

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.010

论文标题： 高温胁迫对2个油茶品种幼苗的生理影响及耐热性评价

作　　者： 彭兵阳，张盼盼，焦 悦，等

收稿日期： 2025-06-21

引文格式： 彭兵阳,张盼盼,焦悦,等.高温胁迫对2个油茶品种幼苗的生理影响及耐热性评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):102-110.

Peng B Y, Zhang P P, Jiao Y, et al. Physiological effects of high-temperature stress on seedlings of two *Camellia oleifera* cultivars and heat tolerance evaluation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):102-110.

相关论文推荐

Recommended articles

油茶分子育种研究进展

Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*

干旱胁迫对不同油茶品种叶片解剖结构的影响

Effects of drought stress on leaf anatomical structure of different *Camellia oleifera* cultivars

干旱-复水处理对3个油茶良种的生长与光合生理特性的影响

Effects of drought and rehydration treatment on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of three *Camellia oleifera* cultivars

油茶‘湘林 210’抗干旱特性研究

Study on drought resistance characteristics of ‘Xianglin 210’ *Camellia oleifera*

不同油茶品种对干旱胁迫的响应及其抗旱性综合评价

Responses of different *Camellia oleifera* varieties to drought stress and the comprehensive evaluation of their drought resistance

油茶*bHLH*基因家族鉴定与响应干旱胁迫的基因表达分析

Identification of bHLH gene family in *Camellia oleifera* and analysis of its expression under drought stress

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.010 http: //qks.csuft.edu.cn

高温胁迫对 2 个油茶品种幼苗的生理影响及耐热性评价

彭兵阳[1]，张盼盼[1]，焦　悦[1]，詹文勇[2]，吕佳斌[1]

（1. 安徽农业大学 a. 林学与园林学院；b. 安徽省林木资源培育重点实验室，安徽 合肥 230036；
2. 安徽德昌苗木有限公司，安徽 六安 231340）

摘　要：【目的】筛选出耐热性较强的油茶品种，为选育耐热性强的油茶品种提供理论依据。【方法】采用智能温室进行高温胁迫的方法对‘大别山 1 号’‘长林 53 号’2 个品种的油茶幼苗进行盆栽试验。设置 0（CK）、4、7、14、21、28、35、42、49 d 共 9 个时间梯度，分别测定其相对含水量、相对电导率和超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性，以及丙二醛、过氧化氢、可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸含量共 10 个生理生化指标。采用各生理指标的平均隶属函数值，对 2 个油茶品种的耐热性进行综合评价。【结果】1）2 个油茶品种叶片相对含水量随高温处理时间的延长持续下降：胁迫处理 7 d 后，叶片相对含水量下降速度加快；胁迫处理 49 d 后，2 个品种的叶片相对含水量均降至最低值，其中‘大别山 1 号’为 71.40%，‘长林 53 号’为 63.32%。相对电导率、丙二醛含量、过氧化氢含量均随高温处理时间的延长持续上升，49 d 时达到最大值。2）2 个品种叶片的超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性呈先上升后下降的趋势。‘大别山 1 号’叶片过氧化氢酶活性呈持续上升趋势，‘长林 53 号’在胁迫前期呈上升趋势并在胁迫 42 d 后开始下降。3）‘大别山 1 号’叶片脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量持续上升。‘长林 53 号’叶片脯氨酸、可溶性蛋白含量在胁迫前期持续上升，42 d 时上升到最大值，随后下降；其可溶性糖含量在胁迫前期持续上升，35 d 时上升到最大值，随后开始下降。4）‘大别山 1 号’的平均隶属函数值为 0.559，‘长林 53 号’的平均隶属函数值为 0.449，‘大别山 1 号’耐热性优于‘长林 53 号’。【结论】在高温胁迫下，2 个油茶品种幼苗的生理响应模式存在差异。综合隶属函数评价结果表明，‘大别山 1 号’的平均隶属函数值（0.559）高于‘长林 53 号’（0.449），‘大别山 1 号’的耐热性优于‘长林 53 号’。

关键词：油茶；高温胁迫；耐热性；生理影响

中图分类号：S794.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0102-09

Physiological effects of high temperature stress on seedlings of two *Camellia oleifera* cultivars and heat tolerance evaluation

Peng Bingyang[1], Zhang Panpan[1], Jiao Yue[1], Zhan Wenyong[2], Lyu Jiabin[1]

(a. College of Forestry and Landscape Architecture; b. Key Laboratory of Forest Resource Cultivation in Anhui Province, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 2. Anhui Dechang Seedling Co., Ltd., Lu'an 231340, Anhui, China)

Abstract:【Objective】To screen out *Camellia oleifera* cultivars with strong heat tolerance and provide a theoretical basis for breeding new heat-tolerant varieties.【Method】A pot experiment was conducted using the method of high-temperature stress in an intelligent greenhouse on seedlings of two *C. oleifera* cultivars, 'Dabieshan 1' and 'Changlin 53'. Nine time gradients were set: 0 (CK), 4, 7, 14, 21, 28, 35, 42 and 49 d. Ten physiological and biochemical indicators were measured, including relative water content, relative electrical conductivity, malondialdehyde content, hydrogen peroxide content, superoxide dismutase activity, peroxidase activity, catalase activity, soluble sugar content, soluble protein content, and free proline content. The heat tolerance of the two *C. oleifera* cultivars was comprehensively evaluated using the average membership function value of each physiological indicator.【Result】1) The leaf relative

收稿日期（Received）：2025-06-21　　**修订日期**（Revised）：2025-09-02

基金项目：安徽省自然科学基金青年项目（2208085QC92）；安徽省高等学校科学研究重点项目（2024AH050484）；校级大学生创新创业训练计划项目（X202410364499）。

第一作者：彭兵阳（1520730094@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**吕佳斌（lvjiabin@ahau.edu.cn），讲师，博士，硕士研究生导师。

引文格式：彭兵阳 , 张盼盼 , 焦悦 , 等 . 高温胁迫对 2 个油茶品种幼苗的生理影响及耐热性评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):102-110.

Peng B Y, Zhang P P, Jiao Y, et al. Physiological effects of high-temperature stress on seedlings of two *Camellia oleifera* cultivars and heat tolerance evaluation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):102-110.

* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。

Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

water content of both cultivars decreased continuously with the extension of high-temperature treatment, and the decline accelerated after 7 days of stress. After 49 days of high-temperature treatment, the leaf relative water content of both cultivars reached its minimum, with ‘Dabieshan 1’ at 71.40% and ‘Changlin 53’ at 63.32%. The relative electrical conductivity, malondialdehyde content, and hydrogen peroxide content increased continuously with the extension of high-temperature treatment and reached their maximum at the 49th day; 2) The activities of superoxide dismutase and peroxidase in the leaves of both cultivars first increased and then decreased. The catalase activity in ‘Dabieshan 1’ leaves showed a continuous upward trend, while that in ‘Changlin 53’ increased in the early stage of stress and began to decrease after 42 d of stress; 3) The proline, soluble sugar, and soluble protein contents in ‘Dabieshan 1’ leaves continued to increase. In ‘Changlin 53’ leaves, proline and soluble protein contents continued to increase in the early stage of stress, reached their maximum at the 42th day, and then decreased; soluble sugar content continued to increase in the early stage of stress, reached its maximum at the 35th day, and then began to decrease; 4) The average membership function value of ‘Dabieshan 1’ was 0.559, and that of ‘Changlin 53’ was 0.449, indicating that the heat tolerance of ‘Dabieshan 1’ was superior to that of ‘Changlin 53’.【Conclusion】Under high-temperature stress, the physiological response patterns of the two *C. oleifera* cultivars seedlings were different. The comprehensive membership function evaluation showed that the average membership function value of ‘Dabieshan 1’ (0.559) was higher than that of ‘Changlin 53’ (0.449). The heat tolerance of ‘Dabieshan 1’ was superior to that of ‘Changlin 53’.

Keywords: *Camellia oleifera*; high-temperature stress; heat tolerance; physiological effects

油茶 *Camellia oleifera*，山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia*，常绿小乔木或灌木，是我国特有的木本油料树种，与油橄榄 *Olea europaea*、油棕 *Elaeis guineensis* 和椰子 *Cocos nucifera* 并称世界 4 大木本油料植物 [1]。油茶籽榨取的茶油不饱和脂肪酸含量高达 90%，且含有角鲨烯、植物甾醇、维生素 E 等营养物质，被称为“东方橄榄油”[2]。油茶适应性强且耐干旱贫瘠，生长于山地及丘陵地带，近些年成为南方重点发展的油料作物。我国油茶种植面积逐渐扩大，2025 年我国油茶种植面积达到 6×10^6 hm^2，但存在花多果少、结实率低等现象；造成这种现象的原因包括品种不良、管理粗放、树体老化以及授粉品种配置不合理等 [3]。

影响植物生长发育过程的非生物因子有很多，比如盐渍、干旱、高温、寒害等；其中，温度是影响植物生长发育的重要生态因子之一 [4]。近些年来，全球气候变暖，中国南方地区夏季高温干旱天气频发，对植物的生长发育造成了严重破坏，给农业、林业生产带来巨大影响 [5]。研究表明，高温胁迫已对山桐子 *Idesia polycarpa*[6]、杨树 *Populus*[7] 等重要林木造成严重影响，可通过改变植株表型、降低光合效率及扰乱生理生化过程，进而制约其正常生长发育 [8]。

油茶虽具有较强的环境适应能力，但持续的高温、干旱会影响油茶的正常生长发育，严重时会导致油茶植株生长受阻或死亡。夏、秋季是油茶果实膨大、油脂转化和花芽成熟的关键时期。这一时期的高温干旱会影响油茶产量和品质，严重时还会导致新造油茶林死亡 [9]。历史观测数据表明，2010 年西南地区春季持续干旱造成油茶林大面积死亡 [10]；2013 年贵州东部夏季异常高温导致油茶幼林生长受阻，同期湖南省多个油茶苗圃也出现苗木大量死亡和叶片枯萎灼伤现象 [11]；2016—2017 年麻城市高温干旱导致大量油茶林出现落花落果现象 [12]；2021 年湖南衡阳地区连续高温天气造成油茶出油率显著降低 [12]；2022 年渝东地区夏季极端高温、干旱不仅影响油茶果实发育，而且对油茶幼林、成林造成严重影响 [13]。

‘大别山 1 号’是安徽德昌苗木公司选育出的油茶良种。该品种果皮偏薄，鲜出籽率、种仁含油率和果油率高，抗病性较强，可配性高。‘长林 53 号’是中国林业科学研究院亚热带林业研究所选育的油茶品种。该品种枝条粗壮、果大、叶子浓密，干籽出仁率和干仁含油率高。目前，‘大别山 1 号’与‘长林 53 号’均为安徽省主栽油茶品种。本研究通过测定和比较其高温胁迫下的生理生化差异，筛选出抗高温能力强的油茶品种，为油茶耐热生理机制研究和耐热品种选用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究材料

试验材料为安徽农业大学与安徽德昌苗木有限公司共同选育的油茶良种‘大别山 1 号’（品种号：皖 S-SC-CO-022-2014）和安徽省主推的油茶品种‘长林 53 号’（品种号：国 S-SC-CO-012-2008）1 年生嫁接苗。苗木均来自安徽省六安市舒城县河棚镇油茶苗木资源圃，并于 2024 年 4 月移入安徽农业大学农翠园（30°57′ ～ 32°32′N，116°41′ ～ 117°58′E）。该地属亚热带季风湿润气候，年均气温 15.7 ℃，年均降水量 1 000 mm。

2024 年 4 月，将 2 个品种的幼苗栽入高为 13 cm、内口径为 13 cm 的花盆中进行缓苗（每盆

1 株）。培养基质为泥炭土与蛭石（体积比为 3∶1）。经过 2 个月的缓苗期，挑选出生长健壮且长势一致的植株进行试验。每个品种各选取 54 株。

1.2 研究方法

试验于 2024 年 7 月开始进行。将生长状况良好且基本一致的 2 个油茶品种的盆栽苗移入人工智能温室。温室白天（6:00—18:00）温度设置为 45 ℃，夜间（18:00—次日 6:00）温度设置为 35 ℃，温度误差控制在 ±1 ℃以内。适时进行浇水。在试验的第 0、4、7、14、21、28、35、42、49 天采集植株自顶端向下的第 3—5 片功能叶，其中第 0 天为对照组（CK）。将采集的叶片用锡箔纸包裹后快速投入液氮速冻，随后置于 −80 ℃超低温冰箱保存，用于生理生化指标的测定；叶片相对含水量和相对电导率所需样品同时采集，立即进行测定。每个处理设置 3 次重复。

