

文章编号:1001-7380(2019)04-0021-06

基于光合特性评价 10 个杜鹃花品种的耐热能力

何丽斯¹,李 辉²,刘晓青¹,李 畅¹,陈尚平¹,
肖 政¹,周惠民¹,孙晓波¹,苏家乐^{1*}

(1. 江苏省农业科学院休闲农业研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,江苏 南京 210014;
2. 扬州大学园艺与植物保护学院,江苏 扬州 225009)

摘要:为了探讨不同杜鹃花品种的耐热性差异,以 10 个杜鹃花品种 2 年生扦插苗为材料,对其在人工模拟高温胁迫下叶片的光合特效进行测定,并运用主成分分析法和隶属函数法进行综合评价。结果表明,在高温胁迫下,10 个杜鹃花品种的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等共 6 个光合指标均呈下降趋势,且不同品种的下降幅度不同;利用主成分分析将原来的 P_n , Tr , G_s , C_i , WUE , LUE , CUE , L_s 共 8 个相互关联的光合指标转化为 4 个独立的主成分,其累计贡献率达 94.5937%,由这 4 个主成分的特征向量表达式可知,在第 1 个主成分中, LUE , CUE 占主导作用,在第 2 个主成分中 Tr , G_s 占主导作用,在第 2,4 个主成分中占主导作用的分别是 WUE 和 G_s 。并通过隶属函数及其权重,计算得到综合评价价值(D 值),将 10 个杜鹃花品种按照耐热性的强弱划分为 3 类:‘炮仗红’‘石岩杜鹃’‘胭脂蜜’属于强耐热类型,‘晓霞’‘丰美 1 号’‘嫦娥’‘春樱’属于中等耐热类型,‘紫金粉玉’‘小莺’‘粉红泡泡’属于不耐热类型。

关键词:杜鹃花;耐热性;光合特性;主成分分析;隶属函数法

中图分类号:Q945.11;Q945.78;S685.21 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2019.04.005

Evaluation of heat resistance of azalea based on photosynthetic characteristics

He Lisi¹, Li Hui², Liu Xiaoqing¹, Li Chang¹, Cheng Shangping¹,
Xiao Zheng¹, Zhou Huimin¹, Sun Xiaobo¹, Su Jiale^{1*}

(1. Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Institute of Leisure Agriculture,
Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;
2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to explore the differences in heat resistance of different azaleas, the photosynthetic characteristics of 2-year cuttings of 10 azalea cultivars under artificial high temperature stress were measured, and the principal component analysis and membership function method were used for comprehensive evaluation. The results showed that under high temperature stress, the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and the other there photosynthetic indexes of 10 azalea cultivars all decreased, and the decrease rates were different among different cultivars. Such eight original correlative photosynthetic indicators as the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), water use efficiency (WUE), light use efficiency (LUE), CO_2 use efficiency (CUE) and limiting value of stomata (L_s) could be transformed into four independent principal components by using principal component analysis, with the cumulative contribution rate up to 94.593%. According to the eigenvector expressions of these four principal components, LUE and CUE played a dominant role in the first principal component, Tr and G_s played a

收稿日期:2019-06-02;修回日期:2019-06-21

基金项目:中央财政林业科技推广示范资金项目“杜鹃花良种繁育及其经济林木高效间种技术示范与推广”(苏[2018]TG02);国家青年科学基金项目“生物质炭修复园林退化土壤及促进杜鹃花生长的机理研究”(41807110);江苏省省级林业发展资金“江苏省农科院杜鹃花林木种质资源库”(苏财农[2019]22号)

作者简介:何丽斯(1981-),女,广东中山人,副研究员,博士。主要从事观赏植物栽培及抗逆性研究。E-mail:alicehelisi@foxmail.com。

* **通信作者:**苏家乐(1965-),男,江苏江都人,研究员,硕士。主要从事花卉苗木品种选育及栽培技术研究。Tel:025-84391218;E-mail:sujl66@aliyun.com。

dominant role in the second principal component while WUE and G_s played a dominant role in the third and fourth principal components respectively. Moreover, the comprehensive evaluation value (D value) was calculated by membership function and its weight. According to the above results of the heat resistance, these 10 azalea cultivars were divided into three categories: 'Paozhanghong', 'Shiyandujuan' and 'Yanzhimi' belonged to high heat-tolerance type; 'Xiaoxia', 'Fengmeiyihao', 'Yaofei' and 'Chunying' belonged to medium heat-tolerance type; 'Zijinfenyu', 'Xiaoying' and 'Fenhongpaopao' belonged to poor heat-tolerance type.

