



高温高湿胁迫对鼠尾草属5种植物生理特性的影响

陈云, 肖汉文, 黄艳波, 周翔宇, 黄卫昌, 彭东辉

引用本文:

陈云,肖汉文,黄艳波,周翔宇,黄卫昌,彭东辉. 高温高湿胁迫对鼠尾草属5种植物生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(6): 845–852.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4671>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[盐胁迫对4个水稻种质抗逆性生理的影响](#)

Effects of Salt Stress on Resistance Physiology of Four Rice Germplasms

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 149–156 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3920>

[苜蓿幼苗对铝胁迫的生理响应及综合评价](#)

Physiological Response and Comprehensive Evaluation of Alfalfa Seedlings to Aluminum Stress

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 50–58 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4238>

[7种木莲属植物抗寒性评价及其生理机制](#)

Evaluation of Cold Resistance and Physiological Mechanism of Seven *Manglietia* Species

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 519–529 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4349>

[有棱丝瓜苗期耐热性及其对热胁迫的生理响应](#)

Thermotolerance of *Luffa acutangula* Seedlings and Their Physiological Response to Heat Stress

热带亚热带植物学报. 2017, 25(4): 357–369 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3680>

[水氮处理对岛礁植物假茉莉生理适应性的影响](#)

Effects of Water and Nitrogen Treatment on Physiological Adaptability of Island Reef Plant *Clerodendrum inerme*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 403–410 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4172>

[向下翻页，浏览PDF全文](#)

高温高湿胁迫对鼠尾草属 5 种植物生理特性的影响

陈云^{1,2*}, 肖汉文^{1,3*}, 黄艳波¹, 周翔宇^{1**}, 黄卫昌¹, 彭东辉²

(1. 中国科学院上海辰山植物科学研究中心/上海辰山植物园, 上海 201602; 2. 福建农林大学园林学院, 福州 350002; 3. 南京林业大学, 南京 210037)

摘要: 为探究具有较高观赏价值的鼠尾草属(*Salvia*)植物的耐湿热性, 采用人工气候箱模拟高温高湿环境, 对丹参(*S. miltiorrhiza*)、张家界鼠尾草(*S. daigui*)、贵州鼠尾草(*S. cavaleriei*)、铁线鼠尾草(*S. adiantifolia*)及‘辰丹月白’鼠尾草(‘Chendanyuebai’)的外部形态变化及生理生化响应进行研究, 并利用隶属函数法对 5 种鼠尾草属植物的耐湿热能力进行综合评价。结果表明, 5 种鼠尾草在胁迫下黄叶数明显增多, 但受湿热伤害程度不高, 胁迫结束后经过正常养护均可恢复正常生长; 在复合胁迫下, 叶绿素含量下降, 相对电导率和丙二醛含量上升, 植株受到一定程度的湿热伤害; 胁迫后, 超氧化物歧化酶活性和渗透调节物质含量均显著提高, 产生了适应性反应。5 种鼠尾草的耐湿热能力表现为: 张家界鼠尾草~铁线鼠尾草>‘辰丹月白’鼠尾草~丹参>贵州鼠尾草。‘辰丹月白’鼠尾草表现出了较强的耐湿热能力, 可以推广栽培。

关键词: 鼠尾草属; 高温高湿胁迫; 耐湿热性; 生理特性

doi: 10.11926/jtsb.4671

Effects of High Temperature and Humidity Stress on Physiological Characteristics of Five *Salvia* Species

CHEN Yun^{1,2*}, XIAO Hanwen^{1,3*}, HUANG Yanbo¹, ZHOU Xiangyu^{1**}, HUANG Weichang¹, PENG Donghui²

(1. Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences/Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China; 2. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to explore the humidity and heat tolerance of *Salvia* species with high ornamental value, *S. miltiorrhiza*, *S. daigui*, *S. cavaleriei*, *S. adiantifolia* and ‘Chendanyuebai’ were planted in artificial climate chambers for simulating high temperature and high humidity environment. The morphological changes and physiological responses of *Salvia* were studied, and the humidity and heat tolerance of five *Salvia* species was comprehensively evaluated by membership function method. The results showed that the number of yellow leaves of 5 *Salvia* species increased significantly under stress, but the degree of damage by humidity and heat was not high, and all of them could be restored to normal growth after stress; under the complex stress, the chlorophyll content of these *Salvia* species decreased, relative conductivity and malondialdehyde content increased, indicating that the plants were damaged by moisture and heat to some extent. The superoxide dismutase activity and osmoregulatory substance content in *Salvia* species significantly increased after stress, showing an adaptive response. The moisture and heat tolerance of 5 *Salvia* species were in the order of *S. daigui* ≈ *S. adiantifolia* > ‘Chendanyuebai’ ≈ *S. miltiorrhiza* > *S. cavaleriei*. Therefore, ‘Chendanyuebai’ showed strong resistance to humidity and heat, and could be introduced and cultivated.

