

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230280

不同油茶品种苗对高温胁迫的生理响应 及耐热性评价

傅志强¹, 张恒¹, 刘祯¹, 奚如春^{1,2*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广东广州 510642)

摘要: [目的] 近年来我国南方高温频发, 高温环境已成为油茶生长发育的重要限制因素。为探究不同油茶品种高温胁迫的生理响应及耐热性差异, 筛选出适合在高温地区种植的油茶品种。[方法] 选用我国各省(区)现行的15个油茶品种为研究对象, 以其3年生嫁接幼苗为试验材料, 分别调查测定各油茶品种在高温胁迫(覆膜增温)下的叶片相对含水量、干物质含量、光合色素、渗透调节物质和抗氧化酶活性等12个生理生化指标, 并利用主成分分析法和隶属函数法对15个品种的耐热性进行综合评价。[结果] 在高温胁迫下, 参试油茶品种的叶片相对含水量和干物质含量降低; 光合色素含量降低, 且多数存在显著差异($p < 0.05$); 丙二醛含量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量均升高; 隶属函数分析表明, 15个油茶品种的耐热性存在差异, 其强弱顺序为华金 > 赣州油1号 > 华硕 > 岑软2号 > 湘林210 > 赣无2 > 长林53号 > 粤韶75-2 > 粤韶77-1 > 长林4号 > 岑软3号 > 华鑫 > 长林40号 > 赣州油7号 > 赣石83-4。[结论] 15个油茶品种中, 华金、赣州油1号、华硕、岑软2号和湘林210耐热性强, 适宜高温地区引种栽培。

关键词: 油茶; 高温胁迫; 生理响应; 耐热性; 综合评价

中图分类号: S794.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)02-0189-12

高温胁迫是主要非生物胁迫之一, 也是在整个生命周期中影响植物生长发育的关键环境因素^[1-2]。在高温下不仅会对植物外部造成不可逆的机械损伤, 还会导致植物体内部干物质含量减少^[3]、光合作用减弱^[4]、抗氧化酶活性降低^[5]。近年来, 随着全球气候变暖, 极端高温天气频发, 高温胁迫对林业发展危害性增大, 研究表明, 长时间的高温胁迫对木荷 (*Schima superba* Gaertn. et Champ)^[6]、香樟 (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)^[7]、杨树 (*Populus* L.)^[8] 和大叶桉 (*Eucalyptus robusta* Smith)^[9] 等重要用材树种带来了严重的负面影响。

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 是我国特有的优质木本油料树种, 属山茶科 (Theaceae) 山茶

属 (*Camellia*) 常绿灌木或小乔木, 多栽培于南方丘陵地区, 极具生产应用价值^[10-11]; 茶油又称为东方橄榄油, 具有较高的营养价值和药用价值^[12]。我国油茶种植面积和产业产值每年都在增加^[13], 油茶虽适应性较强, 但高温条件仍会对其生长发育造成一定程度的影响^[14], 尤其是南方夏季的持续高温天气, 容易导致新造油茶林死亡^[15]。研究表明, 高温干旱是影响油茶生长发育的关键因素之一^[16], 因此, 生态型适生油茶品种评价与筛选意义现实而重大。筛选耐热品种是降低高温对植物危害的有效措施, 在筛选过程中通常采用主成分分析和隶属函数分析相结合, 得到的综合评价值 (*D* 值) 在评价体系中应用广泛^[17-18]。

本研究以我国15个油茶品种的苗木为试验材

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-08-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B020215003); 广东省林业科技创新项目 (2018KJCX008) 共同资助

* 通讯作者: 奚如春, 博士, 教授, 主要研究方向为: 经济林高效栽培与利用。Email: xirc2006@scau.edu.cn

料,通过调查测定其在高温胁迫下的生理响应,并进行耐热性综合评价,旨在为油茶耐热生理机制研究和耐热品种选用提供理论技术指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区域位于广东省广州市天河区华南农业大学教学试验基地(113°21'26" E, 23°9'26" N),属亚热带季风气候,温暖多雨、阳光充足、全年水热同期,年平均气温 23.1 °C,最高温 39.1 °C,最低

温-0.9 °C,最冷月为 1 月,平均气温 13.3 °C,最热月为 8 月,平均气温 28.8 °C。年降水量 1 800 mm,4—9 月的降水量占全年降水量的 80%,尤以 5—8 月最高,占全年降水量的 62%,该区域年平均湿度为 79%。

1.2 试验材料与 设计

1.2.1 试验材料 选择我国各省(区)现行主推 15 个油茶品种(表 1),以各品种 3 a 生嫁接苗为试验材料。

表 1 参试品种基本情况

Table 1 Basic information of participating species

参试品种 Experimental variety	审(认)定品种号 Validated variety No.	选育单位 Breeding unit
岑软2号	国S-SC-CO-001-2008	广西壮族自治区林业科学研究院
岑软3号	国S-SC-CO-002-2008	广西壮族自治区林业科学研究院
长林4号	国S-SC-CO-006-2008	中国林业科学研究院亚热带林业研究所
长林40号	国S-SC-CO-011-2008	中国林业科学研究院亚热带林业研究所
长林53号	国S-SC-CO-012-2008	中国林业科学研究院亚热带林业研究所
华金	国S-SC-CO-010-2009	中南林业科技大学
华鑫	国S-SC-CO-009-2009	中南林业科技大学
华硕	国S-SC-CO-011-2009	中南林业科技大学
湘林210	国S-SC-CO-015-2006	湖南省林业科学研究院
赣州油1号	国S-SC-CO-014-2008	江西省赣州市林业科学研究所
赣州油7号	国S-SC-CO-017-2008	江西省赣州市林业科学研究所
赣无2	国S-SC-CO-026-2008	江西省林业科学院
赣石83-4	国S-SC-CO-025-2008	江西省林业科学院
粤韶75-2	粤S-SC-CO-019-2009	广东省韶关市林业科学研究所
粤韶77-1	粤S-SC-CO-020-2009	广东省韶关市林业科学研究所

1.2.2 试验设计 于 2022 年 7 月 17 日至 7 月 31 日开展为期 15 d 的控制温度处理。试验采用双因素完全随机区组设计,试验设计分别设置两种温度处理,即高温胁迫组(HT)和对照组(CK),每个油茶品种设置 5 次生物学重复,每个品种各 5 株,分开摆放,共 150 株。试验期间高温胁迫处理的实测温度范围是 41.0~45.0 °C,均值为 43.4 °C,对照组温度范围 33.3~36.2 °C,均值为 34.7 °C。具体技术措施是高温胁迫组将参试油茶幼苗分别放置于温室大棚进行覆膜增温处理,通过温湿度记录仪(RC-4HC)实时监测温度,连续处理 15 d;对照组不进行覆膜增温处理。除温度控

