

# 热驯化对高温胁迫下灯盏花生理生化特性的影响

徐洪高<sup>1</sup> 徐萍<sup>1</sup> 罗文秀<sup>1</sup> 陆尤<sup>1</sup> 涂振华<sup>1</sup>  
张萱<sup>1</sup> 陈艺春<sup>1</sup> 郑国伟<sup>1</sup> 杨颖翠<sup>2</sup> 陈佳<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 云南中医药大学中药学院, 650500, 云南昆明; <sup>2</sup> 怒江润丰农业科技服务有限公司, 673500, 云南怒江; <sup>3</sup> 云南中医药大学民族医药学院, 650500, 云南昆明)

**摘要** 为研究热驯化后的灯盏花抗高温胁迫能力是否有提升以及相应的生理响应, 以灯盏花为供试材料, 以(36.0±0.5) °C热驯1 d的灯盏花为试验组(T), 22 °C正常生长的为对照组(CK), 比较(48.0±0.5) °C高温胁迫前、胁迫4 h后及(36.0±0.5) °C恢复3 h后3个时段的各生理生化指标及胁迫4 h后的受害指数。结果表明, T处理的灯盏花高温胁迫后经(36.0±0.5) °C恢复3 h后相对电导率和丙二醛含量降低, 相对含水量升高, 而CK恢复后与高温胁迫后比较无明显变化, 失去了恢复能力, 同时高温胁迫期间T处理灯盏花的光合色素(叶绿素)以及脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物含量均高于CK组, 以上结果表明热驯化处理能够缓解高温对灯盏花的伤害, 提高了灯盏花的抗高温胁迫能力。

**关键词** 灯盏花; 热驯化; 高温胁迫; 生理生化特性

灯盏花[*Erigeron breviscapus* (Vant.) H.-Mazz], 又名灯盏细辛或短葶飞蓬, 为菊科(Asteraceae)飞蓬属植物<sup>[1]</sup>, 主要分布于我国云南、四川、贵州和西藏等地区, 其中, 云南省是灯盏花野生资源的主要分布地, 同时也是灯盏花产业的重要基地, 供应了全国超过97%的药材原料, 灯盏花被列为云南省“十大云药”和“五大天然系列”药物之一的重点开发对象<sup>[2-3]</sup>。灯盏乙素为灯盏花的主要活性物质, 具有散寒解表、祛风除湿、舒筋活血、消积止痛等功效, 广泛用于治疗心脑血管疾病<sup>[4]</sup>, 市场对灯盏花的需求量大, 但由于野生资源的过度采集, 目前市场上的灯盏花大多为人工栽培, 且灯盏花适宜生长在海拔较高、地势平缓、光照充足的地方<sup>[3]</sup>。

有研究<sup>[5-6]</sup>表明工业化以来全球平均温度显著升高, 预计21世纪气温将进一步上升1.5~4.5 °C, 1971-2022年增温速率达到0.34 °C/10年。高温是限制药用植物生长发育及地理分布的重要环境因素, 深入研究植物对高温胁迫的响应规律, 解析药用植物的耐热机制, 不仅具有重要的理论意义, 而且对于指导药用植物栽培具有重要意义。光合作用是对高温最为敏感的生物学过程之一, 当温度过高

时, 灯盏花会出现光抑制现象, 可能会对植物造成不可逆的损伤<sup>[7]</sup>。热驯是提高植物耐热性的途径之一, 经过适度的非致死高温处理能够促使植物调节生理生化过程来提高其耐热性。热驯处理可以缓解高温对杜鹃<sup>[8]</sup>、龙须菜<sup>[9]</sup>及拟南芥<sup>[10]</sup>细胞的损伤, 提高其高温抗性。本研究对灯盏花实施热驯化处理, 通过评估热害指数、测定相对含水量以及分析渗透调节物质等方法, 深入探究热驯化处理对高温胁迫下灯盏花抗高温能力影响, 为全球气候变化下灯盏花的栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验地概况

灯盏花种子购自宣威市龙津生物科技有限公司, 其母株由云南中医药大学郑国伟研究员鉴定为菊科(Asteraceae)飞蓬属植物。本试验共播种120盆, 每个托盘放12盆, 每盆3株, 土壤为腐殖土:珍珠岩=5:1, 放置于云南省昆明市云南中医药大学温室(102°49'12.24" E, 24°50'23.67" N, 海拔1887.6 m), 昼夜生长环境温度22 °C/18 °C, 湿度80%, 种植期间保持水分充足, 定期交换各托

