成分分析结果, 选择 3 个主成分中与其他指标存在极显著性且载荷量绝对值最大的指标 (HIG、黄叶率、 HLT_{50} 、叶片厚度和 LWC) 作为文心兰耐热性评价指标。

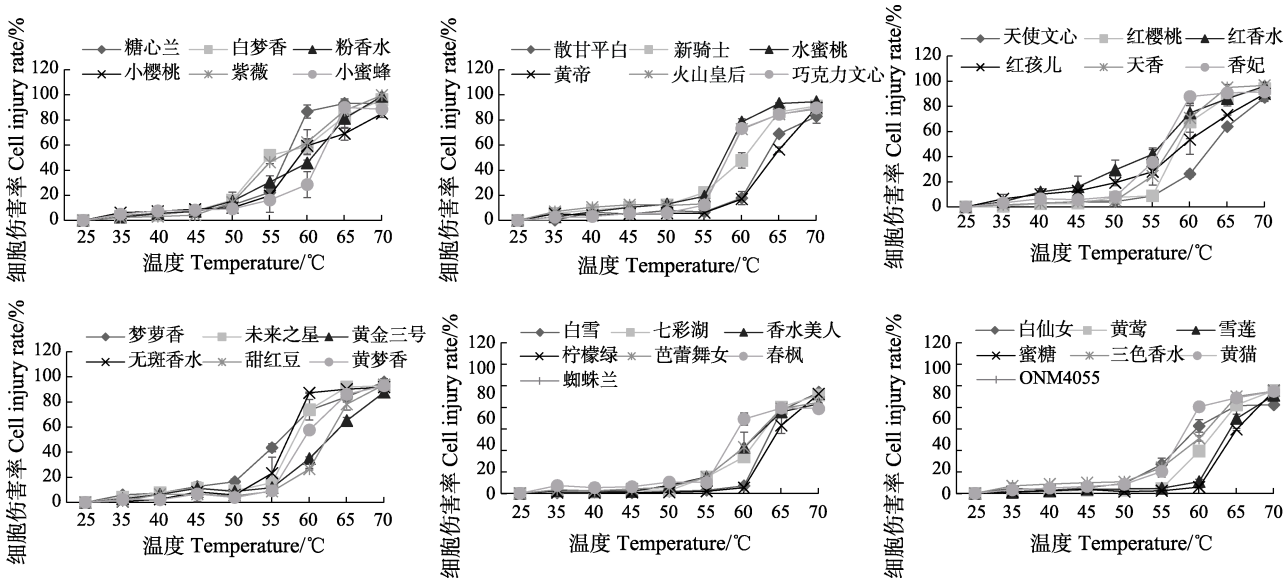


图 1 38 个文心兰栽培品种叶片在不同温度下细胞伤害率折线
Fig. 1 Line chart of cell injury rate in 38 *Oncidium* cultivars

表 4 38 个文心兰栽培品种的 Logistic 方程参数及高温半致死温度
Tab. 4 Parameters of equation and high semi-lethal temperature in 38 *Oncidium* cultivars