制外,其他按常规苗圃管理。

1.2.3 样品采集 试验的第 16 d 上午 8:00~9:00 对叶片样品进行采集,每个品种选取 5 株,每个植株采集上部完整健康的叶片 10 枚,各指标进行 5 次重复测定。

1.3 测定指标及方法

(1) 叶片相对含水量及干物质含量:将选定的叶片放入密封容器中,然后测定叶面积叶鲜质量(FW)/g;将新鲜叶子放入 4 °C 纯净水中浸泡 48 h 后测量水分饱和和状态时的叶片质量(TW)/g;将叶片放入烘箱 70 °C 干燥至恒质量测定叶干质量(DW)/g,计算叶片相对含水量(RWC)%以

及叶片干物质含量(DMC)/(g·g⁻¹):

$$RWC = (FW - DW) \times 100\% / (TW - DW) \quad (1)$$

$$DMC = DW / FW \quad (2)$$

(2) 光合色素含量测定:采用乙醇浸提法^[19],取洁净新鲜油茶叶片,去除中脉,剪碎成条状,称取0.1 g。将称取的叶片放置于15 mL离心管中,加入10 mL 95%的乙醇,混匀,避光处理,浸泡至叶片发白,色素完全被萃取到溶液中。利用紫外分光光度计(UV-2600,上海恒平)测定提取的溶液在649 nm、665 nm、470 nm下的OD值,并计算叶绿素a含量(Chla)/(mg·g⁻¹)、叶绿素b含量(Chlb)/(mg·g⁻¹)、叶绿素总含量(Chl)/(mg·g⁻¹)、类胡萝卜素含量(Car)/(mg·g⁻¹):

$$Chla = 13.95 \times OD_{665} - 6.88 \times OD_{649} \quad (3)$$

$$Chlb = 24.96 \times OD_{649} - 6.88 \times OD_{665} \quad (4)$$

$$Chl = Chla + Chlb \quad (5)$$

$$Car = 1\,000 \times OD_{470} - 2.05 \times Chla - 114.8 \times Chlb \quad (6)$$

(3) 植物渗透调节物质及抗氧化酶活性测定:采集油茶枝稍3~5片1年生正常功能叶,洗净表明浮土和灰尘,擦干后迅速放入液氮罐带回实验室至-80℃超低温冰箱保存。测定渗透调节物质及抗氧化酶活性所用试剂盒均购自苏州科铭生物技术有限公司(中国,苏州),采用微量法测定,每组处理设3个重复。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法;可溶性糖含量采用蒽酮硫酸法;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250法;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法;过氧化物歧化酶(POD)活性采用愈创木酚法;过氧化氢酶(CAT)活性采用碘量滴定法^[20]。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2021进行统计与分析,使用SPSS 26.0软件进行Pearson相关性分析、差异显著性分析(同一品种不同温度处理间采用T检验($p < 0.05$)),同一温度不同品种间采用Duncan法($p < 0.05$))、主成分分析、隶属函数分析;使用Origin 2018绘制柱状图。

(1) 耐热系数。首先将原始数据以相对指标为单位进行无量纲标准化处理,求得各项生理指标的耐热系数,使用耐热系数进行主成分分析,耐热系数(heat tolerance coefficient, HTC)=高温胁迫

性状值/对照性状值。

(2) 隶属函数分析。隶属函数值的计算方法参照于朱亚迪等^[17]的方法。隶属函数值采用以下公式计算:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (7)$$

式中 $U(X_j)$ 为各油茶品种第 j 个主成分的隶属函数值, X_j 为某综合指标, $j=1,2,3,\dots,n$; X_{\min} 和 X_{\max} 分别表示所有品种中第 j 个综合指标的最小值和最大值。

(3) 指标权重。权重的计算方法参照于凌瑞等^[21],采用以下公式计算:

$$W_j = P_j / \sum_{j=0}^n P_j \quad (8)$$

式中 W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度(权重), P_j 为某综合指标的贡献率。

(4) 综合评价。采用主成分分析和隶属函数分析相结合的方法计算高温胁迫下耐热综合评价(D值)评价油茶耐热性,D值越大,表明品种指标评价的综合得分越高,D值采用以下公式进行计算:

$$D = \sum_{j=0}^n [U(X_j) \times W_j] \quad (9)$$

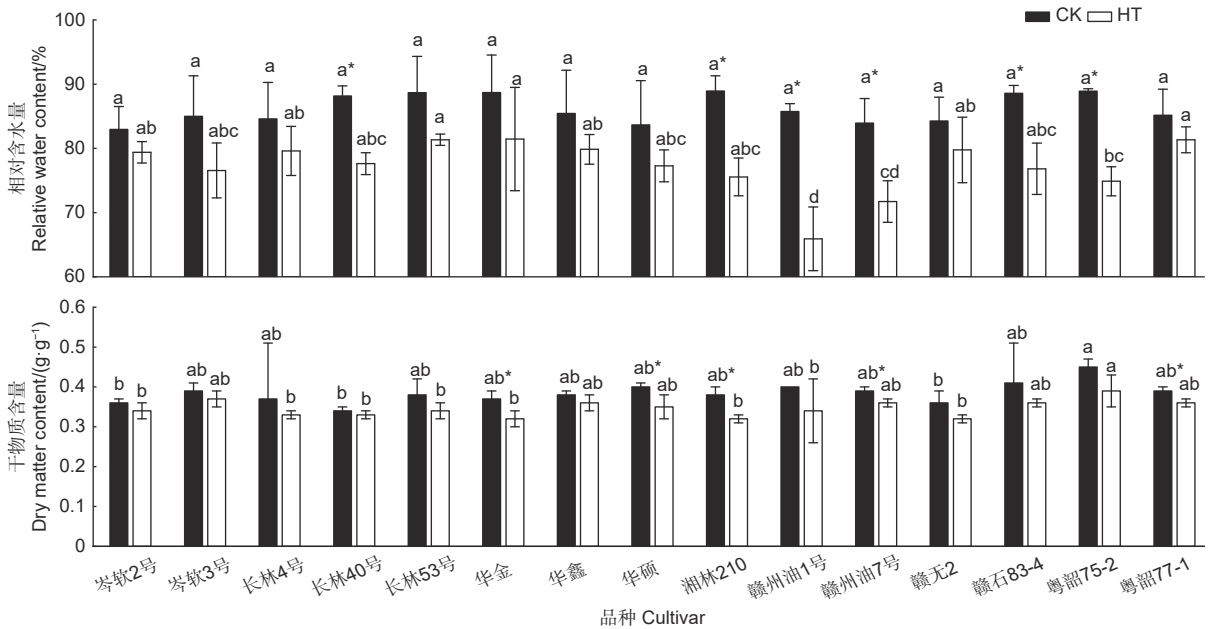
2 结果与分析

2.1 高温胁迫对油茶叶片相对含水量及干物质含量的影响

高温胁迫引起油茶叶片中相对含水量和干物质含量降低,不同油茶品种降低的程度不同(图1)。相对含水量多重比较结果表明:对照组(CK)内各品种间叶片相对含水量均无显著差异($p > 0.05$),高温胁迫处理(HT)后品种间,赣州油1号的相对含水量除与赣州油7号无显著差异以外,而与其他各品种之间均存在显著差异($p < 0.05$),较CK下降了23.13%;赣州油7号分别与15个品种中的7个品种(注:岑软2号、长4号、长林53号、华金、华鑫、赣无2和粤韶77-1)在相对含水量上有显著差异($p < 0.05$)(图1);粤韶75-2分别与长林53号、华金、赣州油1号和粤韶77-1间也有显著差异($p < 0.05$)。同一品种下,高温处理与其相应对照处理间存在显著差异的品种有6个,包括长林40号、湘林210、赣州油1号、赣州油7号、赣石83-

4 和粤韶 75-2 ($p < 0.05$)。同一品种下叶片干物质含量, 华金、华硕、湘林 210、赣州油 7 号和粤韶 77-1 的高温胁迫后与其相应 CK 相比均显著降低 ($p < 0.05$), 其中湘林 210 降低幅度最大, 为 15.79%, 说明高温对该品种干物质积累和转运的

影响较大, 而其余 9 个品种在温度处理间无显著差异 ($p > 0.05$), 说明这 9 个品种相对耐高温胁迫; 同时, 高温胁迫组内或对照组内, 叶片干物质含量在品种间均无显著差异 ($p > 0.05$)。



注: 不同小写字母表示同一处理不同品种间差异显著 ($p < 0.05$), *表示同一品种在不同温度处理下差异显著 ($p < 0.05$), 下同

Notes: Different Lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between different varieties of the same treatment, * indicates significant differences ($p < 0.05$) between the same variety under different temperature treatments, the same below

图 1 高温条件对不同油茶叶片相对含水量和干物质含量的影响

Fig. 1 Effect of high temperature stress on the relative water content and dry matter content of different *Camellia oleifera* leaves

2.2 高温胁迫对油茶叶片光合色素含量的影响

图 2 为 15 个油茶品种在 CK 和高温处理条件下叶片中光合色素含量的变化情况, 不同品种在高温胁迫下叶片中光合色素含量均有不同程度的降低。同一品种下, 除长林 53 号、华鑫、华硕和赣无 2 以外, 其他 11 个品种叶片中叶绿素 a 含量较 CK 显著降低 ($p < 0.05$), 高温胁迫处理 (HT) 后品种间, 赣石 83-4 的叶绿素 a 含量除与华金无显著差异外 ($p > 0.05$), 和其他品种均有显著差异 ($p < 0.05$), 较 CK 降低了 33.58%, 相较于其他品种为降幅最大, 说明其叶绿素 a 含量受到高温影响较大; 华金与除长林 40 号、赣石 83-4 和粤韶 75-2 外的 11 个品种之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。叶绿素 b 含量除华金、华鑫、华硕、湘林 210 和粤韶 75-2 外其他品种在高温胁迫处理和 CK 处理之间差异显著 ($p < 0.05$), 高温胁迫处

理 (HT) 下, 华硕的叶绿素 b 含量与长林 4 号无显著差异 ($p > 0.05$), 但与其余的 13 个品种差异显著 ($p < 0.05$)。叶绿素总含量除长林 53 号和华硕外其他品种在高温胁迫处理和 CK 处理之间均存在显著差异 ($p < 0.05$), 高温胁迫下赣石 83-4 与华金无显著差异 ($p > 0.05$), 而与其他品种均有显著差异 ($p < 0.05$)。高温胁迫降低了类胡萝卜素含量, 在高温条件下, 赣石 83-4 的类胡萝卜素含量与其他品种之间存在显著差异 ($p < 0.05$), 较 CK 相比降低了 41.48%, 而除赣石 83-4 外, 长林 40 号与除华金外其他品种间也有显著差异 ($p < 0.05$)。