Key words: Azalea; Heat tolerance; Photosynthetic characteristics; Principal component analysis; Membership function method

高温是植物生长发育过程中最常遭受的环境胁迫因子之一,随气候变暖和城市热岛效应的加剧,其对城市园林植物的胁迫越来越严峻^[1]。植物体受到高温胁迫后,其正常生长发育受到抑制,外观形态也受到损伤,持续的高温胁迫会使植物的光合机能遭受到破坏。许多研究表明,植物的耐热性与其光合特性密切相关,植物体响应高温胁迫最初的反应是叶片的衰老,随着胁迫的进一步加剧,由于类囊体膜的损伤和光系统 II 电子传递机制的破坏,叶片光合作用会受到抑制,导致气孔导度减小、净光合速率下降,最终引起植物生长发育迟缓,甚至死亡^[2-4]。

高温胁迫会导致植物体从形态到生理发生一系列的变化,其中叶片光合机能对高温极度敏感,高温胁迫下不同植物品种叶片光合特性的差异常被用来评价其耐高温能力强弱,是筛选耐高温品种的重要评价指标^[5],但是诸多光合指标之间有信息重叠,若用单一的指标对其进行抗性评价,会影响评价结果的科学性^[6]。目前,有学者认为采用主成分分析法将多个彼此相关的指标转换为少数几个独立的综合指标,避免了各个单项指标之间的信息重叠和相关性的问题,然后通过隶属函数和权重的加权求和计算综合评价值(D 值),从而使计算得到的综合评价结果更加科学^[7]。近年来,利用主成分分析法并结合隶属函数进行赋值综合评价的方法在植物抗性研究中应用越来越广泛^[8-10]。鉴于此,笔者选用 2 年生的 10 个杜鹃花品种盆栽扦插苗为材料进行高温处理,测定其叶片光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等 4 个光合指标,并根据相应公式计算求得其叶片水分利用效率(WUE)、光能利用效率(LUE)、 CO_2 利用效率(CUE)和气孔限制值(L_s),利用主成分分析与隶属函数值相结合的方法对参试品种的光合特性进行耐热性综合评价,以期为进一步扩大杜鹃花的园林应用及加快其抗逆育种提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

试验在江苏省农业科学院休闲农业研究所内进行。试验材料选用生长一致的 2 年生盆栽扦插苗‘紫金粉玉’‘瑶妃’‘胭脂蜜’‘春樱’‘晓霞’‘丰美 1 号’‘粉红泡泡’‘小莺’‘石岩杜鹃’‘炮仗红’共 10 个杜鹃品种,每个品种 3 盆,随机区组设计,3 次重复。盆内径 12 cm,盆高 12 cm,盆土为泥炭:珍珠岩(3:1)的混合基质,每盆装土量一致,常规管理。

试验于 2018 年 7 月进行,设常温处理(25 ℃,对照)和高温处理(40 ℃),首先在人工气候培养箱(BIC-400)进行预培养,预培养条件控制为:温度 25 ℃/20 ℃(12 h 昼/12 h 夜),光照强度 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相对湿度 75%,每天观察及时补充水分。预培养 1 周后,于第 8 天上午测定常温处理的光合指标,然后开始 40 ℃/25 ℃(12 h 昼/12 h 夜)的高温胁迫(除温度以外,其他培育条件与常温处理一致),胁迫 7 d 后测定高温胁迫处理的光合指标。为防止高温引起的干旱胁迫,每天观察及时补充水分。