序号 No.	细胞伤害率方程 Equation for cellular damage rate	R	$HLT_{50}/^{\circ}\text{C}$	序号 No.	细胞伤害率方程 Equation for cellular damage rate	R	$HLT_{50}/^{\circ}\text{C}$
1	$y=k/(1+156216.79e-0.197t)$	0.935**	60.7	20	$y=k/(1+63449.53e-0.178t)$	0.923**	62.1
2	$y=k/(1+154516.79e-0.187t)$	0.961**	60.5	21	$y=k/(1+1112366.18e-0.217t)$	0.934**	64.2
3	$y=k/(1+328075.81e-0.209t)$	0.939**	60.8	22	$y=k/(1+153430.04e-0.194t)$	0.932**	61.6
4	$y=k/(1+9779.07e-0.136t)$	0.942**	62.6	23	$y=k/(1+166541.53e-0.181t)$	0.920**	60.9
5	$y=k/(1+2931427.31e-0.255t)$	0.948**	58.4	24	$y=k/(1+156842.91e-0.195t)$	0.873**	61.3
6	$y=k/(1+22879.58e-0.152t)$	0.884**	66.0	25	$y=k/(1+4164055.35e-0.234t)$	0.869**	65.1
7	$y=k/(1+40822.96e-0.161t)$	0.852**	65.9	26	$y=k/(1+444631.00e-0.211t)$	0.923**	61.6
8	$y=k/(1+18638.79e-0.153t)$	0.943**	64.3	27	$y=k/(1+424216.83e-0.227t)$	0.947**	57.1
9	$y=k/(1+140645.81e-0.195t)$	0.954**	60.8	28	$y=k/(1+3446948.83e-0.223t)$	0.854**	67.5
10	$y=k/(1+65775.32e-0.169t)$	0.872**	65.6	29	$y=k/(1+82867.65e-0.184t)$	0.917**	61.5
11	$y=k/(1+12951.93e-0.149t)$	0.894**	63.6	30	$y=k/(1+5773.31e-0.143t)$	0.886**	60.6
12	$y=k/(1+161619.49e-0.196t)$	0.923**	61.2	31	$y=k/(1+126753.56e-0.197t)$	0.883**	59.6
13	$y=k/(1+438888.20e-0.206t)$	0.961**	63.1	32	$y=k/(1+22092.64e-0.168t)$	0.933**	59.5
14	$y=k/(1+2649813.98e-0.235t)$	0.961**	62.9	33	$y=k/(1+21062399.61e-0.276t)$	0.876**	61.1
15	$y=k/(1+36062.18e-0.176t)$	0.972**	59.6	34	$y=k/(1+434086.89e-0.192t)$	0.892**	67.6
16	$y=k/(1+2951.30e-0.138t)$	0.962**	57.9	35	$y=k/(1+47906.19e-0.164t)$	0.752*	65.7
17	$y=k/(1+2533215.49e-0.243t)$	0.949**	60.7	36	$y=k/(1+20130.67e-0.167t)$	0.925**	59.3
18	$y=k/(1+187962.92e-0.199t)$	0.939**	61.0	37	$y=k/(1+198590.406e-0.198t)$	0.948**	61.6
19	$y=k/(1+28113.35e-0.169t)$	0.976**	60.6	38	$y=k/(1+71825.87e-0.190t)$	0.906**	58.9

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 5 不同文心兰品种各单项指标的相关系数矩阵
Tab. 5 Correlation matrix of every individual indicator in different *Oncidium* cultivars

指标 Indicator	株高 Plant height	冠幅 Canopy	假鳞茎 Pseudobulb	叶片面积 Leaf area	叶片厚度 Vane thickness	LWC	HLT ₅₀	黄叶率 Rate of yellow leaves	HIG
株高	1								
冠幅	0.636**	1							
假鳞茎	0.404**	0.438**	1						
叶片面积	0.476**	0.292	0.362*	1					
叶片厚度	0.271	-0.107	-0.116	0.292	1				
LWC	0.049	-0.194	-0.391*	-0.178	0.477**	1			
HLT ₅₀	0.066	-0.190	-0.226	-0.118	0.543**	0.437**	1		
黄叶率	-0.178	0.126	0.210	0.089	-0.714**	-0.570**	-0.715**	1	
HIG	-0.239	0.083	0.175	0.091	-0.693**	-0.517**	-0.661**	0.967**	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 ($P<0.01$).