1.3 测定指标

1.3.1 相对含水量

相对含水量（Relative water content，RWC）的测定参考何小三等 [14] 的方法。首先用电子天平测定新鲜叶片质量，记为鲜质量（m_A）；随后用蒸馏水浸泡叶片，使叶片吸水达到饱和状态（约 24 h）；然后从蒸馏水中取出叶片，用吸水纸擦干后测定饱和质量（m_B）；再将样品置于烘箱内，温度设置为 105 ℃，确保完全脱水后取出（约 12 h），冷却后称取质量（m_C）。叶片相对含水量（W）的计算公式如下：

$$W=(m_A-m_C)/(m_B-m_C)\times 100\%。 \quad (1)$$

1.3.2 相对电导率

相对电导率（Relative electrical conductivity，REC）的测定参考白杨 [15] 的方法。取新鲜油茶叶片，蒸馏水清洗干净后，用打孔器打孔。采用电子天平准确称取 0.5 g 叶片样品，装入盛有 20 mL 蒸馏水的玻璃试管中，随后抽真空 3 次，每次 1 min，于室温下静置 4 h，每 1 h 晃动 1 次试管，测电导率 γ_1；盖上试管盖放入沸水中水浴 10 min，室温冷却 10 min 后测电导率 γ_2，蒸馏水电导率记为 γ_0。叶片相对电导率（γ）的计算公式如下：

$$\gamma=(\gamma_1-\gamma_0)/(\gamma_2-\gamma_0)\times 100\%。 \quad (2)$$

1.3.3 生理生化指标测定

本研究采用北京索莱宝科技有限公司的超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）活性检测试剂盒、植物可溶性糖（Soluble sugar，SS）含量检测试剂盒、过氧化物酶（Peroxidase，POD）活性检测试剂盒分别测定 SOD 活性、SS 含量和 POD 活性，采用苏州格锐思生物科技有限公司的脯氨酸（Free proline，Pro）含量检测试剂盒、丙二醛（Malondialdehyde，MDA）含量检测试剂盒、过氧化氢酶（Catalase，CAT）活性检测试剂盒、可溶性蛋白（Soluble protein，SP）含量检测试剂盒、过氧化氢（H_2O_2）含量检测试剂盒分别测定 Pro 含量、MDA 含量、CAT 活性、SP 含量和 H_2O_2 含量。所有指标的具体操作步骤均严格按照对应试剂盒说明书执行。

1.4 数据分析

本研究使用 Excel 2019 软件进行数据处理，使用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析，使用 Graphpad 10.0 软件绘制图表。

基于隶属函数法对 2 个油茶品种的耐热性进行综合评价（U）[16]。根据指标与耐热性的正、负相关性情况，采用以下 2 种不同的计算公式。

当指标与耐热性呈正相关时：

$$U(X_{ij})=[(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})]\times 100\%。 \quad (3)$$

当指标与耐热性呈负相关时：

$$U(X_{ij})=[1-(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})]\times 100\%。 \quad (4)$$

式中：X_{ij} 表示第 i 个品种第 j 个指标在某一时间点的测定值，X_{max} 为和 X_{min} 分别为所有品种所有时间点中该指标的最大值和最小值。将所有指标的隶属值相加后求其平均值，平均值越大，耐热性越强。

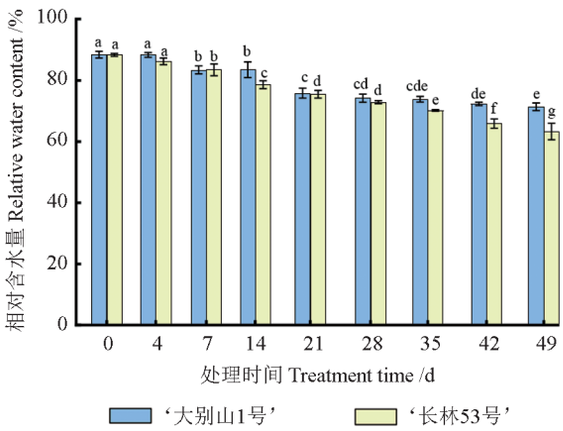
2 结果与分析

2.1 高温胁迫对油茶幼苗细胞膜系统的影响

由图 1 可知，‘大别山 1 号’和‘长林 53 号’2 个油茶品种幼苗叶片 RWC 随着高温处理时间的延长呈现下降趋势。在胁迫前 4 d，叶片 RWC 均无显著变化，从第 7 d 开始叶片 RWC 下降速度加快，且均在处理 49 d 后达到最低值（‘大别山 1 号’为 71.40%，‘长林 53 号’为 63.32%）。与 CK 相比，处理 49 d 的‘大别山 1 号’叶片 RWC 降低了 19.72%，‘长林 53 号’降低了 28.29%，‘长林 53 号’叶片 RWC 下降幅度大于‘大别山 1 号’。

随着高温胁迫时间的延长，2 个油茶品种叶片 REC 呈现上升趋势（图 2）。‘大别山 1 号’，在高温胁迫下前 21 d 叶片 REC 变化幅度不大，说明其细胞膜没有明显受损；处理 28 d 时叶片 REC 出现明显上升，与 CK 相比差异显著。‘长林 53 号’，在处理 7 d 时叶片 REC 与 CK 相比显著上升，在 4 ～ 14 d 时缓慢上升，21 d 后开始快速上升。2 个

油茶品种幼苗叶片 REC 均在处理 49 d 后达到最大值，‘大别山 1 号’为 31.75%，‘长林 53 号’为 38.41%，分别比 CK 增加 100.95% 和 139.46%。



不同小写英文字母表示同一品种不同时间下的显著性差异（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different time points within the same cultivar ($P < 0.05$). The same below.