1.2 光合指标测定方法

于上午 9:00—10:00 用 LI-6400XT 型便携式光合仪(LI-COR, Lincoln, United States of America)进行叶片光合指标的测定,其中标准叶室(2 cm×3 cm)内置 LED 红蓝组合光源,根据当时培养箱的光照强度设定光合有效辐射(Photosynthetic active radiation, PAR),采用开放式气路测定叶片 P_n , Tr , G_s 和 C_i 等光合参数。每次测定 6 次重复,取平均值。并根据以上数据计算 WUE , LUE , CUE 和 L_s 。计算公式^[11-12]如下:

$$WUE = P_n / Tr$$

$$LUE = P_n / PFD \text{ (} PFD \text{ 为光量子通量密度)}$$

$$CUE = P_n / C_i$$

$$L_s = 1 - C_i / C_a \text{ (} C_a \text{ 为大气 } CO_2 \text{ 浓度)}$$

1.3 数据统计分析

1.3.1 原始数据处理 用 Excel 2016 软件对试验数据进行初步处理,计算各单项指标的平均值和标准误差,并用 SPSS19.0 以 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析。

1.3.2 相对耐热系数的计算 参考陈志晟等^[13]的方法,以各单项光合指标的平均值进行相对耐热系数计算,相对耐热系数 $\alpha(\%) = (\text{高温胁迫下的指标测定值} / \text{对照测定值}) \times 100$,并计算各耐热系数的相关系数。

1.3.3 主成分分析 用 DPSv7.05 软件对单项光合指标的耐热系数进行主成分分析,计算得到特征值、贡献率、累计贡献率等参数,最终计算各综合主成分的得分。

1.3.4 隶属函数值的计算 新的主成分的隶属函数值用何雪娇等^[8]的公式进行计算。新的主成分的隶属函数值 $U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,式中 $j=1, 2, \dots, n$; X_j 表示第 j 个主成分, X_{\min} 表示第 j 个主成分得分中的最小值, X_{\max} 表示第 j 个主成分得分中的最大值。根据以上公式可求出每个杜鹃花品种关键主成分的隶属函数值。

1.3.5 权重的计算 根据各主成分的贡献率分别用马瑞娟等^[14]的公式计算其权重 $W_j, W_j = P_j / \sum P_j$, 式中 $j=1, 2, \dots, n$; W_j 表示第 j 个主成分在所有主成分中的重要程度, P_j 为各杜鹃品种第 j 个主成分的贡献率。

1.3.6 综合评价值的计算 根据主成分的隶属函数值及其权重,应用钮福祥等^[15]的公式计算不同杜鹃花品种的耐热综合评价值(D 值), $D = \sum [U(X_j) \times W_j]$, 式中 $j=1, 2, \dots, n$; $U(X_j)$ 表示第 j 个主成分的隶属函数值, W_j 表示第 j 个主成分的权重。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫下不同杜鹃花品种的光合特性

从表 1 可以看出,在高温胁迫下,10 个品种的 Pn, Tr, Gs, WUE, LUE 和 CUE 均较对照处理有所下降,不同品种各指标下降幅度不尽相同。对于‘晓霞’‘炮仗红’而言,高温处理的 Pn, Gs 均下降,而 Ls 上升;而‘粉红泡泡’‘小莺’的 Pn, Ls 均下降的同时, Ci 却上升。从上述结果值可以看出,所参试的 10 个杜鹃花的光合能力在高温胁迫下均有不同程