2.6 38 个文心兰栽培品种耐热性综合评价

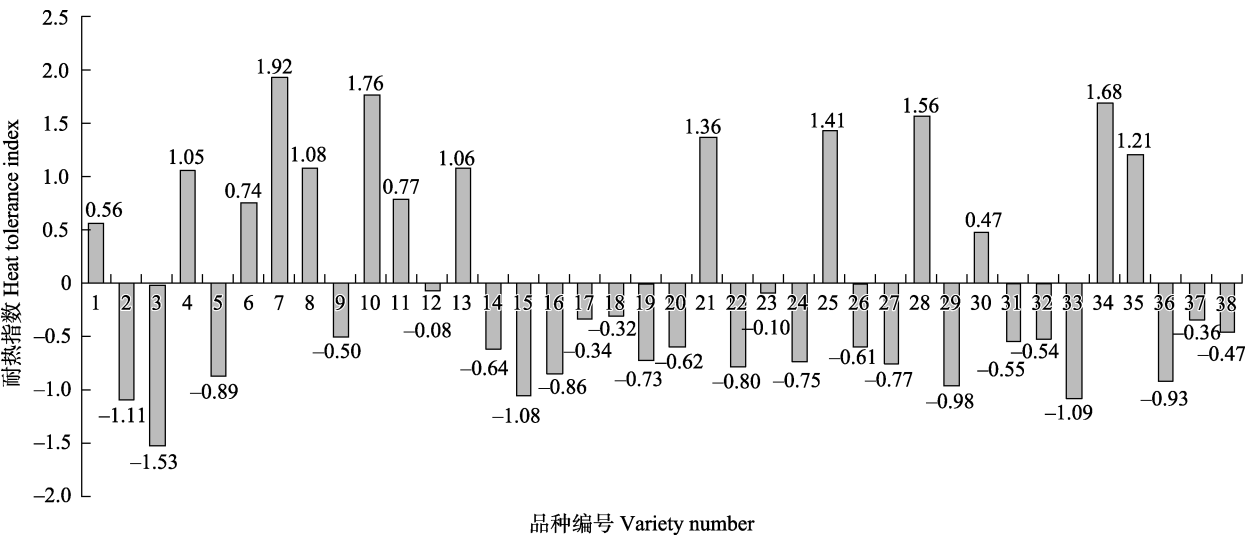
主成分分析中, 主成分 1 的贡献率最大, 且 HIG 与其显著相关的黄叶率、高温半致死温度、叶片厚度和叶片含水量等因子载荷量最大, 说明主成分 1 所涵盖的信息能全面地反映 38 个文心兰品种的耐热性。故选取主成分 1 作为主成分综合模型: $y=0.141\times I_1+0.136\times I_2+0.157\times I_3-0.179\times I_4-0.183\times I_5-0.178\times I_6-0.155\times I_7+0.035\times I_8-0.026\times I_9-0.053\times I_{10}-0.021\times I_{11}$, 式中 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_6 、 I_7 、 I_8 、 I_9 、 I_{10} 、 I_{11} 分别为叶片厚度、LWC、HLT₅₀、2 d 黄叶率、4 d 黄叶率、6 d 黄叶率、HIG、株高、冠幅、假鳞茎、叶面积 11 个指标 (表 6), 计算出不同文心兰品种的耐热指标综合评价, 定义为耐热指数 (D 值), 对文心兰品种耐热性进行综合评价 (图 2)。结果显示, 耐热指数大于 0 的品种 14 个, 包括糖心兰、小樱桃、小蜜蜂、散甘平

白、新骑士、皇帝、火山皇后、天使文心、黄金 3 号、白雪、柠檬绿、春枫、雪莲、蜜糖, 这些品种耐热性相对较高。

基于耐热指数对不同文心兰品种进行聚类分析 (图 3), 结果显示在欧式距离 10 处可将文心兰品种分为 3 类: 耐热型品种、中等耐热型品种和不耐热型品种。其中, 耐热型品种 12 个, 包括柠檬绿、雪莲、黄金 3 号、白雪、散甘平白、皇帝、新骑士、蜜糖、天使文心、火山皇后、小蜜蜂、小樱桃; 中耐热品种 3 个, 为糖心兰、春枫、巧克力文心; 其余 23 个品种为不耐热品种。12 个耐热型品种在欧式距离 5 处又聚为 2 类, 其中 6 个品种柠檬绿、雪莲、黄金 3 号、白雪、散甘平白、皇帝耐热性最好; 其次是另 6 个品种新骑士、蜜糖、天使文心、火山皇后、小樱桃、小蜜蜂。