作者简介: 徐洪高, 研究方向为中药资源与开发, E-mail: 3520334637@qq.com; 徐萍为共同第一作者, 研究方向为中药资源与开发, E-mail: 2633822198@qq.com

郑国伟为通信作者, 主要从事中药资源与开发研究, E-mail: gwzhengkm@163.com; 陈佳为共同通信作者, 主要从事中药资源与开发研究, E-mail: chenjie@ynutcm.edu.cn

基金项目: 云南省科技计划项目基础研究计划(202001AZ070001-027); 云南省科技计划项目基础研究专项(202301AT070257); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才(XDYC-QNRC-2022-0277)

收稿日期: 2024-03-30; 修回日期: 2024-07-03; 网络出版日期: 2024-07-23

盘及托盘中每盆灯盏花的位置，避免环境差异的影响，待灯盏花叶片长至 8~9 cm 时进行试验处理，通过前期预试验确定热驯及热胁迫条件。

1.2 试验设计

将长势一致且健康的灯盏花随机分为 2 组，热驯组（T）和对照组（CK），每组 9 盆。前期试验确定热驯条件为（36.0±0.5）℃热驯 1 d，高温胁迫条件为（48.0±0.5）℃热胁迫 4 h，在（36.0±0.5）℃下恢复 3 h，CK 为 22℃培养相同时间后直接进行热胁迫和恢复处理。

1.3 样品采集

分别于热驯后、高温胁迫后、恢复后取样，每组处理随机选取植株最底层 1~2 片叶片测定相关指标，每个处理重复 3 次。样品采集后迅速称量记录，经液氮速冻后放入-80℃超低温冰箱保存，用于各生理指标的测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 热害指数 参照侯赵玉等<sup>[11]</sup>方法，根据灯盏花高温胁迫后的伤害情况，将耐热能力级别分为 5 级，其中 0 级为无热伤害症状；1 级：1~2 片叶开始失水枯萎；2 级：1~2 片叶枯萎，2 片叶枯死；3 级：3~4 片叶枯死；4 级：4 片叶以上枯死；5 级：整个植株枯死。

热害指数=Σ（热害级数×相应株数）/（最高级数×总株数）。

1.4.2 相对含水量（RWC） 参照周余华等<sup>[12]</sup>的方法计算 RWC， $RWC(\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100$ ，式中，FW 为鲜重，TW 为膨胀重量，DW 为干重。

1.4.3 相对电导率（REC） 参照户金鸽等<sup>[13]</sup>的方法，称取灯盏花叶片 0.2 g，用去离子水清洗 2 遍，剪为大小均匀的碎片放入装有 20 mL 去离子水的试管中，放于摇床 4 h，取出检测电导率（C<sub>1</sub>），然后置于沸水中煮 30 min，冷却后检测电导率（C<sub>2</sub>）。

$REC(\%) = C_1 / C_2 \times 100$ 。

1.4.4 叶绿素及胡萝卜素含量 参照罗文秀等<sup>[14]</sup>的 N-N-2 甲基甲酰胺提取法，提取液于 480、647、664 nm 处测量吸光度。

1.4.5 生理生化指标 参照张开明等<sup>[15]</sup>的方法，采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）含量，采用蒽酮比色法测定可溶性糖（SS）含量，采用茚三酮法测定脯氨酸（Pro）含量；参照陈蕾太等<sup>[16]</sup>的

考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白（SP）含量。

1.5 数据处理

使用 SPSS 19 对数据进行单因素方差分析，采用 SPSS 19 进行独立样本 *t* 检验（*P*<0.05 时认为差异显著），使用 GraphPad Prism 9 进行绘图。