2.3 高温胁迫对油茶叶片丙二醛含量及渗透调节物质的影响

在高温胁迫下不同油茶品种的 MDA 含量均增加 (图 3), 高温胁迫处理与 CK 处理相比, 除岑

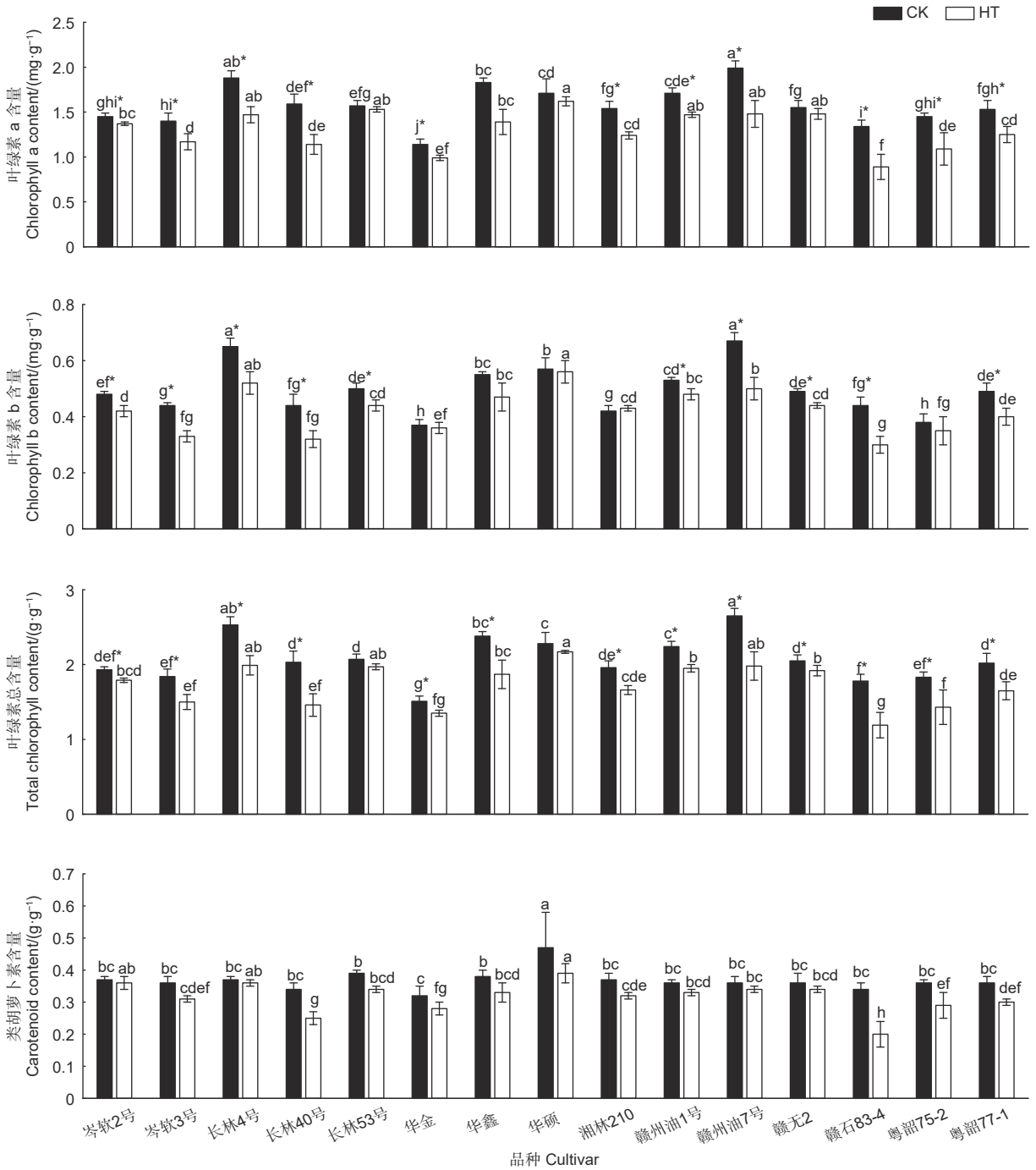


图 2 高温胁迫对不同油茶叶片光合色素含量的影响

Fig. 2 Effect of high temperature stress on photosynthetic pigment content of different *Camellia oleifera* leaves

软 2 号、岑软 3 号、华鑫和粤韶 77-1 外, 其他品种均显著增加 ($p < 0.05$)。高温胁迫下, 长林 4 号的 MDA 含量与其他各品种间存在显著差异 ($p < 0.05$), 与 CK 相比增加了 89.33%, 为增幅最大, 说明在高温胁迫下其膜脂过氧化程度较高; 赣无 2 与岑软 2 号、湘林 210 之间无显著差异 ($p > 0.05$), 但与其他品种存在显著差异

($p < 0.05$), 增幅为 38.13%。除岑软 2 号、岑软 3 号、华金、赣州油 7 号外, 其余品种可溶性糖含量在高温胁迫组和 CK 组之间均有显著差异 ($p < 0.05$), 其中赣石 83-4 在高温处理后可溶性糖含量显著低于 CK 处理, 降低幅度为 20.16%; 高温胁迫后华鑫的可溶性糖含量与除长林 40 号、湘林 210 号和赣州油 1 号外的 11 个品种之间有显

著差异 ($p < 0.05$), 增幅为 31.54%。高温胁迫下各油茶品种的可溶性蛋白含量与 CK 相比均显著升高 ($p < 0.05$), 不同品种间, 赣无 2 与其他品种差异显著 ($p < 0.05$), 增幅为 321.26%, 表明

赣无 2 可以通过调节可溶性蛋白含量来应对高温胁迫, 此外, 赣州油 7 号与除岑软 3 号、粤韶 75-2 和粤韶 77-1 外的 11 个品种也有显著差异 ($p < 0.05$)。

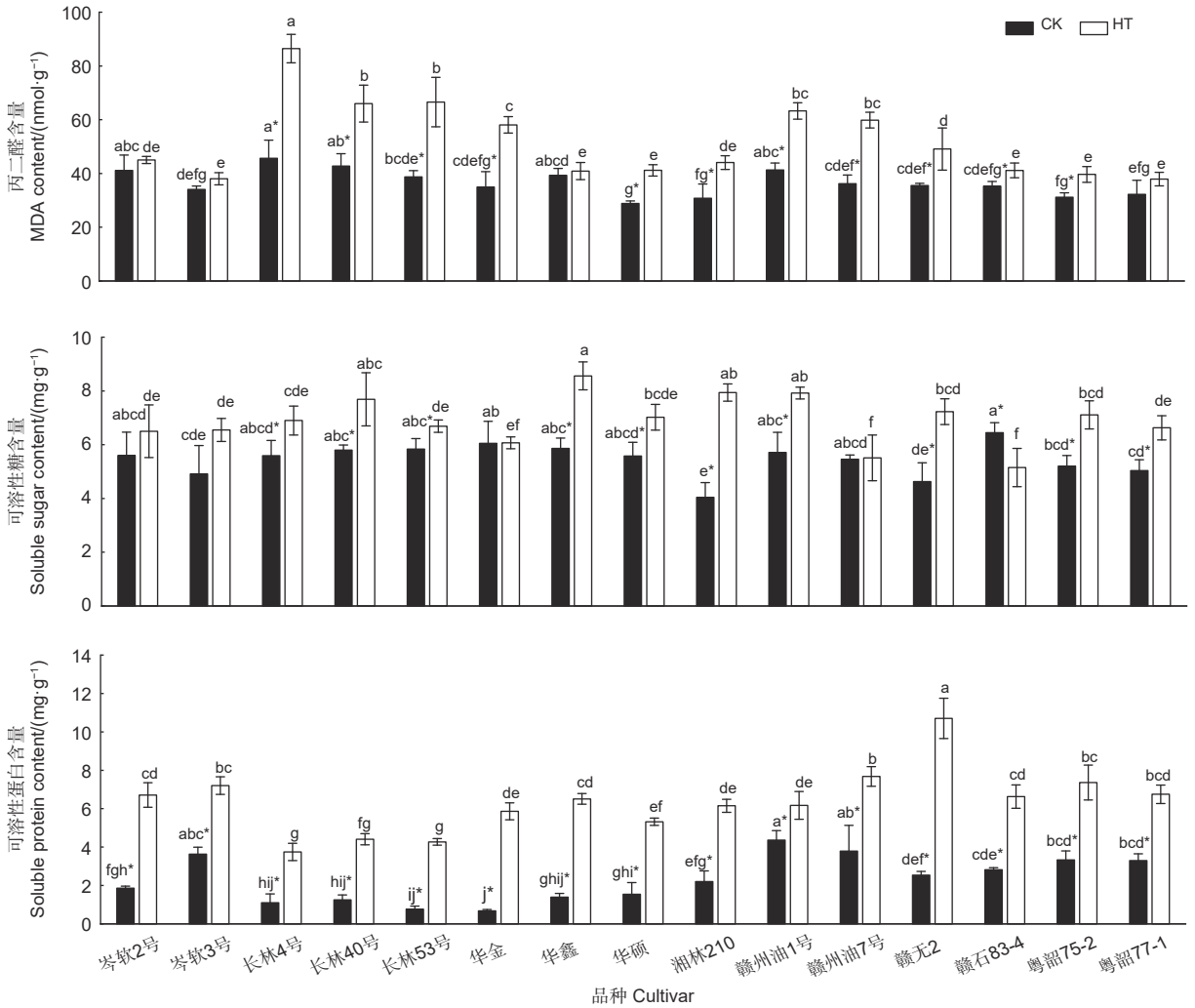


图 3 高温胁迫对不同油茶叶片丙二醛及渗透调节物质含量的影响

Fig. 3 Effect of high temperature stress on the content of MDA and osmoregulatory substances in different *Camellia oleifera* leaves