表 6 各综合指标的特征向量及贡献率
Tab. 6 Eigenvector and proportion of comprehensive indicators

指标 Indicator	主成分 1 PC1		主成分 2 PC2		主成分 3 PC3	
	载荷 Load	系数 Coefficient	载荷 Load	系数 Coefficient	载荷 Load	系数 Coefficient
I_1	0.745	0.141	-0.252	-0.105	-0.489	-0.471
I_2	0.719	0.136	0.205	0.085	0.040	0.039
I_3	0.830	0.157	0.062	0.026	-0.157	-0.151
I_4	-0.816	-0.183	0.084	0.014	-0.336	-0.002
I_5	-0.942	-0.178	0.039	0.039	-0.182	-0.036
I_6	-0.968	-0.155	0.033	0.035	-0.002	-0.324
I_7	-0.937	-0.179	0.092	0.016	-0.037	-0.176
I_8	0.187	0.035	-0.856	-0.357	0.077	0.074
I_9	-0.136	-0.026	-0.765	-0.319	0.456	0.440
I_{10}	-0.278	-0.053	-0.695	-0.29	0.139	0.134
I_{11}	-0.111	-0.021	-0.685	-0.286	-0.625	-0.603
特征值	5.273		2.397		1.036	
贡献率/%	50.934		21.793		9.421	
累计贡献率/%	50.934		72.727		82.148	



图中序号与表 1 中品种对应的序号一致。
The serial number in the figure was consistent with the serial number corresponding to the cultivars in Table 1.

图 2 38 个文心兰栽培品种耐热指数 D 值柱形图

Fig. 2 Bar graph of heat tolerance index D values of 38 *Oncidium* cultivars

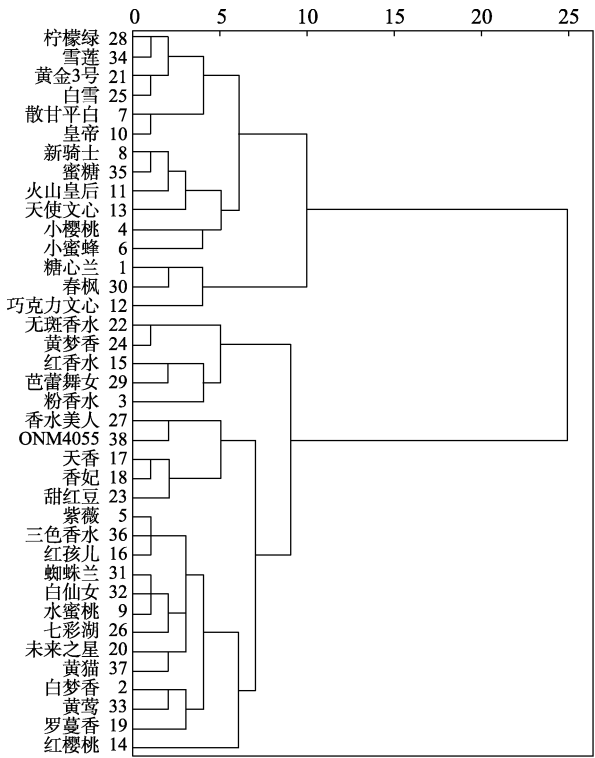


图 3 38 个文心兰品种的耐热性聚类图

Fig. 3 Dendrogram for cluster analysis of heat tolerance in 38 *Oncidium* cultivars

3 讨论

通过人工模拟高温胁迫试验是评价不同文心兰品种耐热性较为常见的方法，但该方法对植物体的损伤不可修复，试验周期长，操作比较复杂，且植株本身的生长状况、苗龄大小、培养基质及

外部环境因素等均会影响试验结果的可靠性。本研究中，文心兰叶片厚度和叶片含水量与耐热性综合指数之间呈极显著相关关系（ $R^2=0.660$ 和 $R^2=0.790$ ），说明叶片厚度和叶片含水量与文心兰的耐热性关系密切，该结论与申惠翡等^[16]在杜鹃品种和陈子奎等^[17]在山茶属植物的研究结果相似，同时在报春花属^[18]、黄瓜^[19]、仙客来^[20]等植物中也有同样的规律。本研究中，42 份文心兰叶片厚度在 0.26~0.88 mm 之间，平均值为 0.51 mm，变异系数 0.11，其中叶片厚度在 0.6 mm 以上的白雪、雪莲、柠檬绿等 11 个文心兰品种均表现为高耐热型，而叶片厚度在 0.4 mm 以下的梦萝香、白梦香、无斑香水等 8 个品种均表现为热敏感型。说明叶片厚度及含水量是文心兰耐热性评价的有效参数，可以用来作为判断品种耐热性的重要指标，特别是叶片厚度可视为文心兰品种最直观的耐热性评价指标。