2 结果与分析

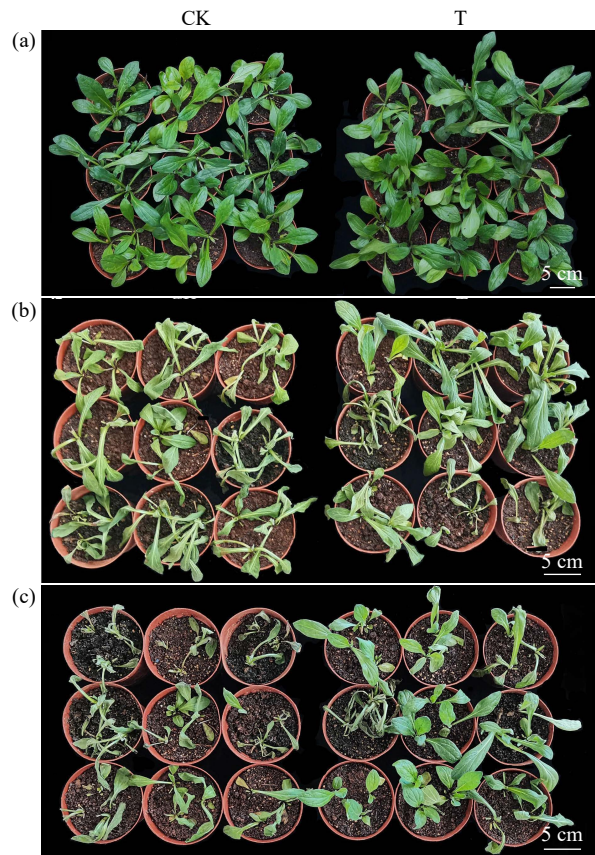
2.1 高温胁迫对灯盏花热害指数和表型形态的影响

由表 1 和图 1 可得，经高温胁迫后 CK 和 T 处理在形态上存在明显差异，CK 处理热害指数为 0.8592，表现为叶片严重反卷、下垂，老叶干枯，新叶叶缘、叶尖出现严重失水；T 处理热害指数为

表 1 灯盏花高温胁迫后伤害情况统计

Table 1 Statistics of damage caused by high temperature stress in *E.breviscapus*

处理 Treatment	热害指数级别株数 Number of plants of thermal damage index grade						总株数 Total number of plants	热害指数 Thermal damage index
	0	1	2	3	4	5		
CK	0	0	2	4	5	16	27	0.8592
T	8	8	4	2	2	3	27	0.3333



(a) 热胁迫前；(b) 热胁迫后；(c) 恢复后。  
(a) before heat stress; (b) after heat stress; (c) after recovery.

图 1 各处理阶段灯盏花表型

Fig.1 Phenotype of *E.breviscapus* in each treatment stage

0.3333, 表现为部分植株叶片反卷、下垂, 叶子变黄, 部分没有遭受高温伤害, 个别枯死。

2.2 高温胁迫对灯盏花叶片 RWC 和 REC 的影响

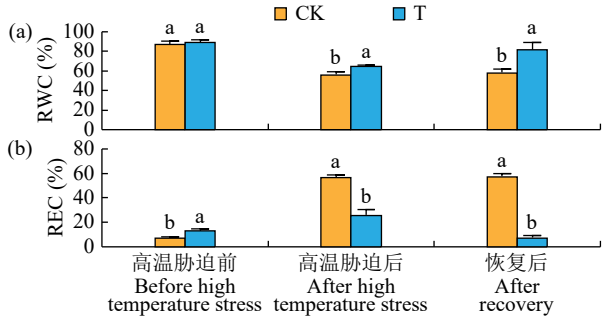
由图 2a 可知, 热驯化后灯盏花的 RWC 较 CK 升高但差异不显著, 在经 (48.0±0.5) °C 高温胁迫 4 h 后的 CK 和 T 处理的 RWC 均大幅减小, 但 T 处理的减小幅度小于 CK, 且两组间存在显著性差异, 当恢复 3 h 后 T 处理的 RWC 恢复到 81.73%, 比 CK 高 22.78%, 且存在显著性差异。结果表明灯盏花热驯化后在应对高温胁迫时可以缓解叶片脱

水, 并且高温胁迫后在适宜的环境下有一定的恢复能力。

由图 2b 可知, 热驯 1 d 后 T 的 REC 较 CK 大且差异显著 ( $P<0.05$ ), 当高温胁迫后 CK 和 T 的 REC 分别增大 49.53%、12.65%, CK 比 T 的 REC 高出 30.63% 并具有显著性差异。在 (36±0.5) °C 下恢复 3 h 后 T 的 REC 急剧减小, 而 CK 的 REC 较高温胁迫后只减小了 0.96%。结果表明 CK 经高温胁迫后细胞膜已基本被损害, 不再具备恢复能力, 而 T 处理经高温胁迫后细胞膜只是暂时性的受损, 依旧具备一定的恢复能力。