2.4 高温胁迫对油茶叶片抗氧化酶活性的影响

由图 4 可知, 高温胁迫下, 不同油茶品种 SOD 活性升高, 多重比较的结果表明, 除岑软 2 号和华鑫外, 高温处理与 CK 处理均有显著差异 ($p < 0.05$), 在高温条件下, 岑软 3 号、赣州油 1 号和赣州油 7 号的 SOD 活性与其他品种之间差异显著 ($p < 0.05$); 此外, 赣无 2 与除岑软 2 号、赣石 83-4、粤韶 75-2 和粤韶 77-1 外的 10 个品种存在显著差异 ($p < 0.05$)。高温胁迫下不同油茶品种的 POD 活性全都显著高于 CK ($p < 0.05$),

在高温条件下, 长林 4 号、长林 40 号、长林 53 号、华金和华硕的 POD 活性显著高于其他 10 个品种的 POD 活性 ($p < 0.05$), 且这 10 个品种间 POD 活性均无显著差异 ($p > 0.05$)。高温胁迫下不同油茶品种的 CAT 活性与 CK 相比均显著升高 ($p < 0.05$), 高温胁迫后粤韶 75-2 的 CAT 活性与其他品种差异显著 ($p < 0.05$), 增幅为 249.90%; 同时, 高温胁迫后的 CAT 活性, 岑软 3 号和粤韶 77-1 间无显著差异 ($p > 0.05$), 但这两个品种与其余品种间存在显著差异 ($p < 0.05$)。

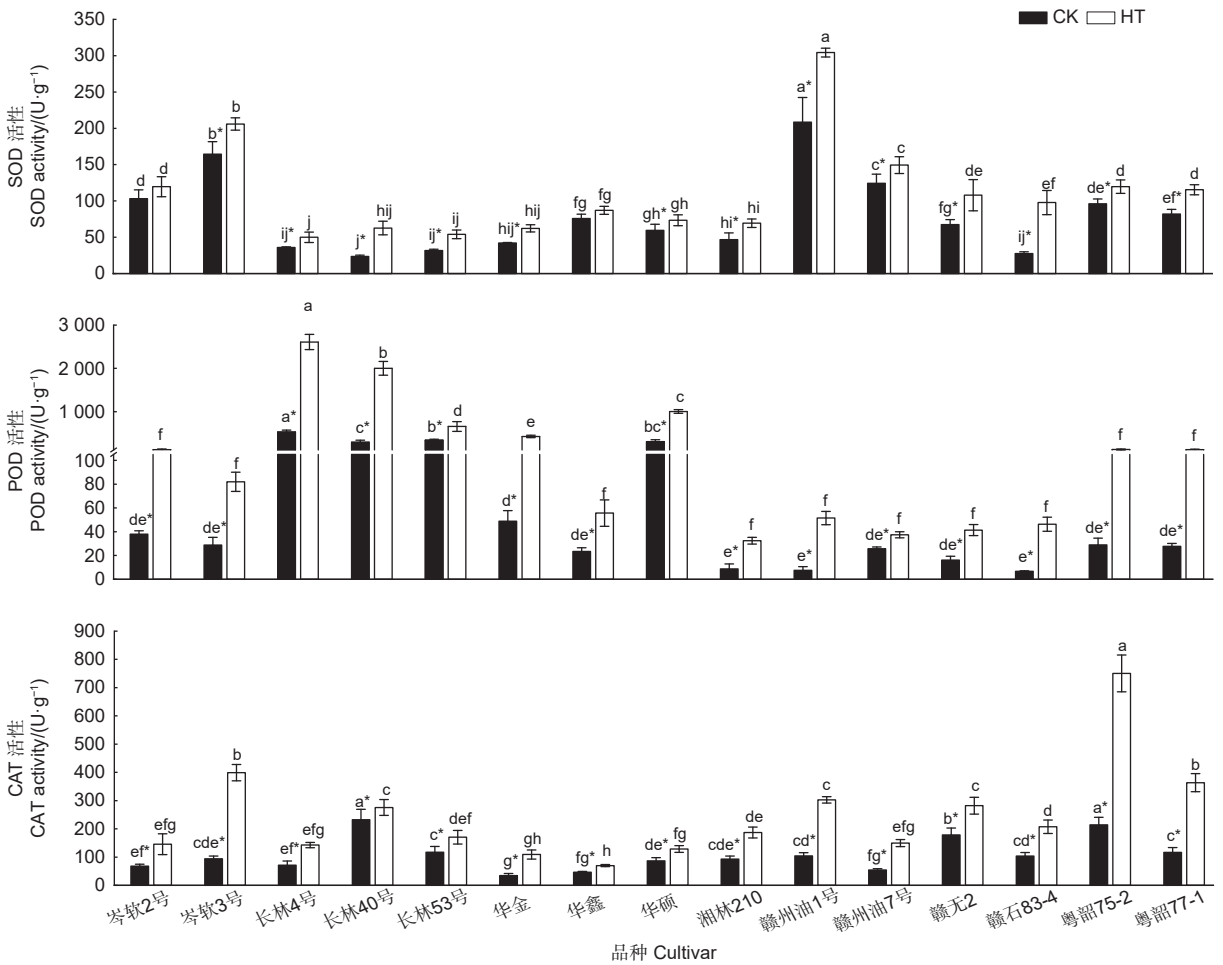


图 4 高温胁迫对不同油茶叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effect of high temperature stress on the antioxidant enzyme activities of different *Camellia oleifera* leaves