图 1　高温胁迫下 2 个油茶品种叶片相对含水量的变化
Fig. 1　Changes in leaf relative water content of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

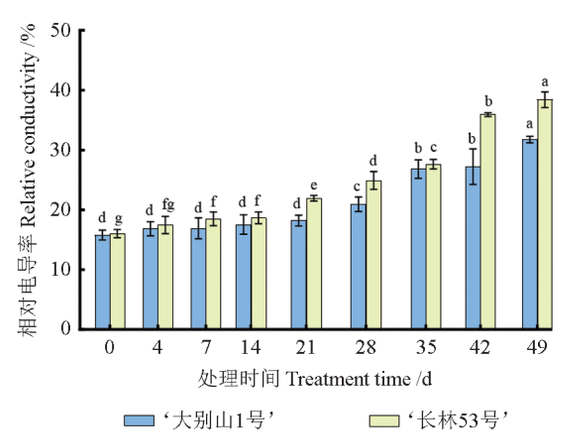


图 2　高温胁迫下 2 个油茶品种叶片相对电导率的变化
Fig. 2　Changes in leaf relative electrical conductivity of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

由图 3 可以看出，随着高温处理时间的延长，2 个油茶品种幼苗叶片 MDA 含量呈持续上升趋势。‘大别山 1 号’，在处理前 4 d MDA 含量无显著增加。‘长林 53 号’，在胁迫 4 d 时叶片 MDA 含量显著提升，与 CK 相比差异显著。‘大别山 1 号’和‘长林 53 号’均在高温处理 49 d 后叶片 MDA 含量达到最大值，分别为 70.44、89.92 nmol/g，分别比 CK 增加了 146.35% 和 196.83%。

随着高温胁迫时间的延长，2 个油茶品种幼苗叶片 H_2O_2 含量持续增加（图 4），表明细胞膜结构损伤程度持续加深。在胁迫前期，2 个油茶品种叶片 H_2O_2 含量差异不大，整体来看‘大别山 1 号’叶片 H_2O_2 含量随着处理时间缓慢增加，而‘长林 53 号’叶片 H_2O_2 含量在胁迫后期增幅高于‘大别山 1 号’。‘大别山 1 号’和‘长林 53 号’叶片 H_2O_2 含量均在处理 49 d 时达到最大值，分别为 6.95、8.30 μmol/g，分别比 CK 增加 48.93% 和 110.30%。

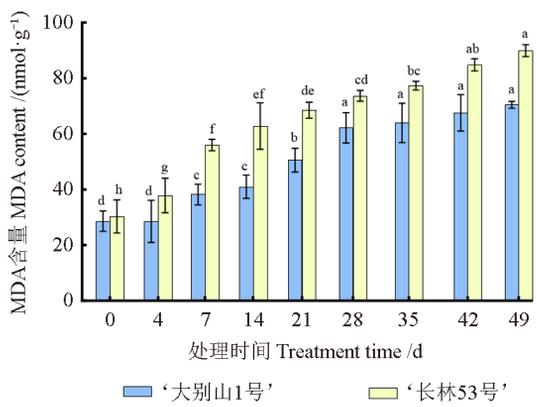


图 3　高温胁迫下 2 个油茶品种丙二醛含量的变化
Fig. 3　Changes in MDA content in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

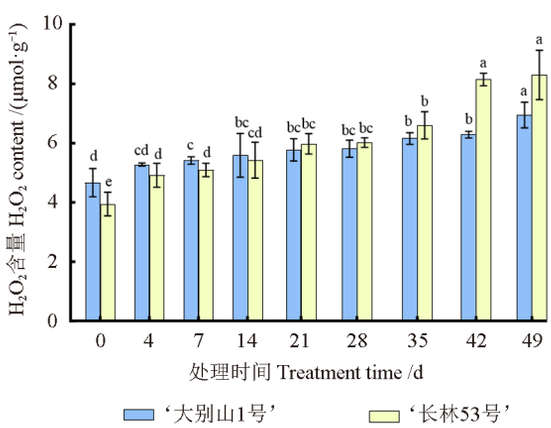


图 4　高温胁迫下 2 个油茶品种 H_2O_2 含量的变化
Fig. 4　Changes in H_2O_2 content in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

2.2　高温胁迫对油茶幼苗抗氧化酶系统的影响

如图 5 所示，高温处理下 2 个油茶品种叶片 SOD 活性与 CK 相比显著提高，并且随着高温胁迫时间的持续，SOD 活性均呈先上升后下降的趋势。‘大别山 1 号’，叶片 SOD 活性在处理 28 d 时达到峰值 1.44 U/mg，与 CK 相比增加 1 944.08%；之后 SOD 活性开始下降；在胁迫 49 d 时，SOD 活性为 0.54 U/mg，与 CK 相比差异显著。‘长林 53 号’，在处理 42 d 时叶片 SOD 活性最高（0.89 U/mg），与 CK 相比增加 956.30%。

随着高温胁迫的持续，2 个油茶品种幼苗叶片 POD 活性呈先上升后下降的趋势（图 6）。‘大别山 1 号’，叶片 POD 活性在处理 21 d 时达到最大

值（13.80 U/mg），与 CK 相比增加 1 136.00%；处理 49 d 时，叶片 POD 活性仍维持较高水平，与 CK 相比差异显著。‘长林 53 号’，在处理 14 d 时叶片 POD 活性最高，为 12.59 U/mg，与 CK 相比增加 1 213.20%；在处理 49 d 时，叶片 POD 活性为 1.28 U/mg，与 CK 相比无显著差异。

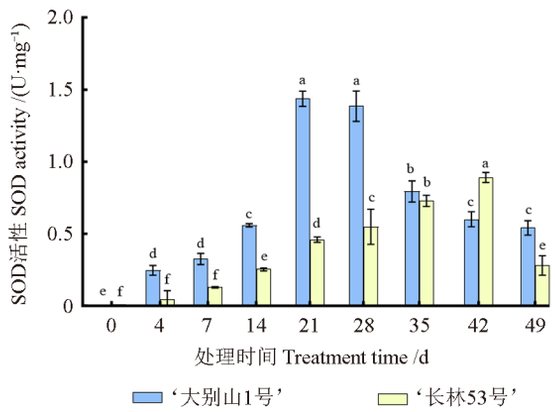


图 5 高温胁迫下 2 个油茶品种超氧化物歧化酶活性的变化
Fig. 5 Changes in SOD activity in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

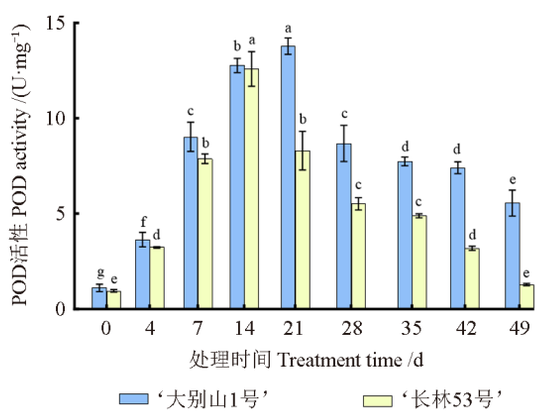


图 6 高温胁迫下 2 个油茶品种过氧化物酶活性的变化
Fig. 6 Changes in POD activity in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