2.3 高温胁迫对灯盏花叶绿素和胡萝卜素含量的影响

叶绿素是进行光合反应的主要色素, 叶片中叶绿素含量的变化可作为反映叶片生理活性变化的重要指标之一<sup>[17]</sup>。由图 3 可知, CK 处理的叶绿素和胡萝卜素含量都是呈先上升后下降的趋势, 说明 CK 处理经高温胁迫后生理活性降低, 而各个时段 T 处理的总叶绿素含量高于 CK 处理, 表明热驯组的灯盏花在高温胁迫后生理活性基本不受影响, 证明了热驯可以在一定程度上提高灯盏花抗高温胁迫的能力。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。  
Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ), the same below.

图 2 高温胁迫后灯盏花叶片 RWC 和 REC 的变化  
Fig.2 Changes in RWC and REC of *E.breviscapus* leaves after high temperature stress

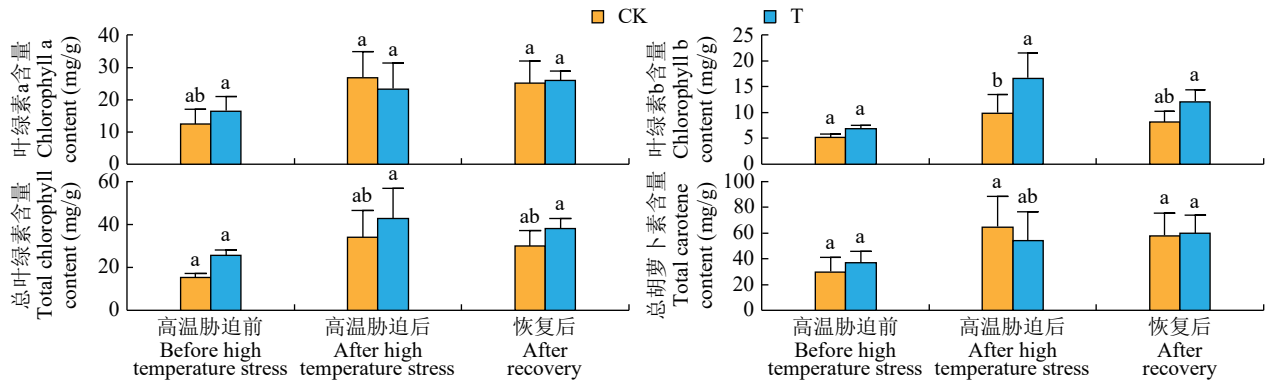


图 3 高温胁迫后灯盏花叶绿素和胡萝卜素含量的变化

Fig.3 Changes in chlorophyll and carotene contents of *E.breviscapus* after high temperature stress

2.4 高温胁迫对灯盏花渗透调节物质的影响

2.4.1 对叶片 MDA 含量的影响 MDA 是植物受到伤害后发生过氧化反应的产物, 其含量变化与植物衰老及逆境伤害有密切关系, 是评价质膜损伤程度的重要指标<sup>[18]</sup>。从图 4a 可以看出, 温度升高会导致 MDA 含量的升高, 热驯 1 d 的灯盏花 MDA 含量略高于 CK 但差异不显著, 当高温胁迫 4 h 后 CK 和 T 的 MDA 含量大幅增高, 增幅分别为 149.69%、56.07%, 此时 CK 的 MDA 含量明显高于 T 处理,

且存在显著性差异, 在 (36.0±0.5) °C 下恢复 3 h 后 T 处理的 MDA 含量大幅降低, 减幅为 28.86%, 而 CK 的减幅为 5.17%, MDA 含量明显高于 T 处理, 且差异显著, 说明灯盏花热驯后可以在一定程度上减轻高温胁迫的伤害, 从而提高其抗高温胁迫能力。

2.4.2 对叶片 Pro 含量的影响 Pro 的积累是高温逆境下植物为保护自身而采取的保护手段, 高温胁迫下植物通过积累 Pro 以提升其抗性<sup>[18]</sup>。从图 4b