表 1 高温胁迫下 10 个杜鹃花品种光合特性比较

品种名称	$Pn / [\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})]$		$Tr / [\text{mmol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})]$		$Gs / [\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})]$		$Ci / (\mu\text{mol} / \text{mol})$	
	对照	高温	对照	高温	对照	高温	对照	高温
紫金粉玉	4.337 4 e	0.203 4 e	1.253 7 d	0.287 8 cd	0.065 5 cd	0.020 8 ab	229.977 6 a	219.313 6 a
嫦娥	5.787 3 d	0.357 9 de	1.358 5 cd	0.371 1 cd	0.058 2 d	0.009 1 b	221.012 1 a	181.805 5 bc
胭脂蜜	8.435 0 b	0.812 3 b	2.130 0 b	0.906 2 ab	0.091 7 b	0.012 3 b	229.721 7 a	172.901 9 bc
春樱	6.451 7 cd	0.357 1 de	1.634 1 cd	0.377 3 cd	0.067 6 cd	0.009 7 b	215.212 2 a	177.744 5 bc
晓霞	5.786 4 d	0.494 2 cd	1.358 6 cd	0.392 4 cd	0.058 6 d	0.010 5 b	221.012 4 a	171.735 7 bc
丰美 1 号	9.129 6 b	0.823 8 b	2.142 9 b	0.784 0 b	0.096 3 b	0.021 8 ab	217.837 1 a	169.597 0 bc
粉红泡泡	4.494 0 e	0.262 6 e	0.727 0 e	0.190 1 d	0.032 1 e	0.011 8 b	145.233 9 b	197.794 6 abc
小莺	4.466 8 e	0.286 4 e	0.704 4 e	0.193 2 d	0.029 2 e	0.009 4 b	110.078 1 b	203.866 0 ab
石岩杜鹃	7.188 8 c	0.618 7 c	1.797 2 bc	0.612 0 bc	0.082 5 bc	0.031 5 a	238.311 6 a	174.449 1 bc
炮仗红	10.321 4 a	1.262 8 a	2.720 2 a	1.241 4 a	0.131 7 a	0.020 9 ab	251.625 9 a	165.340 4 c
品种名称	$WUE / (\text{mmol} / \text{mol})$		LUE		$CUE / [\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s})]$		Ls	
	对照	高温	对照	高温	对照	高温	对照	高温
紫金粉玉	3.985 9 b	0.498 9 b	0.004 4 d	0.000 2 e	0.020 2 c	0.001 3 de	0.416 6 c	0.254 9 b
嫦娥	4.251 9 b	1.267 8 ab	0.004 8 cd	0.000 2 de	0.022 3 c	0.002 0 cde	0.457 2 bc	0.358 3 b
胭脂蜜	3.969 7 b	1.330 9 ab	0.008 4 b	0.000 5 ab	0.036 9 b	0.005 1 a	0.412 8 c	0.355 4 b
春樱	4.091 8 b	2.747 2 a	0.007 7 b	0.000 3 cde	0.033 1 b	0.002 7 cde	0.403 0 c	0.346 6 b
晓霞	4.251 9 b	1.349 1 ab	0.004 8 cd	0.000 3 bcde	0.022 3 c	0.002 9 bcd	0.457 2 bc	0.706 0 a
丰美 1 号	4.292 2 b	2.003 2 ab	0.008 4 b	0.000 5 bc	0.048 1 a	0.004 5 ab	0.556 2 ab	0.292 3 b
粉红泡泡	6.588 0 a	0.574 1 b	0.004 6 cd	0.000 1 e	0.028 6 bc	0.001 1 e	0.595 1 a	0.257 7 b
小莺	7.203 8 a	1.042 3 ab	0.004 9 cd	0.000 2 e	0.032 8 b	0.001 4 de	0.589 0 a	0.282 8 b
石岩杜鹃	4.016 1 b	1.667 7 ab	0.005 8 c	0.000 4 bcd	0.022 8 c	0.003 7 abc	0.362 9 cd	0.264 7 b
炮仗红	3.873 4 b	1.458 0 ab	0.010 3 a	0.000 7 a	0.033 8 b	0.005 4 a	0.261 5 d	0.311 7 b

注:竖列中不同的小写字母表示相同条件下不同品种间存在差异显著($P < 0.05$)。

度的下降,其中‘胭脂蜜’‘炮仗红’在高温下 P_n 和 Tr 值较其他品种高,且保持较高的 CO_2 和光能利用效率,从而表现出对高温胁迫有较高的抗性。

2.2 相对耐热系数及其相关性分析

根据相对耐热系数公式计算得到 10 个杜鹃花品种经高温胁迫处理后的 8 个光合指标的相对耐热系数 $\alpha(\%)$ 如表 2 所示。从表 2 可知,10 个杜鹃花品种经过高温胁迫 7 d 后,幼苗的光合生理指标发