如图 7 所示，随着高温处理时间的延长，‘大别山 1 号’叶片 CAT 活性呈逐渐上升趋势，并在处理 49 d 时活性最高，为 115.48 μmol/(min·g)，与 CK 相比增加了 819.49%。‘长林 53 号’随着高温处理时间的延长，其叶片 CAT 活性表现出先上升后下降的趋势，并在处理 42 d 时活性最高，达到了 131.92 μmol/(min·g)，与 CK 相比增加了 731.84%。

2.3 高温胁迫对油茶幼苗渗透调节物质的影响

随着高温处理时间的延长，‘大别山 1 号’叶片 Pro 含量呈逐渐上升的趋势（图 8），并在胁迫 49 d 时达到最大值，由 CK 的 46.83 μg/g 增加至 179.36 μg/g，增幅 283.00%。‘长林 53 号’叶片 Pro 含量在高温胁迫前期呈逐渐上升趋势，在处理 42 d 时达到最大值，由 CK 的 53.65 μg/g 增加至 196.67 μg/g，增幅 266.58%；而 49 d 时其 Pro 含量为 144.72 μg/g，与 CK 相比差异显著。

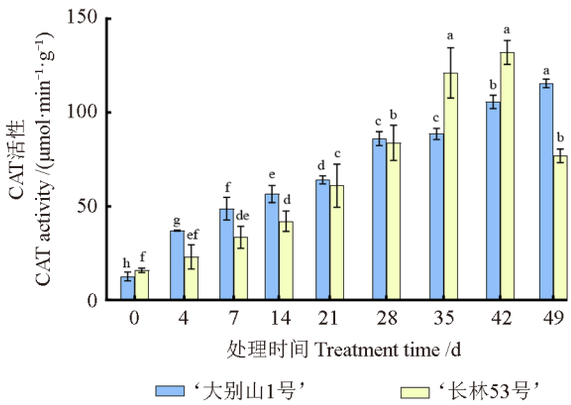


图 7 高温胁迫下 2 个油茶品种过氧化氢酶活性的变化
Fig. 7 Changes in CAT activity in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

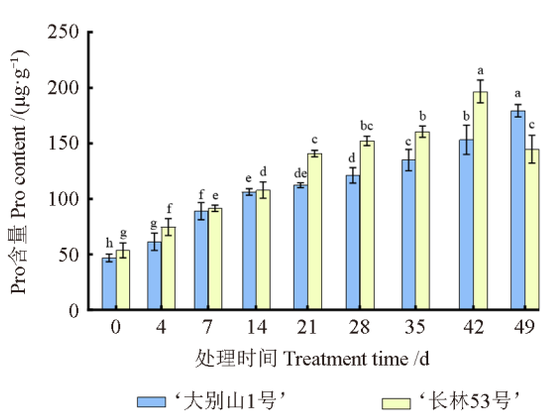


图 8 高温胁迫下 2 个油茶品种游离脯氨酸含量的变化
Fig. 8 Changes in free Procontent in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

由图 9 可知，‘大别山 1 号’叶片 SS 含量随高温处理时间的延长呈持续上升的趋势，‘长林 53 号’叶片 SS 含量则先上升后下降。‘大别山 1 号’，在处理 49 d 时叶片 SS 含量达到最大值（0.36 mg/g），与 CK 相比增加 80.00%。‘长林 53 号’，在处理 35 d 时叶片 SS 含量达到最大值（0.34 mg/g），比 CK 增加 88.89%；在胁迫 42 d 时，SS 含量开始下降；胁迫 49 d 时，SS 含量为 0.24 mg/g，但仍显著高于 CK。

由图 10 可知，随着高温处理时间的延长，‘大别山 1 号’叶片中 SP 含量呈持续上升趋势，并在处理 49 d 时达到最大值（0.87 mg/g），与 CK 相

比增加 163.64%。‘长林 53 号’，叶片 SP 含量则呈先上升后下降的趋势；在高温胁迫 7 d 时其叶片 SP 含量为 0.39 mg/g，与 CK 无显著差异；在处理 42 d 时其叶片 SP 含量达到最大值（0.84 mg/g），与 CK 相比增加 140.00%；胁迫 49 d 时 SP 含量表现为下降趋势，但仍显著高于 CK。

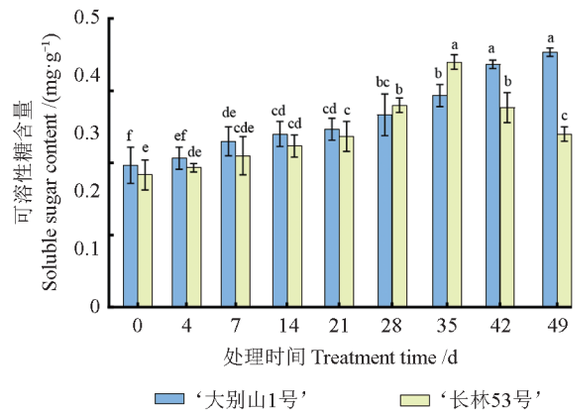


图 9　高温胁迫下 2 个油茶品种可溶性糖含量的变化
Fig. 9　Changes in soluble sugar content in leaves of two *C. oleifera* cultivars under high-temperature stress

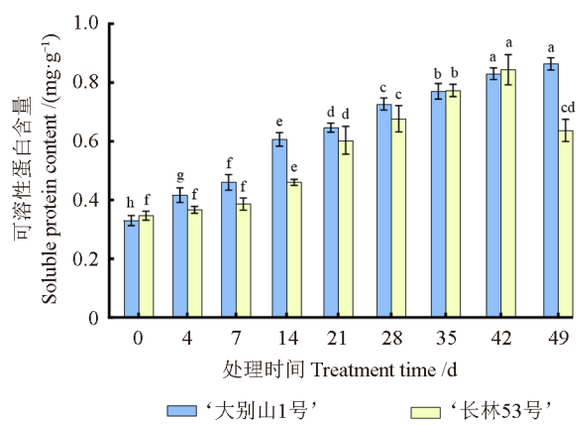


图 10　高温胁迫下 2 个油茶品种可溶性蛋白含量的变化
Fig. 10　Changes in soluble protein content of two *C. oleifera* cultivars under high temperature stress