植物细胞膜的热稳定性与其耐热能力密切相关，通过电导率法结合 Logistic 方程拟合估算 HLT_{50} ，能较为准确地反映植物耐性差异，该方法已被应用于多种植物的耐热性评价与筛选中^[21-25]。本研究测定的 38 个文心兰品种 HLT_{50} 温度范围在 57.1~67.6 °C 之间，与景天科植物相近（ HLT_{50} 为 51.53~66.17 °C）^[21, 26-27]，但明显高于杜鹃品种（ HLT_{50} 为 46.92~53.84 °C）^[28]，鸭茅（*Dactylis glomerata* L.）（ HLT_{50} 为 52.14~53.50 °C）^[29]，这应该与景天科植物与文心兰均原生于热带地区，

而杜鹃和鸭茅主要分布在高海拔或温带地区有关。本研究表明不同文心兰品种间的 HLT_{50} 存在明显差异, 并与热害等级存在极显著相关, HLT_{50} 较高的雪莲、柠檬绿、散甘平白等品种耐热性均较高, 而 HLT_{50} 较低的紫薇、红孩儿、香水美人等品种均表现为高温敏感。因此, HLT_{50} 值的大小能很好反映文心兰品种对高温的耐受性, 可作为文心兰品种耐热性评价的一项有效生理指标。

植物的耐热性属复杂性状, 受多方面因素的影响, 单一的评价指标不能全面、真实地反映不同资源的对高温的耐受性^[30]。本研究通过对 38 个品种进行综合评价, 选出耐热性较好的品种 12 个, 并从中选出耐热性相对最强的品种 6 个(柠檬绿、雪莲、黄金 3 号、白雪、散甘平白、皇帝)。这 6 个品种中, 黄金 3 号、雪莲、柠檬绿, 株型舒展, 花枝长且挺立, 是极好的文心兰切花材料, 散甘平白属于小株型, 可作小盆栽; 皇帝和白雪中等株型, 花枝长为 30~40 cm, 可作盆栽也可作切花。筛选出的高耐热性可为南方热区耐热文心兰品种的培育提供重要基础。

本研究确定了叶片厚度、叶片含水量、 HLT_{50} 、黄叶率和热害等级 5 个文心兰耐热评价指标, 并建立了综合评价模型。通过对 38 个品种进行综合评价, 选出的耐热性相对较好的品种 12 个, 耐热性相对最好的品种 6 个。该结果将为文心兰品种耐热性评价及耐热性品种的培育提供重要基础。

参考文献

- [1] 陈心启, 吉占和. 中国兰花全书[M]. 第 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2003.
CHEN X Q, JI Z H. The Orchids of China[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] SHEN T, CHEN C. Misting cooling technique for protected culture of *Oncidium* orchids in subtropical regions[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(80): 14612-14620.
- [3] 陈翀, 韩玉春. 热带兰室外种植方式及景观营造探讨[J]. 广东园林, 2017, 39(3): 64-68.
CHEN C, HAN Y C. Tropical planting form and outdoor landscape construction[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2017, 39(3): 64-68. (in Chinese)
- [4] 罗小燕, 易双双, 李崇晖, 廖易, 张志群, 陆顺教. 兰花热胁迫响应机制及耐热性研究进展[J]. 分子植物育种, 2023, 21(19): 6406-6412.
LUO X Y, YI S S, LI C H, L Y, ZHANG Z J, LU S J. Research progress of response mechanism to heat stress and heat tolerance in orchid[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(19): 6406-6412. (in Chinese)
- [5] 孔倩倩. 高温胁迫下文心兰对外源水杨酸的生理响应及 *WRKY* 基因的克隆[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
KONG Q Q. Physiological response to exogenous salicylic acid on high temperature stress and cloning of *WRKY* gene in *Oncidium*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [6] 陈秀萍, 贺漫媚, 王伟, 李许文, 郑永晓, 张继方, 代色平. 高温胁迫对 2 种兜兰叶片生理生化指标的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 72-77.
CHEN X P, HE M M, WANG W, LI X W, ZHENG Y X, ZHANG J F, DAI S P. Effects of high temperature stress on physiological and biochemical indexes of two species of *Paphiopedilum*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(28): 72-77. (in Chinese)
- [7] 严冬瑾, 于超, 张启翔, 潘会堂. 高温胁迫对大花蕙兰和墨兰幼苗形态及生理反应的影响[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
YAN D J, YU C, ZHANG Q X, PAN H T. The preliminary research on the morphological and physiological response to heat stress of *Cymbidium hybridum* and *C. sinense* seedlings[M]. Beijing: China Forestry Press, 2011. (in Chinese)
- [8] 罗远华, 王振波, 黄敏玲, 钟淮钦, 林榕燕. 高温胁迫对文心兰顶叶若干生理指标的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(6): 625-629.
LUO Y H, WANG Z B, HUANG M L, ZHONG H Q, LIN R Y. Effect of heat on physiology of apical leaves on *Oncidium* plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2017, 32(6): 625-629. (in Chinese)
- [9] 杨华庚, 杨重法, 陈慧娟, 颜速亮, 陈定光. 蝴蝶兰不同耐热性品种幼苗对高温胁迫的生理反应[J]. 中国农学通报, 2011, 27(2): 144-150.
YANG H G, YANG C F, CHEN H J, YAN S L, CHEN D G. Responses of physiology of *Phalaenopsis* cultivars with different heat tolerance to high temperature stress at seedling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(2): 144-150. (in Chinese)
- [10] 盛况, 高燕会, 斯金平, 朱玉球, 刘京晶. 铁皮石斛 *DoCDPK6* 基因及启动子的克隆与表达分析[J]. 农业生物技术学报, 2017, 25(4): 588-598.
SHENG K, GAO Y H, SI J P, ZHU Y Q, LIU J J. Cloning and expression analysis of *DoCDPK6* and promoter in *Dendrobium officinale*[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2017, 25(4): 588-598. (in Chinese)
- [11] 付亚娟, 侯荟玲, 乔洁, 耿晓进, 王聪艳, 侯晓强. 大花杓兰钙依赖蛋白激酶基因克隆及植物表达载体构建[J]. 植