生了明显的变化,其相对耐热系数明显偏离 100%,大多数指标下降 ($\alpha < 100\%$),少数指标上升 ($\alpha > 100\%$),由此看出,由于各个光合指标在杜鹃花耐热中的作用各不相同,不同杜鹃花受高温胁迫后的光合表现也各不相同,且耐热性是一个受多基因调控的复杂数量性状,仅用单个的光合指标难以科学合理地评价各个品种间的耐热性差异,需要通过多元统计分析方法对其进行更有效的综合评价。

表 2 各品种单项光合指标的相对耐热系数 %

品种名称	P_n	Tr	G_s	C_i	WUE	LUE	CUE	L_s
紫金粉玉	4.69	22.96	31.76	95.36	12.52	4.18	6.29	61.17
嫦娥	6.18	27.32	15.61	82.26	29.82	5.03	9.15	78.38
胭脂蜜	9.63	42.54	13.42	75.27	33.53	6.42	13.75	86.11
春樱	5.53	23.09	14.31	82.59	67.14	3.97	8.30	86.00
晓霞	8.54	28.89	17.86	77.70	31.73	6.94	13.22	154.42
丰美 1 号	9.02	36.58	22.61	77.85	46.67	5.95	9.26	52.55
粉红泡泡	5.84	26.15	36.77	136.19	8.71	2.91	3.76	43.31
小莺	6.41	27.42	32.26	185.20	14.47	3.90	4.30	48.01
石岩杜鹃	8.61	34.05	38.22	73.20	41.52	7.32	16.40	72.95
炮仗红	12.23	45.63	15.84	65.71	37.64	6.95	15.85	119.18

从各单项光合指标的相对耐热系数的相关系数矩阵可以看出(见表 3), P_n 与 Tr , LUE , CUE 呈现出极显著的正相关, LUE 与 CUE 也呈现出极显著的正相关, Tr 与 LUE , CUE 呈现出显著的正相关, C_i 与 CUE 则呈现出显著的负相关;各个指标数据之间存

在一定的信息重叠,若直接用单个指标进行杜鹃花耐热性评价,则不能得出较为科学的结果。因此,本研究将运用主成分分析法与隶属函数相结合的方法对其进行综合评价。

表 3 各单项光合指标耐热系数的相关系数矩阵

指标	P_n	Tr	G_s	C_i	WUE	LUE	CUE	L_s
P_n	1.00							
Tr	0.949 **	1.00						
G_s	-0.366	-0.338	1.00					
C_i	-0.482	-0.437	0.535	1.00				
WUE	0.292	0.216	-0.549	-0.610	1.00			
LUE	0.816 **	0.721 *	-0.311	-0.085	0.559	1.00		
CUE	0.796 **	0.716 *	-0.361	-0.761 *	-0.477	0.950 **	1.00	
L_s	0.506	0.290	-0.597	-0.554	0.317	0.635 *	0.661 *	1.00

2.3 主成分分析

对 8 个光合指标的耐热系数进行主成分分析,其结果表明,前 4 个主成分(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)的贡献率分别为 61.593 9%, 16.462 8%, 8.594 2%, 7.942 8%,累计贡献率达 94.593 7%。这表明,前 4 个主成分代表了原有 8 个指标的 94.593 7%的信息,用这 4 个主成分进行隶属函数及权重的加权求和所计算得到的综合评价价值(D 值),能表征这 10 个杜鹃花品种在高温胁迫下的光合综合能力。这 4

个主成分对应的特征向量表达式分别是,第 1 主成分 $Z_1=0.386\ 7\ P_n+0.348\ 3\ Tr-0.273\ 1\ G_s-0.363\ 8\ C_i+0.260\ 3\ WUE+0.410\ 2\ LUE+0.423\ 4\ CUE+0.327\ 0\ L_s$;第 2 主成分 $Z_2=0.370\ 1\ P_n+0.434\ 5\ Tr+0.492\ 7\ G_s+0.264\ 6\ C_i-0.502\ 3\ WUE+0.210\ 3\ LUE+0.126\ 0\ CUE-0.221\ 4\ L_s$;第 3 主成分 $Z_3=0.030\ 1\ P_n+0.205\ 6\ Tr+0.190\ 7\ G_s-0.170\ 9\ C_i+0.601\ 5\ WUE-0.046\ 2\ LUE+0.015\ 1\ CUE-0.726\ 0\ L_s$;第 4 主成分 $Z_4=-0.285\ 7\ P_n-0.425\ 6$