2.4　隶属函数综合分析

由表 1 可知，‘大别山 1 号’的综合平均隶属函数值为 0.559，高于‘长林 53 号’的 0.449。其中，‘大别山 1 号’在 RWC、REC、MDA 含量、SOD 活性、CAT 活性、H_2O_2 含量、POD 活性、SS 含量、SP 含量共 9 项指标上的隶属函数值均高于‘长林 53 号’；而‘长林 53 号’仅在 Pro 积累上表现出一定优势，整体抗逆性弱于‘大别山 1 号’。综合分析表明，‘大别山 1 号’在高温胁迫下具有更稳定的细胞膜结构、更强的抗氧化酶活性和更优的渗透调节能力，其耐热性优于‘长林 53 号’。

表 1　2 个油茶品种耐热性综合评价
Table 1　Comprehensive evaluation of heat tolerance in two *C. oleifera* cultivars

指标 Index	隶属函数值 Membership function value	
	‘大别山 1 号’ ‘Dabieshan 1’	‘长林 53 号’ ‘Changlin 53’
相对含水量 Relative water content	0.626	0.506
相对电导率 Relative electrical conductivity	0.755	0.620
丙二醛含量 MDA content	0.649	0.413
过氧化氢含量 Hydrogen peroxide content	0.581	0.518
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.454	0.255
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.467	0.443
过氧化物酶活性 POD activity	0.529	0.340
可溶性糖含量 SS content	0.536	0.428
可溶性蛋白含量 SP content	0.559	0.443
游离脯氨酸含量 Pro content	0.432	0.520
平均值 Average value	0.559	0.449
排名 Ranking	1	2

3　讨　论

3.1　高温胁迫下油茶幼苗叶片细胞膜系统与耐热性的关系

高温会对植物造成不可逆的损伤，植物受到高温胁迫的时间越长，伤害越严重。叶片是植物进行正常生理活动的重要器官，其形态结构的改变往往影响着植物的生长发育 [17]。RWC 是代表植物水分状况的重要指标，在高温胁迫下，其含量的变化可反映组织的抗脱水能力 [18]。在本试验中，随着高温处理时间的延长，2 个油茶品种的叶片 RWC 持续降低；胁迫 49 d 时，叶片 RWC 达到最低值，表明细胞膨胀力减小、水分供应不能达到细胞扩张所需 [19]。这种现象也出现在牡丹 *Rhododendron*[15] 和杜鹃 *Paeonia suffruticosa*[16] 中。

细胞膜是细胞与外界环境进行物质交换的具有选择通透性的屏障。当植物受到高温胁迫时，细胞裂解、电解质外渗，影响植物细胞膜的稳定性。电导率法可以测定植物膜透性的变化，作为反映植物抗逆性的生理指标之一。细胞相对膜透性越大，受害越严重，抗性越弱，反之则强 [18]。植物在高温胁迫下，体内产生的活性氧分子与植物体脂膜的不饱和脂肪酸发生氧化反应，生成 MDA，从而判断质膜损伤程度。高温会使活性氧代谢的平衡遭到破坏，导致 H_2O_2 积累 [15]。王晓晓 [20] 发现高温胁迫导致凤丹 *Paeonia ostii*‘Fengdan’中 REC 和 H_2O_2、MDA 含量均随着高温胁迫时间的延长而

增加。徐超等 [21] 发现随着高温处理时间的延长，2 个品种的南丰蜜橘 *Citrus reticulata* ‘Nanfengmiju’ 叶片内 MDA 和 H_2O_2 含量均显著增加。江建成 [16] 研究结果表明高温会造成 3 种杜鹃 MDA 含量增加。白杨 [15] 对不同品种牡丹的高温研究表明，夏季高温天气会提高牡丹叶片中的 H_2O_2 和 MDA 含量。

本试验中，随着高温胁迫时间的延长，2 个油茶品种幼苗叶片中 REC 和 H_2O_2、MDA 含量均升高，表明 2 个油茶品种的细胞膜在高温胁迫下受到不同程度的伤害，膜脂过氧化程度有所增加，与前人研究结果一致 [2]。与 CK 相比，‘长林 53 号’ REC 和 H_2O_2、MDA 含量增幅较大，说明‘长林 53 号’在受到高温胁迫后细胞膜的受损程度较大；而‘大别山 1 号’的变化幅度小于‘长林 53 号’，表明该品种在高温胁迫下细胞膜稳定性更强，膜脂过氧化程度更低，耐热性更强。

3.2 高温胁迫下油茶幼苗叶片抗氧化酶系统与耐热性的关系

在高温胁迫下，SOD、POD、CAT 等抗氧化酶，共同组成了植物的抗氧化酶系统，它们相互配合，及时清除植物内活性氧及过氧化物，保障植物正常的生理活动 [22]。

高温会造成植物体内活性氧过量积累，从而影响植物正常生长。SOD 是抗氧化防御系统中的首道防线，可以将 O_2^- 歧化为 H_2O_2；SOD 活性的提高有助于防止膜脂过氧化，提高细胞膜稳定性 [23]。POD 是植物在受到高温胁迫时产生的重要保护酶，一方面催化分解 H_2O_2，降低活性氧积累，另一方面催化酚类化合物氧化，有效缓解高温引起的氧化损伤。CAT 可以直接将植物体内产生的 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2，是植物体内重要的抗氧化酶之一 [24]。但随着胁迫时间的延长及胁迫程度的增加，当活性氧积累超过植物所能承受的范围时，抗氧化酶的蛋白结构就会被破坏，酶活性下降。赵晓龙等 [25] 研究发现，香榧 *Torreya grandis* 受到高温胁迫后，其当年生和越年生叶片中氧化酶活性均显著升高。傅志强等 [26] 研究了 15 个油茶品种在高温条件下的生理响应，发现除了少数品种，大部分油茶品种中 SOD、CAT、POD 活性与对照相比均显著提高。