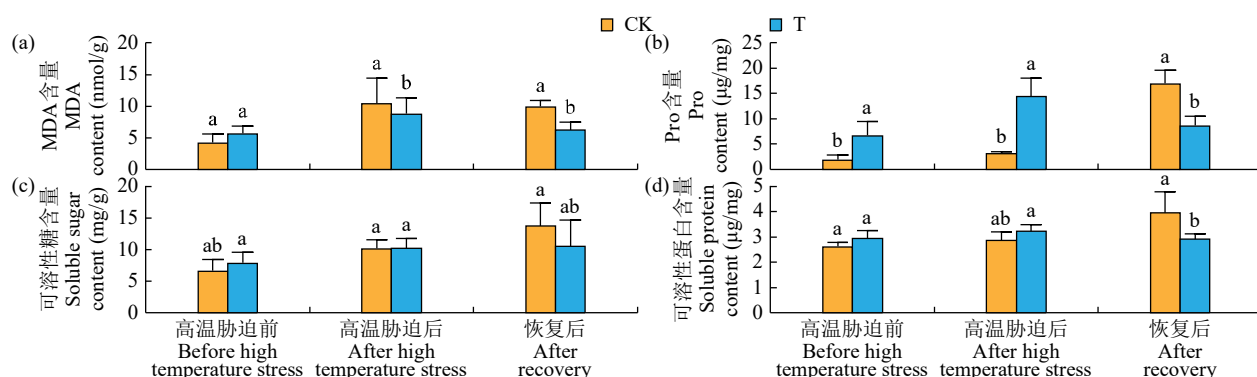


图 4 高温胁迫后灯盏花渗透调节物质的变化

Fig.4 Changes of osmotic adjustment substances in *E.breviscapus* after high temperature stress

可以看出, 高温胁迫期间 CK 和 T 处理的 Pro 含量都有增加, CK 增幅为 46.13%、T 增幅为 115.51%, 且经高温胁迫后 CK 和 T 处理的 Pro 含量差异显著, T 处理的 Pro 含量远远高于 CK。恢复期间 CK 的 Pro 含量急剧增加可能是因为逆环境中灯盏花的 Pro 变化会有一定的滞后性。

2.4.3 对叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 由图 4c~d 可知, 高温胁迫后灯盏花叶片中可溶性糖和可溶性蛋白含量的变化趋势基本一致, CK 2 个时段都是上升趋势。而 T 处理呈先上升后下降趋势。

### 3 讨论

高温胁迫是限制植物生长发育的关键逆境因素之一, 通过缩短植物生命周期并加速其衰老过程对作物生产构成了严峻挑战。在这种不利环境下, 植物所承受的伤害程度往往直观体现在其表型上, 这成为了评估热害影响的一个直接且有效的指标<sup>[19]</sup>, 在本研究中, 热驯化处理后的灯盏花热害指数为 0.3333, 明显低于对照组的热害指数 (0.8592)。这一结果有力地证明了热驯化处理能够有效缓解灯盏花在高温逆境中的受害程度, 表明植物通过热驯化耐热性获得了一定的提升。叶片萎蔫与干枯现象本质上是由于细胞水分丧失导致叶片 RWC 的减少, 这一过程直接体现了植物在逆境条件下水分平衡状态的失衡, 耐热性强的品种能够在高温下保持较高的 RWC<sup>[20]</sup>。在本试验中, 热驯化处理后的灯盏花在高温胁迫后 RWC 的下降幅度小于对照组, 且在后续的恢复期内, T 组的 RWC 大幅升高, 而 CK 的基本不变, 说明热驯化可以提高灯盏花抗高温胁迫能力, 这与刘柳等<sup>[21]</sup>研究的高温胁迫下月季叶片含水量变化一致。

植物叶片的 REC 是评估细胞膜受损程度的一

项关键生理参数, 它直接反映植物在逆境胁迫下的受害情况<sup>[22]</sup>。当植物遭遇如高温等逆境时, 细胞膜的完整性受损, 导致膜透性增强, 电解质外渗增加, 这一过程伴随着膜脂过氧化作用的加剧。为了减轻此类伤害, 植物会激活一系列保护酶系统, 旨在抑制脂质过氧化, 维护细胞膜的稳定性和选择透过性。然而, 高温胁迫往往会打破植物体内活性氧产生的动态平衡, 促使 REC 上升及 MDA 含量累积, 两者均为衡量膜脂过氧化程度及细胞受损情况的常用指标<sup>[23]</sup>。其中, REC 越高代表电解质外渗越严重, MDA 积累量大则表示细胞膜损伤更为剧烈<sup>[24]</sup>。本研究结果显示, 尽管在高温胁迫处理期间, CK 与 T 处理的 REC 与 MDA 含量均呈现出上升趋势, 但热驯化处理显著缓解了这种增长, T 处理的增量较 CK 处理小, 且在恢复期后, T 处理的 REC 与 MDA 含量明显下降至较低水平, 而 CK 处理则无显著改善, 证明了经过热驯化的灯盏花在面对高温胁迫时, 展现出更强的抵御能力, 其细胞膜稳定性及抗氧化防御机制得到显著提升, 进一步证实了热驯化处理在增强植物抗逆性方面的有效性。