$Tr+0.639\ 3\ Gs-0.3356\ Ci+0.027\ 6\ WUE+0.310\ 8\ LUE+0.321\ 2\ CUE+0.124\ 2\ Ls$ 。

由以上表达式可知, Z_1 式中 LUE, CUE 的系数较大, Z_2 式中 Tr, Gs 的系数较大, Z_3 式中 WUE 的系数最大, Z_4 式中 Gs 的系数最大,这表明 8 个光合指标在这 4 个主成分中的作用不同,在第 1 个主成分中, LUE, CUE 占主导作用,在第 2 个主成分中 Tr, Gs 占主导作用,在第 3,4 个主成分中占主导作用的分别是 WUE 和 Gs 。

2.4 隶属函数分析及综合评价分析

以前 4 个主成分(Z_1-Z_4)作为评价耐热性的原始数据,对其进行隶属函数值和权重的加权求和从而计算得到综合评价值(D 值),计算结果见表 4。对第 1 个主成分 Z_1 而言,‘炮仗红’的 $U(X_1)$ 最大,

在 Z_1 这个主成分上表现最耐热,而‘粉红泡泡’则最小,在这个主成分上表现为最不耐热,由主成分对应的特征向量表达式可以看出 Z_1 中系数较大的指标为 LUE 和 CUE ,均与耐热性均呈正相关,从而较客观地反映了不同杜鹃花品种的耐热能力。

以综合评价值(D 值)的大小为依据,对参试杜鹃花品种的耐热性进行强弱排序,结果表明,‘炮仗红’的 D 值最大(0.864 1),表明其最耐热;其次是‘石岩杜鹃’‘胭脂蜜’,其 D 值分别为 0.784 9 和 0.719 9; D 值较小的 3 个品种分别是‘紫金粉玉’‘小莺’和‘粉红泡泡’(0.311 1, 0.241 2, 0.233 1),表明其耐热性弱;其他杜鹃花品种的 D 值介于 0.719 9—0.311 1 之间,耐热性中等。

表 4 各品种的综合指标值、隶属函数值、 D 值及综合评价

品种	综合指标值				隶属函数值				D	排序
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$		
紫金粉玉	-2.337 7	-0.124 7	-0.379 4	0.774 6	0.153 3	0.677 0	0.456 1	0.619 4	0.311 1	8
嫦娥	-0.313 7	-1.003 1	-0.283 5	-0.160 2	0.448 2	0.451 9	0.486 8	0.269 8	0.437 4	6
胭脂蜜	2.100 0	0.453 5	0.102 3	-0.881 5	0.799 9	0.825 1	0.610 0	0.000 0	0.719 9	3
春樱	-0.308 7	-2.766 9	0.765 0	-0.124 2	0.448 9	0.000 0	0.821 8	0.283 2	0.390 8	7
晓霞	1.870 0	-0.616 0	-1.807 0	0.637 4	0.766 4	0.551 1	0.000 0	0.568 1	0.642 6	4
丰美 1 号	0.724 3	0.147 8	1.322 9	-0.399 6	0.599 5	0.746 8	1.000 0	0.180 2	0.626 3	5
粉红泡泡	-3.389 5	0.805 2	-0.080 7	-0.127 9	0.000 0	0.915 2	0.551 6	0.281 9	0.233 1	10
小莺	-3.142 9	1.055 0	-0.293 9	-0.772 4	0.035 9	0.979 2	0.483 4	0.040 8	0.241 2	9
石岩	1.325 1	1.136 0	0.932 5	1.792 2	0.687 0	1.000 0	0.875 3	1.000 0	0.784 9	2
炮仗红	3.473 1	0.913 2	-0.278 3	-0.738 5	1.000 0	0.942 9	0.488 4	0.053 5	0.864 1	1
权重			0.651 1	0.174 0	0.090 9	0.084 0				