Key words: *Salvia*; High temperature and humidity stress; Damp-heat resistance; Physiological characteristics

收稿日期: 2022-05-19 接受日期: 2022-07-08

基金项目: 上海市科学技术委员会社发项目(20dz1203902); 上海市花卉技术体系建设项目(202208); 上海市科委科技计划项目(20392000600)资助
This work was supported by the Project for Social Development of Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (Grant No. 20dz1203902), the Project for Agriculture Technology System in Shanghai (Grant No. 202208), and the Program for Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Committee (Grant No. 20392000600).

作者简介: 陈云(1993年生), 女, 硕士, 主要从事园林植物与应用。E-mail: 951150287@qq.com

* 并列第一作者

** 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouxiangyu80@hotmail.com

鼠尾草属(*Salvia*)是唇形科(Lamiaceae)中最大的属, 约有 1 000 种^[1]。根据花器官结构(形态、内部结构、雄蕊特征)和花粉接触传粉昆虫的部位可将东亚鼠尾草类群分为 3 亚属: 弧隔鼠尾草亚属(subg. *Salvia*)、荔枝草亚属(subg. *Sclarea*)和鼠尾草亚属(subg. *Allagospadonopsis*)^[3]。中国是鼠尾草属东亚分布中心, 有 82 种 24 变种, 分布范围广, 尤以西南地区为分布中心, 种类繁多^[4]。我国鼠尾草花部形态各异、花色丰富、植株姿态优美, 具有芳香气味, 有较高的观赏价值^[6]。但我国园林上常用的鼠尾草种类主要来源于国外, 对国产鼠尾草的研究主要集中在药用价值和传粉生物学等方面^[7], 对其引种栽培、观赏评价和园林应用的研究较少。

近年来, 全球气温变暖加剧, 政府间气候变化专门委员会(IPCC) 2021 报告指出, 全球地表温度比 1850—1900 年间升高 1.09 °C, 到 21 世纪 30 年代中期, 气温上升可能达到或超过 1.5 °C^[11]。研究预测未来中国极端高温事件(≥ 35 °C)发生频率将增加 4.5%^[12], 华中、华东和华南地区的夏季降水增加明显, 洪涝灾害加重^[13]。在我国长江以南地区, 高温和高湿往往同时发生, 对许多鼠尾草属植物的生长造成严重影响, 已经成为限制引种栽培的主要环境因子。但两者复合胁迫对鼠尾草生长和生理影响的研究还未见报道, 许多兼有较高药用和观赏价值的鼠尾草属植物缺乏引种栽培的指导依据。

为此, 本研究选取国产鼠尾草属中具有较高园林观赏价值的 4 种植物及 1 种杂交后代为试验材料, 分析在高温高湿环境下鼠尾草的形态变化、叶绿素含量(SPAD)、细胞质膜透性、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性及可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛(malondialdehyde, MDA)和游离脯氨酸(proline, Pro)含量的变化^[14], 探讨其对高温高湿复合环境的耐受性差异及生理变化, 筛选出耐湿热性较强的鼠尾草种类, 以期今后国产鼠尾草的选育、应用和栽培管理提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

本研究选取引种至上海市唇形科植物国家林木种质资源库内的 5 种鼠尾草属植物: 丹参(*Salvia miltiorrhiza*)、张家界鼠尾草(*S. daiguii*)、贵州鼠尾草(*S. cavaleriei*)、铁线鼠尾草(*S. adiantifolia*)和‘辰丹

月白’鼠尾草(人工杂交 F₁ 代, ♂*S. miltiorrhiza* × ♀*S. daiguii*, ‘Chendanyuebai’)。所有材料均为 2 a 生盆栽实生苗, 统一进行水分管理, 每隔 2 d 浇透 1 次水。选择生长状况良好、长势一致, 于 2021 年 9 月移至人工气候箱进行耐湿热试验处理。