本试验中 2 种油茶幼苗在高温胁迫下叶片内 SOD、POD 活性在胁迫初期均显著升高，但后期随着胁迫时间的持续，这 2 种酶的活性又呈下降趋势。‘大别山 1 号’叶片 CAT 活性持续升高，而‘长林 53 号’在胁迫 42 d 后酶活性下降，该结果与关于山桐子 [6]、杨树 [7] 的研究结果一致。由此推测，前期一定程度的高温可以显著提高植物体内酶活性来抵抗胁迫，后期受胁迫程度超出了油茶自身调节能力，从而影响 SOD、POD、CAT 的合成。

3.3 高温胁迫下油茶幼苗叶片渗透调节物质与耐热性的关系

渗透调节是植物抵御高温及其他非生物胁迫的重要生理机制之一。当植物遭受高温等非生物胁迫时，其正常生理代谢会受到干扰，而可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸等渗透调节物质可协同作用，维持植物正常生长 [27]。高温胁迫下，植物体内 SS 含量会迅速积累；作为重要的渗透调节物质，SS 不仅能提高细胞渗透压，还可清除过量活性氧、稳定细胞膜结构，从而减轻高温对植株的伤害 [28]。SP 含量可反映植物代谢水平，其参与体内多项生理代谢过程，通过调节细胞渗透压、增强抗氧化酶活性等方式提高细胞保水能力，缓解脱水造成的损伤，进而提升植物的抗逆性 [29]。Pro 是植物体内重要的渗透调节物质，可减少水分流失并清除自由基；在高温及其他逆境胁迫下，其含量会迅速上升以抵御逆境伤害，因此 Pro 含量高低可直观反映植物的耐热能力 [30]。黄淦等 [31] 研究表明，随着胁迫温度升高，12 个多头切花菊 *Chrysanthemum*×*morifolium* 品种的 SS 与 Pro 含量均呈不同程度上升趋势，且耐高温品种与热敏感品种间差异显著；而 SP 含量在不同品种中则表现为上升或下降的不同变化趋势，这可能是由于胁迫程度过重抑制了蛋白质合成所致。

本研究结果显示，随着高温胁迫时间延长，‘大别山 1 号’叶片中 SS、SP 及 Pro 含量整体呈持续上升趋势；而‘长林 53 号’相应渗透调节物质含量则表现为先升后降。在胁迫前期，油茶可通过积累渗透调节物质抵御高温伤害；但随胁迫持续，植株受害程度加剧，细胞渗透平衡被打破，呼吸代谢增强导致物质消耗加快，进而抑制渗透调节物质的合成与积累。上述变化规律与江建成 [16] 对杜鹃、王中雷 [28] 对朱顶红 *Hippeastrum* 的高温胁迫研究结果相似，表明本研究结果具有一定普遍性。同时，2 个品种渗透调节物质变化趋势的差异，也在一定程度上反映出‘大别山 1 号’的高温耐受能力优于‘长林 53 号’。

本研究仅对 2 个油茶品种的 1 年生幼苗开展了生理层面的耐热性评价，涉及品种较为有限。后续可扩大研究材料范围，对更多油茶品种进行系统的耐热性综合评价。此外，本研究仅测定了

叶片的生理生化指标，未来可针对高温胁迫下植株其他器官开展研究，并结合分子生物学手段进行更深层次的机制解析。

4　结　论

在高温胁迫下，油茶幼苗可通过提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量来应对高温胁迫：随着高温处理时间的持续，2 个油茶品种幼苗的叶片 RWC 持续下降，REC、MDA 含量、H_2O_2 含量持续上升，SOD、POD 活性呈先上升后下降的趋势；‘大别山 1 号’叶片 CAT 活性持续上升，‘长林 53 号’叶片 CAT 活性先上升后下降；‘大别山 1 号’油茶叶片 SS、SP、Pro 含量持续上升，而‘长林 53 号’叶片 SS、SP、Pro 含量先上升后下降；10 个生理生化指标间密切相关。通过隶属函数法对其耐热性进行综合评价，得出‘大别山 1 号’耐热性优于‘长林 53 号’，此结果可为选育耐热油茶品种提供参考。

参考文献：

[1] 杨抑 . 中国油茶起源初探 [J]. 中国农史 ,1992(3):74-77,95.
Yang Y. Preliminary study on the origin of *Camellia oleifera* in China[J]. Agricultural History of China,1992(3):74-77,95.

[2] 谭晓风 . 油茶分子育种研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2023,43(1):1-24.
Tan X F. Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(1):1-24.

[3] 张婷 , 李建安 , 龚玉子 , 等 . 湖南省 5 个主推油茶早中熟品种授粉配置技术 [J]. 林业科学 ,2025,61(4):153-168.
Zhang T, Li J A, Gong Y Z, et al. Pollination configuration technology of five early-to mid-maturing Camellia oleifera varieties recommended in Hunan Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025,61(4):153-168.

[4] 李小玲 , 雒玲玲 , 华智锐 . 高温胁迫下高山杜鹃的生理生化响应 [J]. 西北农业学报 ,2018,27(2):253-259.
Li X L, Luo L L, Hua Z R. Physiological and biochemical responses of *Rhododendron lapponicum* to heat stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2018,27(2):253-259.

[5] 李泽 , 谭晓风 , 卢锟 , 等 . 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报 ,2017,37(5): 1515-1524.
Li Z, Tan X F, Lu K, et al. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2017, 37(5):1515-1524.

[6] 耿晓东 , 岳继飞 , 刘英 , 等 .‘ 豫济 ’ 山桐子幼苗生长对干旱胁迫的响应 [J]. 经济林研究 ,2025,43(1):29-39.
Geng X D, Yue J F, Liu Y, et al. Response of Idesia polycarpa ‘Yuji’ seedling growth to drought stress[J]. Non-wood Forest Research,2025,43(1):29-39.

[7] 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.
Zhang Y H, Wu Y B, Liu X, et al. Effects of elevated temperature and drought on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme system of poplar seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University,2017,45(11):32-38.

[8] Prior L D, Bowman D 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,2014,20:2793-2799.

[9] 王志超 , 何之龙 , 陈永忠 , 等 . 油茶 ‘ 湘林 210’ 抗干旱特性研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(1):37-48.
Wang Z C, He Z L, Chen Y Z, et al. Study on drought resistance characteristics of ‘Xianglin 210’ *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1): 37-48.

[10] 曹永庆 , 姚小华 , 龙伟 . 高温干旱对油茶生长的影响 [J]. 林业科技开发 ,2014,28(4):34-37.
Cao Y Q, Yao X H, Long W. Temperature and drought stress on growth of oil-tea camellia[J]. China Forestry Science and Technology,2014,28(4):34-37.