3 讨论

叶片是植物进行光合作用的重要器官,其对高温胁迫较为敏感;高温通过影响植物叶片光化学反应速率和光合酶活性,导致植物叶片光能吸收利用效率的降低,引起激发能过量积累,从而导致光系统 II 反应中心的相关酶活性的降低,甚至失活,造成不可逆的损害^[16]。有研究表明,耐高温的植物在高温胁迫早期会更快地关闭气孔,减少水分损失,从而维持正常的生理活动^[17]。孟晓蕊等^[18]在观赏草对高温适应机制的研究中也发现,耐热性强的品种主要通过加大气孔蒸腾散热、降低叶表面温度、加快体内气体交换等方式,对自身光合作用起到保护的功能,维持较高的光合速率,从而保持相对正常的生理状态。在本研究中,耐热综合评价值高的品种,如‘炮仗红’和‘晓霞’,其在高温胁迫下的 Pn, Gs 和 Ci 均下降,而 Ls 升高,表明其叶片光合速

率降低是主要由气孔限制因素引起,气孔关闭是其响应高温胁迫、保持较强的耐热性的关键措施之一。高温胁迫对光合作用的影响十分复杂,除了气孔限制因素以外,还存在非气孔限制因素,表现在叶绿素含量、光系统 II 电子传递能力、叶肉细胞密度等方面的下降以及叶绿体结构的破坏^[19],与胞间 CO_2 浓度的上升密切相关^[20]。在本研究中发现,高温胁迫下的‘粉红泡泡’和‘小莺’的 Pn 下降的同时,伴随着 Ls 的下降和 Ci 的升高,表明非气孔限制因素是导致其叶片光合速率下降的主要原因;同时,从表 1 可以看出,‘粉红泡泡’‘小莺’这 2 个品种的 WUE, LUE, CUE 均大幅度降低,说明高温胁迫很可能导致其叶片的生物膜结构破坏、叶肉细胞活性下降等,对光合系统造成不可逆的破坏。郑宇等^[21]对 4 个西洋杜鹃在高温胁迫下的研究也表现出类似的现象。