光合作用强度不仅是植物生长势的直接体现, 也是衡量植物耐受逆境能力的一个关键指标<sup>[25]</sup>, 这一过程与叶绿素含量紧密相关, 因为叶绿素作为光合作用的主要色素, 其含量直接影响到光能的吸收和转化效率。在高温逆境下, 植物常常面临叶绿素降解加速或合成受阻的挑战, 这些变化会显著削弱光合作用效率, 进而影响植物的生长发育<sup>[26]</sup>。本研究中, T 处理的总叶绿素含量在整个试验过程中始终保持在比 CK 更高的水平上, 即使在遭受高温胁迫后亦是如此。这一结果不仅验证了灯盏花对高温环境的适应性, 更重要的是它直接证明了热驯化预处理能够有效提升灯盏花的耐热性, 通过维持甚至

提高叶绿素含量来增强其光合作用性能,从而在逆境中保持较强的生长潜力和生产力。这一发现不仅丰富了对植物耐热机理的认识,也为筛选和培育高耐热性作物品种提供了参考。

渗透调节机制是植物在逆境条件下维持细胞稳态和生存的关键适应策略,其中脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖作为主要的渗透调节物质在调节细胞渗透势、维持水分平衡及保护细胞结构中发挥主要作用<sup>[27]</sup>。尤其是在高温胁迫下,植物通过增加 Pro 含量来增强细胞膜的稳定性和保护酶活性,从而缓解由高温引起的氧化损伤和水分流失,大量的研究<sup>[28-30]</sup>已证实植物体内 Pro 水平与其逆境忍耐力呈正相关,此外,可溶性蛋白和可溶性糖的积累也是植物响应逆境、维持渗透平衡的重要机制,多数植物在高温环境下会显示出这 2 种物质含量的上升趋势。本研究观察到,在持续的高温胁迫初期,T 处理相比 CK,其 Pro、可溶性蛋白及可溶性糖的含量增长更为平缓且始终处于较高水平,表明 T 处理植物的渗透调处理节系统更高效,能够更早且更有效地启动保护机制。当高温胁迫解除 3 h 后,CK 处理的上述 3 项指标出现急剧增加,甚至超过 T 处理,这与蔡漂聪<sup>[31]</sup>的研究结果相吻合。该现象可能反映了对照组植物在面对突发高温时,其渗透调节机制的响应存在一定的滞后性,需要一定时间来启动并达到最大效应,而热驯化预先调整了植物的生理状态,使其能更迅速且适当地调节渗透压,减轻高温带来的即时伤害。利用 MDA 含量、光合色素含量及电子传递效率等指标能够筛选出一批具备显著耐热性的作物品种,例如油茶品系中的“华金”与“赣州油 1 号”<sup>[32]</sup>、切花菊中的“威尼斯”与“凯撒黄”<sup>[33]</sup>以及山茶品种中的“垂枝粉玉”<sup>[34]</sup>,而本研究通过热驯化提高灯盏花的高温抗性,通过评估热害指数、相对含水量、相对电导率、光合色素含量以及渗透调节物质等参数,深入剖析了灯盏花在遭受高温胁迫时其内在生理生化过程如何动态调整来有效缓解极端温度带来的不利效应。该研究发现,热驯化处理在增强灯盏花快速响应温度变化上的重要性,为进一步探索灯盏花耐热性机制提供了线索,同时可为全球气候变化下灯盏花的栽培提供理论指导,在灯盏花幼苗培育中,可以通过模拟施加非致死性高温对灯盏花进行热驯化处理,诱导植物产生适应性反应,以增强其自然的抗高温能力。