[11] 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.
Chen Y Z, Luo J, Chen L S, et al. Drought injury and countermeasure of *Camellia oleifera* in Hunan Province[J]. Non-wood Forest Research,2014,32(3):22-29,53.

[12] 杨友志 , 郭凌曜 , 王婷 , 等 . 油茶含油率影响因素及改善措施 [J]. 粮食科技与经济 ,2022,47(1):21-23.
Yang Y Z, Guo L Y, Wang T, et al. Influencing factors and solving measures of oil content of *Camellia oleifera*[J]. Food Science and Technology and Economy,2022,47(1):21-23.

[13] 曾清苹 , 晏巧 , 李彬 , 等 . 渝东南极端高温干旱对 ‘ 长林 ’ 系列油茶生长及果实性状的影响 [J]. 中国农学通报 ,2024,40(4): 39-44.
Zeng Q P, Yan Q, Li B, et al. Effects of extreme high temperature and drought on growth and fruit characters of ‘Changlin’ series of *Camellia oleifera* in southeast of Chongqing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2024,40(4):39-44.

[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.
Hu X S, Wang Y J, Xu L C, et al. Effects of drought stress on leaf anatomical structure of different *Camellia oleifera* cultivars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(10):1-17.

[15] 白杨 . 不同牡丹品种对夏季高温胁迫的生理响应及褪黑素缓解作用研究 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2023:10.
Bai Y. Study on the physiological response of different tree peony cultivars to high temperature stress in summer and the relieving effect of melatonin[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023:10.

[16] 江建成 . 高温胁迫对三种杜鹃的生长及生理影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2023:15.
Jiang J C. Effects of high temperature stress on the growth and physiology of three *Rhododendron* species[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2023:15.

[17] Sharif P, Seyedsalehi M, Paladino O, et al. Effect of drought and salinity stresses on morphological and physiological characteristics of canola[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2018,15:1859-1866.

[18] 王飞 , 马金玲 , 秦丹丹 , 等 . 小麦耐热及热敏感基因型在高温胁迫下膜透性及膜脂组分的差异 [J]. 农业生物技术学报 , 2013,21(8):904-910.
Wang F, Ma J L, Qin D D, et al. The difference of permeability and membrane lipid composition in heat tolerant and susceptible wheat (*Triticum aestivum*) under high temperature stress[J]. Journal of Agricultural Biotechnology,2013,21(8):904-910.

[19] Manafi H, Baninasab B, Gholami M, et al. Exogenous melatonin alleviates heat-induced oxidative damage in strawberry (*Fragaria*×*ananassa* Duch. cv. Ventana) plant[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2022,41:52-64.

[20] 王晓晓 . 凤丹对高温胁迫的响应及缓解措施研究 [D]. 扬州 : 扬州大学 ,2022:19-20.
Wang X X. Study on response and mitigation measures of *Paeonia ostii* to high temperature stress[D]. Yangzhou: Yangzhou University,2022:19-20.

[21] 徐超 , 杨再强 , 王雨亭 , 等 . 南丰蜜橘对高温热害的生理响应及耐热性评价模型构建 [J]. 果树学报 ,2023,40(12):2638-2651.
Xu C, Yang Z Q, Wang Y T, et al. Physiological response to high temperature and heat tolerance evaluation of different lines in Nanfeng tangerine[J]. Journal of Fruit Science,2023,40(12): 2638-2651.

[22] 吴永波 , 叶波 . 高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响 [J]. 生态学报 ,2016,36(2):403-410.
Wu Y B, Ye B. Effects of combined elevated temperature and drought stress on anti-oxidative enzyme activities and reactive oxygen species metabolism of *Broussonetia papyrifera* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(2):403-410.

[23] Rao M J, Wu S G, Duan M Z, et al. Antioxidant metabolites in primitive, wild, and cultivated citrus and their role in stress tolerance[J]. Molecules,2021,26:5801.

[24] Rahman M A, Woo J H, Song Y, et al. Heat shock proteins and antioxidant genes involved in heat combined with drought stress responses in perennial rye grass[J]. Life,2022,12:1426.

[25] 赵晓龙 , 沈家怡 , 刘涛 , 等 . 当年和越年生香榧叶片的光合效率及抗氧化特性的季节性变化 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2024,48(2):45-50.
Zhao X L, Shen J Y, Liu T, et al. Seasonal variations in photosynthetic efficiency and antioxidant characteristics of the current and one year-old leaves in *Torreya grandis* ‘Merrillii’[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024,48(2):45-50.

[26] 傅志强 , 张恒 , 刘祯 , 等 . 不同油茶品种苗对高温胁迫的生理响应及耐热性评价 [J]. 林业科学研究 ,2024,37(2):189-200.
Fu Z Q, Zhang H, Liu Z, et al. Evaluation of the physiological response and heat tolerance of seedlings of different *Camellia oleifera* cultivars to high temperature stress[J]. Forest Research, 2024,37(2):189-200.

[27] 孙欧文 , 杨倩倩 , 章毅 , 等 . 四个绣球品种对高温干旱复合胁迫的生理响应机制 [J]. 植物生理学报 ,2019,55(10):1531-1544.
Sun O W, Yang Q Q, Zhang Y, et al. Physiological response mechanism of four kinds of *Hydrangea* under high temperature and drought stress[J]. Plant Physiology Journal,2019,55(10): 1531-1544.

[28] 王中雷 . 朱顶红高温胁迫生理响应及种质资源耐热性评价 [D]. 武汉 : 华中农业大学 ,2024:16-26.
Wang Z L. Physiological response to high temperature stress and heat tolerance evaluation of germplasm resources in *Hippeastrum* herb[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024: 16-26.

[29] 钱玥 , 李思源 , 饶良懿 . 盐碱胁迫对菊芋渗透调节及抗氧化酶系统的影响 [J]. 干旱区研究 ,2023,40(9):1465-1471.
Qian Y, Li S Y, Rao L Y. Effects of saline-alkali stress on organic osmoregulatory substances and antioxidant enzyme systems of *Helianthus tuberosus*[J]. Arid Zone Research, 2023,40(9):1465-1471.

[30] Virková M, Gemperlová L, Dobrá J, et al. Effect of heat stress on polyamine metabolism in proline-over-producing tobacco plants[J]. Plant Science,2012,182:49-58.

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

[本文编校：张雨朦]