- 物遗传资源学报, 2019, 20(6): 1613-1620.
- FU Y J, HOU H L, QIAO J, GENG X J, WANG C Y, HOU X Q. Cloning and expressing vector construction of Calcium-Dependent protein kinase gene in *Cypripedium macranthum*[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(6): 1613-1620. (in Chinese)
- [12] 袁秀云, 许申平, 王默霏, 雷志华, 崔波. 蝴蝶兰热激蛋白基因 *PhHsp70* 序列分析及对冷胁迫的响应[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(3): 519-525.
- YUAN X Y, XU S P, WANG M F, LEI Z H, CUI B. The sequence analysis of the *PhHsp70* gene and its response to cold stress in *Phalaenopsis*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(3): 519-525. (in Chinese)
- [13] 杨华庚, 颜速亮, 陈慧娟, 杨重法, 杨福孙, 刘子凡. 高温胁迫下外源茉莉酸甲酯、钙和水杨酸对蝴蝶兰幼苗耐热性的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 150-157.
- YANG H G, YAN S L, CHEN H J, YANG C F, YANG F S, LIU Z F. Effect of exogenous methyl jasmonate, calcium and salicylic acid on the heat tolerance in *Phalaenopsis* seedlings under high temperature stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 150-157. (in Chinese)
- [14] 肖文芳, 李佐, 陈和明, 吕复兵. 不同蝴蝶兰品种耐热性比较测定及综合评价[J]. 热带农业科学, 2018, 38(12): 43-48.
- XIAO W F, LI Z, CHEN H M, LYU F B. Comparative measurement and evaluation of heat tolerance of different *Phalaenopsis* varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(12): 43-48. (in Chinese)
- [15] WAHID A, GELANI S, ASHRAF M. Heat tolerance in plants: an overview[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(3): 199-223.
- [16] 申惠翊, 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)
- [17] 陈子奎, 苏丹萍, 贺涛, 张潮, 陈多颖, 李薇. 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, ZHANG C, CHEN D Y, LI W. Heat resistance analysis of six species of *Camellia* based on leaf anatomy[J]. Subtropical Plant Science, 2022, 51(4): 256-263. (in Chinese)
- [18] 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.
- HE W J, ZHANG Q X, PAN H T, DONG L L. The relationship between leaf anatomy and heat tolerance in *Primula* [J]. Journal of Huazhong Agriculture University, 2010, 29(3): 363-368. (in Chinese)
- [19] 缪旻珉, 张玉华, 蒋亚华, 薛林宝. 黄瓜耐热性与其叶片、根系和花粉性状关系的研究[J]. 扬州大学学报, 2005, 26(2): 83-85.
- MIAO M M, ZHANG Y H, JIANG Y H, XUE L B. The relationship between *Cucumber* heat tolerance and some characters of leaves, roots and pollens[J]. Journal of Yangzhou University, 2005, 26(2): 83-85. (in Chinese)
- [20] 贾志国, 张丽, 肖建忠, 张钢. 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, ZHANG G. Comparative study on heat resistance among *Cyclamen* varieties[J]. Northern Gardening, 2008(11): 122-124. (in Chinese)
- [21] 马进, 汤庚国, 郑钢. 5 种屋顶绿化景天属植物耐热性的测定[J]. 林业科技开发, 2009, 23(3): 36-38.
- MA J, TANG G G, ZHENG G. Mensuration of heat resistance of five *Sedum* spp. Under the condition of green roof [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009, 23(3): 36-38. (in Chinese)
- [22] 龚萍, 王健. 利用电导率法测定六种芳香植物的耐热性[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(10): 2038-2040.
- GONG P, WANG J. Measurement of thermal resistance of six aromatic plants with electrical conductivity method[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(10): 2038-2040. (in Chinese)
- [23] 陈燕, 刘东焕, 陈进勇, 温韦华, 赵世伟. 6 种观果植物的耐热性研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 32-36.
- CHEN Y, LIU D H, CHEN J Y, WEN W H, ZHAO S W. Studies on the thermotolerance in six ornamental fruit plants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(16): 32-36. (in Chinese)
- [24] 袁雪涛, 夏冬, 许永利, 梁冰李, 富平. 应用 Logistic 方程测定四种藤本植物的耐热性[J]. 北方园艺, 2017(14): 99-102.
- YUAN X T, XIA D, XU Y L, LIANG B L, FU P. Study on heat resistance of four species of vines plants by logistic equation[J]. Northern Gardening, 2017(14): 99-102. (in Chinese)
- [25] 张月雅, 刘明磊, 颜小梅, 顾德峰, 郭太君. 4 种蕨类植物耐热性测定[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(3): 313-316.
- ZHANG Y Y, LIU M L, YAN X M, GU D F, GUO T J. Study on heat tolerance of four species of pteridophytes[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2015, 37(3): 313-316. (in Chinese)
- [26] 张燕利, 高捍东, 吴锦华. 4 种景天科植物耐热性测定[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(6): 52-54.