## 4 结论

本研究表明,经过热驯化处理的灯盏花在面临高温胁迫时,展现出显著增强的抗逆性能。具体表现为热驯化组植物的热害指数显著低于未经热驯化的对照组,表明其遭受的高温损伤程度减轻。在高温暴露期间,热驯化灯盏花维持了较高的 RWC 和叶绿素含量,同时观察到较低的 REC 和 MDA 含量,这些生理指标的变化反映了细胞膜系统的稳定性得以保持,以及活性氧产生的有效抑制,从而减少了氧化损伤。此外,热驯化促进了灯盏花对渗透调节物质的累积,这一策略在后续的极端高温挑战中发挥关键作用,通过调节细胞渗透势,维持了细胞水分平衡,平缓了渗透调节物质的动态变化,增强了植物的水分保持能力。当热驯化处理的灯盏花在  $(36.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  下恢复 3 h 后,其各项生理指标迅速复原至接近正常水平,而未经热驯化的对照组植物则大多出现严重的干枯乃至死亡现象。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家药典委员会. 中国药典(一部). 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 向成钢, 李河, 魏翔, 等. 药用植物灯盏花 MYC 转录因子家族生物信息学及表达模式分析. 分子植物育种, [2024-03-30]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230704.1056.003.html>.
- [3] 苏灿, 普元柱, 高勇, 等. 云南省灯盏花产业发展现状及对策. 中药材, 2023, 46(5): 1067-1074.
- [4] 刘毅, 耿洪娇, 崔鑫, 等. 注射用灯盏花素治疗急性脑梗死和冠心病心绞痛的临床综合评价. 中草药, 2023, 54(19): 6413-6423.
- [5] Khan S, Anwar S, Ashraf M Y, et al. Mechanisms and adaptation strategies to improve heat tolerance in rice. A review. Plants (Basel), 2019, 8(11): 508.
- [6] 周天军, 陈晓龙, 张文霞, 等. 气候变化与碳中和. 自然杂志, 2024, 46(1): 1-11.
- [7] 罗文秀, 米琪, 陆尤, 等. 温度升高对灯盏花光合生理特性的影响. 北方园艺, 2023(22): 108-115.
- [8] 梁雯, 赵冰, 黄文梅. 热锻炼对杜鹃花耐热性的影响. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 284-290.
- [9] 付峰, 隋正红, 李秉钧, 等. 热锻炼对龙须菜高温胁迫响应的影响. 海洋科学, 2017, 41(4): 10-16.
- [10] Wos G, Willi Y. Thermal acclimation in *Arabidopsis lyrata*: genotypic costs and transcriptional changes. Journal of Evolutionary Biology, 2018, 31(1): 123-135.
- [11] 侯赵玉, 龚亦钊, 钱祎, 等. 芍药耐热性评价及其鉴定指标筛选. 中国农业科学, 2023, 56(23): 4742-4756.
- [12] 周余华, 梁宇翔. 高温胁迫对多花棘木幼苗叶片生理因子的影响. 江苏农业科学, 2021, 49(11): 85-92.
- [13] 卢金鸽, 白世践, 陈光. 不同葡萄砧木叶绿素荧光参数对高温的响应. 北方园艺, 2021(13): 36-42.
- [14] 罗文秀, 米琪, 李文春, 等. 滇黄精对长期  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应. 分子植物育种, [2024-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230810.0926.002.html>.