1.2 试验处理

首先在人工气候箱(上海一恒科学仪器有限公司)中进行温度 35 °C、光强 100% [312.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 的热激处理(12 h), 然后进行高温高湿处理。根据 2021 年上海市气象局(<http://sh.cma.gov.cn/>)气象数据, 7 月—9 月上海最高温度可达 38 °C, 平均昼夜温差约 7 °C, 试验组温度设置为 40 °C/33 °C (昼/夜), 空气湿度 90%~95%, 土壤湿度 95%~100%; 以试验起始时(0 d)为对照, 温度设置为 25 °C/20 °C (昼/夜), 空气湿度 65%~70%。白天光照强度 100%, 夜晚关闭光照, 每隔 2 d 浇透 1 次水。每物种分别于处理 0、3、6、9 d 时取相同位置展开的成熟叶片, 进行理化指标的测定, 同时记录植株的形态变化。每种鼠尾草随机选择 3 株, 每株 1~2 个重复, 共 5 个重复。

1.3 方法

形态指标 参考于晓英^[6]和陈文志^[17]的方法, 将高温高湿伤害程度划分为 5 级: 1 级, 生长旺盛, 叶色鲜亮, 植株挺立; 2 级, 少于 1/4 的叶片表现湿热伤害症状(叶色发黄卷曲、萎蔫掉落、植株倒伏等); 3 级, 1/4~1/2 的叶片表现湿热伤害症状; 4 级, 1/2 至 3/4 的叶片表现湿热伤害症状; 5 级, 3/4 以上的叶片表现湿热伤害症状至植株死亡。

叶片生理生化指标的测定 叶绿素相对含量的测定参照冯时等^[18]的方法, 采用植物营养测定仪测定。细胞质膜透性采用电导率仪测定沸水浴前后的电导值 S_1 、 S_2 , 计算叶片的相对电导率= $S_1/S_2 \times 100\%$ ^[19]; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法^[19]测定。参照生工生物工程(上海)股份有限公司的试剂盒, 采用氮蓝四唑(NBT)法测定 SOD 活性、采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量、采用酸性茚三酮法测定 Pro 含量。

耐湿热性的综合评定 采用模糊数学隶属函数分析法^[20]对 5 种鼠尾草属植物进行耐湿热性综合评定。隶属函数公式为 $U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 如果某一指标与综合评判结果为负相关, 则用反隶属函数进行定量转换, 公式为 $U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 式中, X_i 为指标测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为指标的最大值和最小值。每种植物将各

指标的耐湿热隶属值累加求平均, 进行耐湿热性比较。

1.4 数据的统计分析

所有数据用 Microsoft Excel 进行初步处理, 采用 SPSS 25.0 中的广义线性模型对高温高湿胁迫后的数据进行分析, 将处理时间作为自变量, 生理指标数据作为因变量, 鼠尾草植株作为随机因子, 并采用单因素方差分析, 使用 Tukey 进行事后检验, 用 GraphPad Prism 8.0 绘制图表, 数据采用平均值±标准偏差(Mean±SD)表示。

2 结果和分析

2.1 胁迫对植株的伤害

由表 1 可见, 随着胁迫时间的延长, 5 种鼠尾草的伤害等级均上升, 但受害程度较低, 处理 9 d 仅比对照上升 1 个等级, 无植株死亡。试验开始时

除铁线鼠尾草正常生长外, 其余鼠尾草的伤害等级均为 2, 表现为底部部分老叶发黄、枯萎; 胁迫 3 d, 铁线鼠尾草开始出现底部叶片发黄、枯萎, 伤害等级上升, 其余种类底部发黄、枯萎叶片数量增加, 但仍少于 1/4; 胁迫 6 d 时, 丹参和‘辰丹月白’鼠尾草底部发黄叶片增加明显, 伤害等级提升; 胁迫 9 d 时, 各鼠尾草底部发黄叶片仍处于上升趋势, 其中张家界鼠尾草和贵州鼠尾草的受害叶片数量超过 1/4, 伤害等级上升。整个胁迫过程中, 各鼠尾草植株整体颜色趋向变黄, 丹参、张家界鼠尾草和贵州鼠尾草表现得较为明显。胁迫结束后, 经正常养护, 5 种鼠尾草均恢复正常生长。

2.2 胁迫对叶绿素含量的影响

由图 1 可见, 随着胁迫时间的延长, 5 种鼠尾草叶片的叶绿素 SPAD 值总体呈下降的趋势, 但变化拐点和幅度不同。丹参仅在胁迫 3 d 时出现明显下降, 随后保持稳定, 而张家界鼠尾草、贵州鼠尾

表 1 高温高湿胁迫对 5 种鼠尾草的伤害等级

Table 1 Damage degree of five *Salvia* species under high temperature and high humidity stress