2.5 高温胁迫下油茶各项生理指标的相关性分析

对高温胁迫下油茶各项生理指标的耐热系数进行相关性分析, 结果如表 2。由表 2 可知, 干物质含量与叶绿素 b 含量存在显著负相关关系 ($p < 0.05$), 叶绿素 a 含量和叶绿素总含量之间存在极显著相关关系 ($p < 0.01$), 与叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量存在显著相关关系 ($p < 0.05$); 叶绿素 b 含量与叶绿素总含量存在极显著相关关系 ($p < 0.01$), 与可溶性糖含量、SOD 活性存在显著相关关系 ($p < 0.05$); 叶绿素总含量与类胡萝卜素含量存在显著正相关关系, 与 SOD 活性存在显著负相关关系 ($p < 0.05$); 类胡萝卜素含量与 SOD 活性存在显著负相关关系 ($p < 0.05$)。各指标间存在不同程度的相关性, 由此可见, 植物的耐旱性是一个复杂的综合性状, 其耐热性还需要通过多个指标进行判断。

2.6 不同油茶品种耐热性分析及综合评价

对叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总

含量等 9 个生理指标的耐热系数进行主成分分析 (表 3), 提取出 4 个主成分, 累积贡献率为 87.042%, 具有较强的代表性。油茶耐热性评价主成分 1 中叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总含量、类胡萝卜素含量和 SOD 活性的载荷较大, 可反映原始数据的 43.918%; 主成分 2 中可溶性蛋白含量的载荷最大, 可反映原始数据的 18.716%; 决定主成分 3 的主要是 CAT 活性, 可反映原始数据信息中的 13.134%; 决定主成分 4 的主要是可溶性糖含量, 可反映出原始数据中的 11.274%。

为进一步明确 4 个综合指标 (主成分) 对不同油茶品种的贡献度, 根据公式 (7)、(8)、(9) 计算得到各品种在不同综合指标下的隶属函数值、权重和综合评价值 (表 4), 并通过综合评价值 (D 值) 来判断油茶耐热性的强弱。耐热性强弱顺序为华金 > 赣州油 1 号 > 华硕 > 岑软 2 号 >

表 2 油茶各项生理指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of various physiological indicators of *Camellia oleifera* seedlings

指标 Indicators	相关系数 Correlation coefficient										
	RWC	DMC	Chla	Chlb	Chl	Car	MDA	SS	SP	SOD	POD
DMC	0.414										
Chla	0.387	-0.169									
Chlb	0.022	-0.622 [*]	0.601 [*]								
Chl	0.339	-0.273	0.984 ^{**}	0.728 ^{**}							
Car	0.208	-0.015	0.556 [*]	0.397	0.582 [*]						
MDA	-0.161	-0.368	0.109	0.126	0.119	0.308					
SS	-0.113	-0.158	0.171	0.525 [*]	0.254	0.277	-0.126				
SP	0.452	-0.090	0.363	0.360	0.400	0.147	0.304	-0.188			
SOD	-0.166	0.010	-0.491	-0.540 [*]	-0.548 [*]	-0.825 [*]	-0.020	-0.370	-0.055		
POD	-0.279	-0.298	-0.310	-0.022	-0.283	-0.400	0.188	-0.261	0.226	0.490	
CAT	-0.263	-0.086	-0.121	-0.056	-0.128	0.099	-0.205	-0.105	-0.259	-0.322	0.136

注：基于各品种同一生理指标在HT和CK下的测定值求得的耐热系数进行相关性分析，^{*}表示显著相关 ($p < 0.05$)，^{**}表示极显著相关 ($p < 0.01$)。RWC: 相对含水量; DMC: 干物质含量; Chla: 叶绿素a含量; Chlb: 叶绿素b含量; Chl: 叶绿素总含量; Car: 类胡萝卜素含量; MDA: 丙二醛含量; SS: 可溶性糖含量; SP: 可溶性蛋白含量; SOD: SOD活性; POD: POD活性; CAT: CAT活性, 下同

Notes: ^{*} indicates significant correlation ($p < 0.05$), ^{**} indicates highly significant correlation ($p < 0.01$). RWC: relative water content; DMC: dry matter content; Chla: chlorophyll a content; Chlb: chlorophyll b content; Chl: total chlorophyll content; Car: carotenoid content; MDA: malondialdehyde content; SS: soluble sugar content; SP: soluble protein content, SOD: SOD activity; POD: POD activity; CAT: CAT activity, the same below

表 3 主成分在各项指标上的因子载荷及贡献率

Table 3 Factor loadings and contributions of principal components on each indicator

指标 Indicators	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	主成分4 Principal component 4
叶绿素a含量 Chla	0.858	0.270	0.022	-0.195
叶绿素b含量 Chlb	0.777	0.226	0.007	0.500
叶绿素总含量 Chl	0.910	0.280	0.017	-0.078
类胡萝卜素含量 Car	0.789	-0.264	0.173	-0.201
可溶性糖含量 SS	0.461	-0.326	-0.475	0.623
可溶性蛋白含量 SP	0.318	0.781	0.215	-0.084
SOD活性 SOD	-0.807	0.434	-0.246	0.027
POD活性 POD	-0.442	0.501	0.437	0.505
CAT活性 CAT	-0.040	-0.507	0.793	0.173
特征值	3.953	1.684	1.182	1.015
方差贡献率/%	43.918	18.716	13.134	11.274
累积贡献率/%	43.918	62.634	75.768	87.042

湘林 210 > 赣无 2 > 长林 53 号 > 粤韶 75-2 > 粤韶 77-1 > 长林 4 号 > 岑软 3 号 > 华鑫 > 长林 40 号 > 赣州油 7 号 > 赣石 83-4。由表 4 可知, 华金的 D 值最大, 为 0.844, 表明其在高温下具有较强的耐受性, 而赣石 83-4 的 D 值最小, 为 0.174, 说明其对高温胁迫较为敏感。

3 讨论

不同植物品种对高温胁迫的生理响应存在差异, 也会通过多种生理生化过程来调节体内环境以适应高温条件, 高温环境会对植物体内的多种代谢途径产生负面影响^[22-23]。植物叶片中相对含水量能够直接反映植物的保水能力, 叶片干物质含量能够

表 4 高温胁迫下不同油茶品种的隶属函数值 (U) 和综合评价值 (D) 排序

Table 4 Affiliation function values and D-value ranking of different *Camellia oleifera* species under high temperature stress

品种 Indicators	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	D值 D-value	排序 Order
岑软2号	0.735	0.179	0.204	0.493	0.504	4
岑软3号	0.302	0.209	0.255	1.000	0.365	11
长林4号	0.434	0.316	0.253	0.522	0.393	10
长林40号	0.190	0.658	0.344	0.000	0.289	13
长林53号	0.822	0.212	0.137	0.057	0.488	7
华金	1.000	1.000	0.132	0.808	0.844	1
华鑫	0.419	0.247	0.430	0.235	0.360	12
华硕	0.742	0.318	0.423	0.207	0.533	3
湘林210	0.414	0.471	1.000	0.329	0.503	5
赣州油1号	0.487	0.534	0.532	0.788	0.543	2
赣州油7号	0.242	0.000	0.060	0.688	0.220	14
赣无2	0.704	0.209	0.474	0.160	0.492	6
赣石83-4	0.000	0.765	0.000	0.073	0.174	15
粤韶75-2	0.296	0.500	0.530	0.866	0.449	8
粤韶77-1	0.346	0.379	0.373	0.713	0.404	9
权重/ %	50.46	21.50	15.09	12.95		