- [15] 张开明, 陈敏, 田耕, 等. 5 种观赏秋菊耐热性差异的生理机制分析. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 6-10.
- [16] 陈蕾太, 孙爱清, 杨敏, 等. 逆境条件下小麦种子活力与种子萌发相关酶活性及其基因表达的关系. 应用生态学报, 2017, 28(2): 609-619.
- [17] 江建成, 廖菊阳, 曹受金, 等. 高温胁迫对三种杜鹃生长及生理的影响. 北方园艺, 2023(18): 54-62.
- [18] 陆艾鲜, 凌瑞, 陈生煜, 等. 高温胁迫下 8 个绣球品种的生理生化响应. 热带作物学报, 2022, 43(4): 816-828.
- [19] 李小玲, 华智锐, 张飞, 等. 不同高山杜鹃品种耐热性评价研究. 江西农业学报, 2022, 34(2): 82-86.
- [20] 邱佳奇, 张立业, 卢凯政, 等. 不同红树莓品种对自然高温的生理响应及耐热性综合评价. 安徽农业科学, 2022, 50(16): 82-86.
- [21] 刘柳, 赵梦雨, 刘曙光, 等. 高温胁迫下月季叶片含水量变化与电阻抗参数关系的研究. 现代园艺, 2020, 43(11): 6-8.
- [22] 江定, 李光光, 黄剑锋, 等. 苦瓜苗期对高温胁迫的生理响应及耐热性初步评价. 广东农业科学, 2023, 50(9): 155-164.
- [23] 张秀梅, 许建新, 何新杰, 等. 高温胁迫对洋竹草生长及部分生理指标的影响. 江西农业学报, 2019, 31(6): 40-44.
- [24] 张瑜, 严琳玲, 王文强, 等. 大叶千斤拔对高温胁迫的生理响应及耐热性分析. 热带作物学报, 2016, 37(7): 1290-1297.
- [25] 余梦奇, 路梦莉, 张雅婷, 等. 灌浆期高温对玉米叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响. 中国农业气象, 2023, 44(7): 599-610.
- [26] 张婷, 李平, 韦嘉励. 4 种常春藤对高温胁迫的生理响应. 分子植物育种, [2024-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231027.0926.002.html>.
- [27] 于金平, 俞珊, 梁有旺, 等. NaCl 胁迫对美国白蜡幼苗部分生理指标的影响. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1): 110-112.
- [28] 王冠玉, 贾平平, 靳娟, 等. 高温胁迫对枣花器官生理特性的影响. 新疆农业科学, 2023, 60(6): 1485-1491.
- [29] 吕校石, 徐建峰, 许建新, 等. 深圳市耐高温月季品种筛选研究. 农业技术与装备, 2022(10): 128-130.
- [30] 刘辉, 骆慧枫, 张琛, 等. 甜樱桃对高温胁迫的生理响应. 生态学报, 2023, 43(2): 702-708.
- [31] 蔡凛聪. 油菜素内酯与热驯化对茭白幼苗高温抗性的调控作用. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [32] 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. 林业科学研究, 2024, 37(2): 189-200.
- [33] 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. 华南师范大学学报(自然科学版), 2024, 56(1): 92-103.
- [34] 郭卫珍, 宋垚, 章丹峰, 等. 9 个山茶品种对高温胁迫的光合生理响应及其耐热性综合评价. 西北植物学报, 2024, 44(4): 539-550.

## Effects of Heat Acclimation on Physiological and Biochemical Characteristics of *Erigeron breviscapus* under High Temperature Stress

Xu Honggao<sup>1</sup>, Xu Ping<sup>1</sup>, Luo Wenxiu<sup>1</sup>, Lu You<sup>1</sup>, Tu Zhenhua<sup>1</sup>, Zhang Xuan<sup>1</sup>,  
Chen Yichun<sup>1</sup>, Zheng Guowei<sup>1</sup>, Yang Yingcui<sup>2</sup>, Chen Jia<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>College of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China; <sup>2</sup>Nujiang Runfeng Agricultural Science and Technology Service Co., Ltd., Nujiang 673500, Yunnan, China; <sup>3</sup>College of Ethnic Medicines, Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China)

**Abstract** To study whether the heat acclimated *Erigeron breviscapus* has improved its ability to resist high temperature stress and its corresponding physiological response, *E. breviscapus* was used as the test material. The experimental group (T) consisted of *E. breviscapus* that had been heat-treated at (36.0±0.5) °C for one day, while the control group (CK) was comprised of plants grown under normal conditions at 22°C. Physiological and biochemical indexes were compared before and after four hours of stress at (48.0±0.5) °C, as well as after three hours of recovery at (36.0±0.5) °C. The injury index after four hours of stress was also evaluated. The results showed that the relative conductivity and malondialdehyde content of T treated *E. breviscapus* decreased and the relative water content increased after three hours recovery at (36.0±0.5) °C after high temperature stress, while the recovery of CK group had no significant change compared with that of high temperature stress, and lost the recovery ability. At the same time, the contents of photosynthetic pigment (chlorophyll) and osmoregulatory substances such as proline, soluble sugar and soluble protein in T group were higher than those in CK group during high temperature stress. The above results indicated that heat acclimation treatment could alleviate the damage of high temperature on *E. breviscapus* and improve its resistance to high temperature stress.

**Key words** *Erigeron breviscapus* (Vant.) H.-Mazz; Heat acclimation; High temperature stress; Physiological and biochemical characteristics