- ZHANG Y L, GAO H D, WU J H. Study on the heat-tolerance of four species in family *Crassulaceae*[J]. Journal of South west Forestry University, 2010, 30(6): 52-54. (in Chinese)
- [27] 张文娟, 李连国, 田东方, 郭金丽, 温玉龙. 应用 Logistic 方程测定景天植物的耐热性[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 46-48.
- ZHANG W J, LI L G, TIAN D F, GUO J L, WEN Y L. Study on heat resistance of five *Sedum* plants by logistic equation[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2013, 34(3): 46-48. (in Chinese)
- [28] 刘婉迪, 王威, 谢倩, 陈清西. 9 个杜鹃品种的高温半致死温度与耐热性评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 105-110, 136.
- LIU W D, WANG W, XIE Q, CHEN Q X. Heat tolerance and high semi-lethal temperature of nine *Rhododendron* cultivars[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 105-110, 136. (in Chinese)
- [29] 蔡化, 张鹤山, 田宏, 熊军波, 陈明新, 刘洋. 5 份野生鸭茅材料高温半致死温度与耐热性研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(24): 6068-6070.
- CAI H, ZHANG H S, TIAN H, XIONG J B, CHEN M X, LIU Y. High temperature LT₅₀ and heat resistance of five wild *Dactylis glomerata*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(24): 6068-6070. (in Chinese)
- [30] 马晓娣, 彭惠茹, 汪矛, 王丽, 孙其信. 作物耐热性的评价[J]. 植物学通报, 2004, 21(4): 411-418.
- MA X D, PENG H R, WANG M, MANG L, SUN Q X. Evaluation of heat tolerance in crop[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2004, 21(4): 411-418. (in Chinese)