物种 Species	胁迫时间 Stress time (d)				恢复 5 d Restore 5 d
	0	3	6	9	
丹参 <i>S. miltiorrhiza</i>	2	2	3	3	2
张家界鼠尾草 <i>S. daiguii</i>	2	2	2	3	2
贵州鼠尾草 <i>S.cavaleriei</i>	2	2	2	3	2
铁线鼠尾草 <i>S. adiantifolia</i>	1	2	2	2	1
‘辰丹月白’鼠尾草 <i>Salvia</i> ‘Chendanyuebai’	2	2	3	3	2

草的下降较为明显, 3 种鼠尾草胁迫 9 d 的 SPAD 值与对照有显著差异($P<0.05$); ‘辰丹月白’鼠尾草在胁迫 6 d 时显著下降, 虽在胁迫 9 d 出现上升, 但与 6 d 时无显著差异($P>0.05$); 而铁线鼠尾草在胁迫时间内保持稳定, 无显著差异。胁迫 9 d 的 SPAD 比对照的下降幅度为贵州鼠尾草(16.5%)>张家界鼠尾草(14.8%)>丹参(12.3%)>‘辰丹月白’鼠尾草(5.5%)>铁线鼠尾草(2.3%)。

2.3 胁迫对细胞膜透性的影响

由图 2 可知, 高温高湿胁迫下 5 种鼠尾草叶片的相对电导率逐渐上升, 细胞膜透性增大, 胁迫 9 d 与对照有显著差异, 但各物种出现显著差异的时间不同。贵州鼠尾草胁迫 6 d 与对照有显著差异, 之后大幅上升, 胁迫 9 d 时达最高, 其余种类均在胁迫 3 d 与对照有显著差异($P<0.05$), 之后稳定上升。细胞膜受损程度以贵州鼠尾草(99.1%)>张家界鼠尾

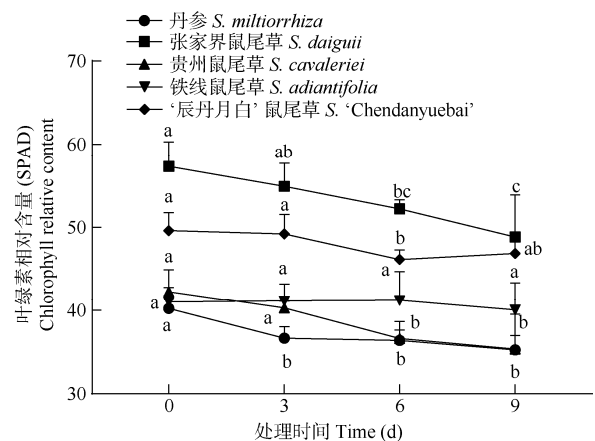


图 1 高温高湿对 5 种鼠尾草叶绿素相对含量的影响。同一条线上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Effects of high temperature and humidity on chlorophyll relative content of five *Salvia* species. Different letters upon the same line indicate significant difference at 0.05 level. The same below

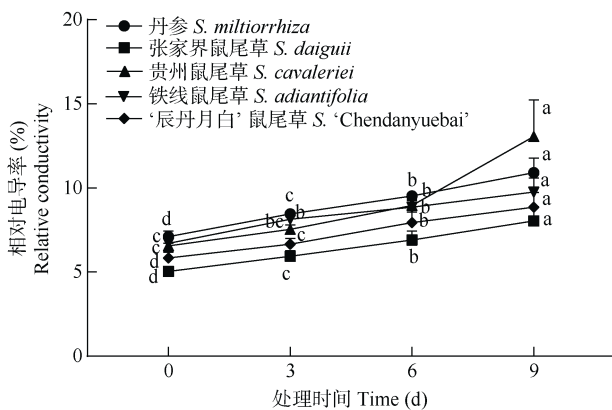


图 2 高温高湿胁迫对 5 种鼠尾草叶片细胞膜透性的影响

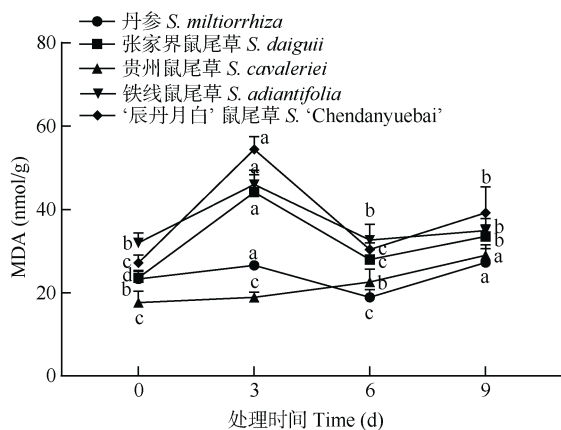
Fig. 2 Effects of high temperature and high humidity stress on cell membrane permeability of five *Salvia* leaves