注: $U(X_1)$: 隶属函数值1; $U(X_2)$: 隶属函数值2; $U(X_3)$: 隶属函数值3; $U(X_4)$: 隶属函数值4; D值: 综合评价值

Notes: $U(X_1)$: affiliation function value 1; $U(X_2)$: affiliation function value 2; $U(X_3)$: affiliation function value 3; $U(X_4)$: affiliation function value 4; D-value: comprehensive evaluation value

间接反映植物对高温环境的耐受性^[24]。本试验的研究结果表明, 在不同油茶品种在受到高温胁迫后, 叶片相对含水量和干物质含量呈现不同程度的降低, 仅从相对含水量和干物质含量这两个指标来看, 相对含水量岑软 2 号下降的幅度最低, 说明其叶片在高温下具有较强的保水能力, 耐热性相对更好, 干物质含量长林 40 号下降幅度最低, 说明高温对其干物质含量的积累造成了较大的影响。

叶绿素在植物感知光能中起重要的作用, 研究证实在外界胁迫条件下叶绿素含量的变化情况能够反映植物的抗性^[25]。本研究中, 在高温胁迫下 15 个油茶品种的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总含量和类胡萝卜素含量均呈下降趋势, 这与前人对东方铁筷子 (*Helleborus orientalis*) 在高温胁迫下叶绿素含量的变化情况一致^[26]。在 15 个油茶品种中, 华金和华硕叶绿素总含量下降最少, 赣石 83-4 叶绿素总含量下降最多, 表明华金和华硕的耐热性要强于赣石 83-4, 隶属函数分析的结果同样也证实了这一结论。

植物长时间处在高温条件下, 会导致膜脂过氧

化, 丙二醛是膜脂过氧化的重要产物之一^[27], 在本研究中丙二醛含量升高的幅度因品种而异, 华鑫、岑软 2 号和岑软 3 号丙二醛含量升高的幅度较低, 长林 4 号、长林 53、华金和赣州油 7 升高的幅度较大, 丙二醛含量上升较大表明在高温胁迫下膜的受损程度越大^[28]。可溶性糖和可溶性蛋白可以有效的维持植物细胞受到外界环境干扰时的稳态, 因此其会在植物受到胁迫时含量上升^[29], 但在本研究中赣石 83-4 的可溶性糖含量出现下降, 这可能是因为高温胁迫下与光合作用光反应有关酶活性的降低或者失活, 导致光合产物的总量降低, 进而造成可溶性糖含量下降的情况^[30]。抗氧化酶可以延缓膜脂的氧化过程, 从而保护细胞内的成分免受损伤, 因此, 在植物受到外界胁迫时, 抗氧化酶活性会提升, 从而保护细胞免受活性氧 (ROS) 损伤^[31-32], 高温胁迫下不同油茶品种的 SOD、POD 和 CAT 活性均上升, 这与韩一林等^[33]的研究结果相吻合, 说明油茶在应对高温胁迫时主要是通过调节 3 种抗氧化酶的活性共同来应对高温胁迫。综上所述, 认为华金、赣州油 1 号、华硕、岑软 2 号

和湘林 210 耐热性较强的原因可能是：在高温环境下能够维持较高的叶绿素含量，以此来降低高温胁迫对叶片形态和光合作用的损伤，同时高温胁迫下形成相应的保护机制，通过调节可溶性蛋白含量以及提高 SOD、POD 活性来保持膜的透性和稳定性^[34-35]。

此外，高温胁迫对植物的危害不仅表现在其生理上，还有外部形态，例如：高温胁迫下，阻碍植物生长^[36]，使植物严重萎蔫、干枯变黄^[37]，加速植物叶片衰老甚至死亡^[38]等。本研究引入了较为全面的生理指标来评价不同油茶品种的耐热性，结合主成分分析的结果，并将 9 个相关性较强的生理指标转换为 4 个全新且独立的综合指标，此方法已在多种农作物和树种上使用，较为科学合理。不过仅从油茶对高温胁迫的生理响应还不足以揭示其耐高温机制，还需要在分子的水平上进行更深层次的分析。

4 结 论

15 个油茶品种应对高温胁迫的方式有所不同，采用主成分分析和隶属函数分析的结果表明：15 个油茶品种的耐热性强弱排序为华金 > 赣州油 1 号 > 华硕 > 岑软 2 号 > 湘林 210 > 赣无 2 > 长林 53 号 > 粤韶 75-2 > 粤韶 77-1 > 长林 4 号 > 岑软 3 号 > 华鑫 > 长林 40 号 > 赣州油 7 号 > 赣石 83-4，在夏季温度较高的地区，建议选用耐热性较强的华金、赣州油 1 号、华硕、岑软 2 号和湘林 210 进行引种栽培，同时可作为亲本来培育耐热新品种。