植物的耐热性是一个十分复杂的综合性状,且

不同品种对高温胁迫的形态及生理响应机制存在差异,单一指标的数理统计难以全面准确评价不同品种耐热性的差异^[13]。在植物资源抗性鉴定中,使用单一指标进行评价易造成信息遗漏或重叠,加上各指标在不同品种的抗性中所起作用的大小不同,只有采用多种形式结合的综合分析方法才能更为客观地评价其抗性^[22]。李春红等^[23]认为,在植物抗性评价中,可采用主成分分析法将多个彼此相关的指标转化为较少的相互独立的新的主成分,继而利用模糊隶属函数法结合权重计算求出各主成分的综合评价值(D 值),该 D 值能更为科学客观地评价出参试材料的综合抗性。王凯红等^[24]利用主成分分析法和隶属函数法相结合对5种杜鹃花在高温胁迫下的丙二醛含量、过氧化氢含量、脯氨酸含量等6个生理指标进行了综合分析,研究结果表明在3个温度条件下百花杜鹃的 D 值均最大,表明其耐热性最强,红棕杜鹃的 D 值均最小,表明其耐热性最弱,这一结果与5种杜鹃的田间耐热性表现相一致,说明综合评价法可用于杜鹃苗期耐热性的评价。本研究发现,通过采用主成分分析法,可将8个相互关联的光合指标转化成4个独立的主成分,并计算得到后者的权重系数分别为0.651 1、0.174 0、0.090 9和0.839 7,然后依据隶属函数值和权重系数,求出10个杜鹃花品种的综合评价值(D 值),同时对其耐热性进行了排序,耐热性强弱依次为‘炮仗红’‘石岩杜鹃’‘胭脂蜜’‘晓霞’‘丰美1号’‘嫦娥’‘春樱’‘紫金粉玉’‘小莺’‘粉红泡泡’;从开花时间来分类,除了‘炮仗红’和‘石岩杜鹃’属于夏鹃类型,其他均属于春鹃类型,而本研究结果表明,部分夏鹃的耐热性比春鹃强,这可能与夏鹃的叶片结构及其生理机制更能适应夏季高温有关,其机理有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 林乐静,林立,祝志勇,等. 13个鸡爪槭品种的耐热性研究[J]. 江苏林业科技,2018,45(6):12-15.
- [2] 王彬,田正凤,应彬彬,等. 高温胁迫对樟树光合性能的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(1):47-53.
- [3] WANG D, HECKATHORN S A, HAMILTON E W, et al. Effects of CO₂ on the tolerance of photosynthesis to heat stress can be affected by photosynthetic pathway and nitrogen [J]. American Journal of Botany, 2014, 101(1):34-44.
- [4] PATIL S, PANDIT R, LALI A. Photosynthetic acclimation of *Chlorella saccharophila* to heat stress [J]. Phycological Research, 2017, 65(2):160-165.
- [5] ZHAO X H, NISHIMURA Y, FUKUMOTO Y, et al. Effect of high temperature on active oxygen species, senescence and photosynthetic properties in cucumber leaves [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70(2-3):212-216.
- [6] 田治国,杨艳,王飞. 美女樱不同品种耐热性评价[J]. 江苏农业科学,2017,45(24):149-152.
- [7] 曾小玲,方淑桂,陈文辉,等. 不同大白菜品种苗期耐热性的综合评价[J]. 福建农业学报,2010,25(2):183-186.
- [8] 何雪娇,余智城,林金水,等. 40份热带花卉种质的抗冷性综合评价[J]. 西北农林科技大学学报,2018,48(8):89-98.
- [9] 农江飞,李青萍,杨翼飞,等. 8种柑桔砧木种质耐酸碱性的评价[J]. 中国南方果树,2018,47(2):21-26.
- [10] 周媛,郭彩霞,董艳芳,等. 9种景天属轻型屋顶绿化植物的耐热性研究[J]. 西北农林科技大学学报,2014,42(9):119-136.
- [11] 张俊杰,陈宗游,韩愈,等. 不同砧木嫁接对‘桂栗一号’大果锥栗苗木生长及光合特性的影响[J]. 中国农业科技导报,2018,20(3):10-19.
- [12] 杨德廉,李祥英,赵文超,等. 有机肥施用对烟草光合特性的影响[J]. 中国农学通报,2016,32(28):47-51.
- [13] 陈志晟,田丽波,商桑,等. 不结球白菜耐热性评价[J]. 热带作物学报,2019,40(4):693-700.
- [14] 马瑞娟,张斌斌,蔡志翔,等. 不同桃砧木品种对淹水的光合响应及其耐涝性评价[J]. 园艺学报,2013,40(3):409-416.
- [15] 钮福祥,华希新,郭小丁,等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探[J]. 作物学报,1999,22(4):393-398.
- [16] 吴久赞. 吐鲁番不同品种葡萄的耐热性评价[D]. 石河子:石河子大学,2018:30.
- [17] VÉGH B, MARČEK T, KARSAI I, et al. Heat acclimation of photosynthesis in wheat genotypes of different origin [J]. South African Journal of Botany, 2018, 117:184-192.
- [18] 孟晓蕊,许志敏,朱婷. 南方夏季高温条件下7种观赏草的光合动态及水分利用特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2018,47(2):167-173.
- [19] DJANAGUIRAMAN M, BOYLE D L, WELTI R, et al. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles [J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(1):55-71.
- [20] 窦全琴,隋德宗,何旭东,等. 高温对20个鸡爪槭品种叶片形态和光合特性的影响[J]. 江苏林业科技,2014,41(2):1-6.
- [21] 郑宇,何天友,陈凌艳,等. 高温胁迫对西洋杜鹃光合作用和叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2012,41(6):608-615.
- [22] 王婧,刘璐,刘骐华,等. 草地早熟禾不同品种苗期耐盐性鉴定[J]. 中国农学通报,2019,35(18):36-43.
- [23] 李春红,姚兴东,鞠宝韬,等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(15):2927-2939.
- [24] 王凯红,刘向平,张乐华,等. 5种杜鹃幼苗对高温胁迫的生理生化响应及耐热性综合评价[J]. 植物资源与环境学报,2011,20(3):29-35.