参 考 文 献：

- [1] WANG M, HE X M, PENG Q, *et al.* Understanding the heat resistance of cucumber through leaf transcriptomics[J]. *Functional Plant Biology:FPB*, 2020, 47(8): 704-715.
- [2] BOMI P, HYOBONG J, EUNYOUNG Y, *et al.* Differential responses of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum*) to long-term heat stress[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(3): 343.
- [3] 张 川, 刘 栋, 王洪章, 等. 不同时期高温胁迫对夏玉米物质生产性能及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55 (19): 3710-3722.
- [4] 窦飞飞, 张利鹏, 王永康, 等. 高温胁迫对不同葡萄品种光合作用和基因表达的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38 (6): 871-883.
- [5] 全培江, 程智慧, 孟焕文. 黄瓜幼苗对高温高湿胁迫的生理响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (6): 85-93 + 103.
- [6] 刘 南, 曲鲁平, 汤行昊, 等. 水分条件和热浪频次对木荷苗木光合特性与生长速率的影响[J]. *林业科学*, 2023, 59 (3): 104-114.
- [7] 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.
- [8] 张燕红, 吴永波, 刘 璇, 等. 高温和干旱胁迫对杨树幼苗光合性能和抗氧化酶系统的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45 (11): 32-38.
- [9] LYNDA D P, DAVID M J S. Big eucalypts grow more slowly in a warm climate: evidence of an interaction between tree size and temperature[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2793-2799.
- [10] 田 丰, 陈银霞, 钟秋平, 等. 油茶花粉直感效应和品种配置研究[J]. *林业科学研究*, 2023, 36 (3): 41-49.
- [11] 张 恒, 申春晖, 陈锐帆, 等. 基于 3 种数学方法的粤北油茶果实性状综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42 (11): 71-79 + 208.
- [12] LUAN F, ZENG J S, YANG Y, *et al.* Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: A review of nutritional constituents, bio-functional properties, and potential industrial applications[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 75: 104242.
- [13] 谭新建, 晏 巢, 钟秋平, 等. 我国油茶良种选育及推广应用[J]. *世界林业研究*, 2023, 36 (2): 108-113.
- [14] 何小三, 王玉娟, 徐林初, 等. 干旱胁迫对不同油茶品种叶片解剖结构的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40 (10): 1-17.
- [15] 陈永忠, 罗 健, 陈隆升, 等. 湖南省油茶旱害及防治对策[J]. *经济林研究*, 2014, 32 (3): 22-29 + 53.
- [16] 丁少净, 钟秋平, 袁婷婷, 等. 干旱胁迫对油茶花苞生长及产量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41 (05): 197-202.
- [17] 朱亚迪, 王慧琴, 王洪章, 等. 不同夏玉米品种大喇叭口期耐热性评价和鉴定指标筛选[J]. *作物学报*, 2022, 48 (12): 3130-3143.
- [18] 肖继兵, 刘 志, 辛宗绪, 等. 基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40 (6): 34-44.
- [19] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 凌 瑞, 戴中武, 代晓雨, 等. 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.
- [22] 常明娟, 楚宗艳, 杜玉倍, 等. 高温胁迫下小麦生理指标的主成分分析及综合评价[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2023, 49 (1): 1-11.
- [23] JAMES P S, ALI S, MADELINE M B, *et al.* Contrasting anther glucose-6-phosphate dehydrogenase activities between two bean varieties suggest an important role in reproductive heat tolerance[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(7): 2185-2199.
- [24] 吕丽华, 韩江伟, 张经廷, 等. 抗逆广适小麦品种共性特征分析[J].

中国农业科学, 2023, 56 (11): 2064-2077.

- [25] DASH D, PATTNAIK D, PANDA D, *et al.* Effect of low light stress on leaf chlorophyll a, b, a + b, a/b, catalase, peroxidase, SOD and yield of long duration rice varieties (*Oryza sativa* L.) [J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2022, 34(22): 184-193.
- [26] 靳海笛, 赵雷, 史小华, 等. 9个东方铁筷子品种的耐热性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51 (6): 112-122.
- [27] 吴久赞, 康苇佳, 曾晓燕, 等. 不同品种葡萄对高温的生理响应及耐热性评价[J]. *西北植物学报*, 2019, 39 (6): 1075-1084.
- [28] 杨佳鑫, 李庆卫, 郭子燕, 等. 3个梅花品种幼苗耐盐性综合评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47 (8): 65-74.
- [29] 张佳平, 李丹青, 聂晶晶, 等. 高温胁迫下芍药的生理生化响应和耐热性评价[J]. *核农学报*, 2016, 30 (9): 1848-1856.
- [30] 张映婵, 韩胜男, 王璐, 等. 六个大丽花品种对高温胁迫的生理响应及耐热性综合评价[J]. *植物科学学报*, 2023, 41 (2): 245-255.
- [31] JUNAID M R, WU S G, DUAN M Z, *et al.* Antioxidant metabolites in primitive, wild, and cultivated *Citrus* and their role in stress tolerance [J]. *Molecules*, 2021, 26(19): 5801.
- [32] 司鹏, 刘连涛, 孙红春, 等. 基于生理指标的棉花耐高温品种筛选及与根系表型关系分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30 (12): 1949-1958.
- [33] 韩一林, 王鑫朝, 许馨露, 等. 毛竹幼苗抗氧化酶和AsA-GSH循环对高温干旱及协同胁迫的响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35 (2): 268-276.
- [34] 刘金秀, 张松彦, 周建. 镉胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36 (3): 168-178.
- [35] GAO Y Y, LIU Y Q, CHENG B, *et al.* Response of fluorescence and chlorophyll physiological characteristics of typical urban trees to ozone stress [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(11): 1885.
- [36] 张蓓蓓, 张辉, 甘卓亭, 等. 干旱高温胁迫对小麦生长及木聚糖含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34 (1): 186-192 + 228.
- [37] 周娜, 郑阳, 陆景伟, 等. 高温胁迫对萝卜幼苗生长及相关基因表达的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42 (7): 1161-1168.
- [38] 吴丽倩, 王蕊, 杨玉荣, 等. 高温对玉米叶片衰老及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37 (S1): 110-115.

Evaluation of the Physiological Response and Heat Tolerance of Seedlings of Different *Camellia oleifera* Cultivars to High Temperature Stress

FU Zhi-qiang¹, ZHANG Heng¹, LIU Zhen¹, XI Ru-chun^{1,2}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] In recent years, high temperatures occur frequently in the south of China, and the high-temperature environment has become an important limiting factor for the growth and development of *Camellia oleifera*. In order to investigate the physiological response to high-temperature stress and differences in heat tolerance of different *C. oleifera* varieties, for selecting the the varieties suitable for planting in high-temperature areas. [Methods] Based on the 3 year-old grafted seedlings of 15 varieties currently planted in various provinces (regions) of China, the relative leaf water content, dry matter content, photosynthetic pigments, osmotic regulators and antioxidant enzyme activities of 12 physiological and biochemical indexes of the varieties under the high-temperature stress (temperature increase of the plastic film) were investigated and measured. And the principal component analysis and the affiliation function methods were used to comprehensively analyze the tolerance ability assessment. [Results] Under high temperature stress, the relative water content and dry matter content of leaves of the varieties decreased; the content of photosynthetic pigments decreased, and most of them havd significant differences ($p < 0.05$); the content of malondialdehyde, antioxidant enzyme activity and osmotic regulating substances increased; and the analysis of the affiliation function showed that there were differences in the heat tolerance of the 15 varieties, and the variety Hwajin had the highest heat tolerance, followed by Ganzhouyou, Huashuo, Cenruan NO.2, Xianglin NO.210, Ganwu NO.2, Changlin No.53, Yueshao NO.75-2, Yueshao NO.77-1, Changlin NO.4, Cenruan NO.3, Huaxin, Changlin NO.40, and Ganzhouyou NO.7, Ganshi NO.83-4. [Conclusion] Among the 15 varieties, Huajin, Ganzhouyou NO.1, Huashuo, Cenruan NO.2, Xianglin NO.210 have strong heat resistance and are suitable for planting in high-temperature areas.

Keywords: *Camellia oleifera*; high temperature stress; physiological response; heat resistance; comprehensive assessment

(责任编辑: 崔 贝)