草(60%)>丹参(53.5%)>'辰丹月白'鼠尾草(51.7%)>铁线鼠尾草(45.7%)。

2.4 胁迫对 SOD 活性和 MDA 含量的影响

由图 3 可见, 贵州鼠尾草叶片的 MDA 含量随胁迫时间的延长而逐渐上升, 其余种类呈上升-下降-上升的趋势。张家界鼠尾草、铁线鼠尾草、'辰丹月白'鼠尾草叶片的 MDA 含量在胁迫 3 d 迅速上升, 达最高, 而后急剧下降; 丹参叶片的 MDA 含量在胁迫 3 d 的增幅较小, 但仍比对照有显著差异($P < 0.05$), 并在胁迫 6 d 下降至最低; 贵州鼠尾草叶片的 MDA 含量在胁迫时间内呈上升趋势, 但整体水平较低。除铁线鼠尾草外, 其余种类胁迫 9 d 的叶片 MDA 含量均显著高于对照。

在胁迫期间, 5 种鼠尾草叶片的 SOD 活性比对照均显著提高($P < 0.05$), 但各物种的变化趋势和幅度略有不同。丹参的 SOD 活性随胁迫时间延长呈



逐渐增长的趋势, 胁迫 9 d 时达最高, 说明其对高温高湿较不敏感; 除张家界鼠尾草外, 其余种类胁迫 3 d 的 SOD 活性与对照没有显著差异($P > 0.05$); 除丹参外, 其余鼠尾草的 SOD 活性均在胁迫 6 d 时大幅上升, 达最大值, 而后急剧下降, 但在胁迫结束后仍显著高于 0 d。

2.5 胁迫对渗透调节物质含量的影响

由图 4 可见, 5 种鼠尾草叶片 Pro 含量在高温高湿胁迫下的变化趋势和幅度不同。贵州鼠尾草和铁线鼠尾草随胁迫时间的延长持续上升, 其余种类在胁迫 3~6 d 呈下降趋势。5 种鼠尾草胁迫 9 d 的 Pro 含量比对照均显著增加, 上升了 83.1%~203.1%。5 种鼠尾草叶片的可溶性蛋白含量在胁迫时总体呈现上升的趋势, 均在胁迫 9 d 时达最高, 比对照增加了 65.8%~101.4%。除张家界鼠尾草外, 其余种类叶片的可溶性糖含量在胁迫 6 d 的变化平缓, 偶有下降, 均无显著差异($P > 0.05$), 5 种鼠尾草胁迫 9 d 的可溶性糖含量比对照增加了 49.5%~140.6%。

2.6 综合评价

隶属函数综合值越大, 表示其耐湿热性越强。根据隶属函数综合值, 对 5 种鼠尾草进行耐湿热能力评价(表 2), 由强到弱依次为张家界鼠尾草~铁线鼠尾草>'辰丹月白'鼠尾草~丹参>贵州鼠尾草。

3 结论和讨论

植物在胁迫下形态特征的变化可以直观反映其受害程度, 是评价植物对逆境适应性强弱的直接指标^[14]。本研究中, 5 种鼠尾草在高温高湿胁迫下均发生了外部形态变化, 底部黄叶数增多, 叶色变

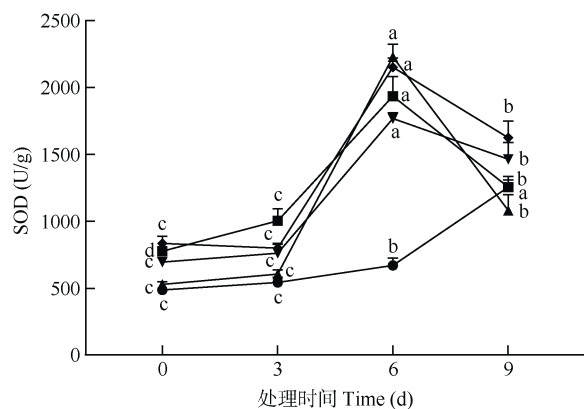


图 3 高温高湿胁迫对 5 种鼠尾草叶片的 MDA 含量和 SOD 活性的影响

Fig. 3 Effects of high temperature and humidity stress on MDA content and SOD activity in leaves of five *Salvia* species

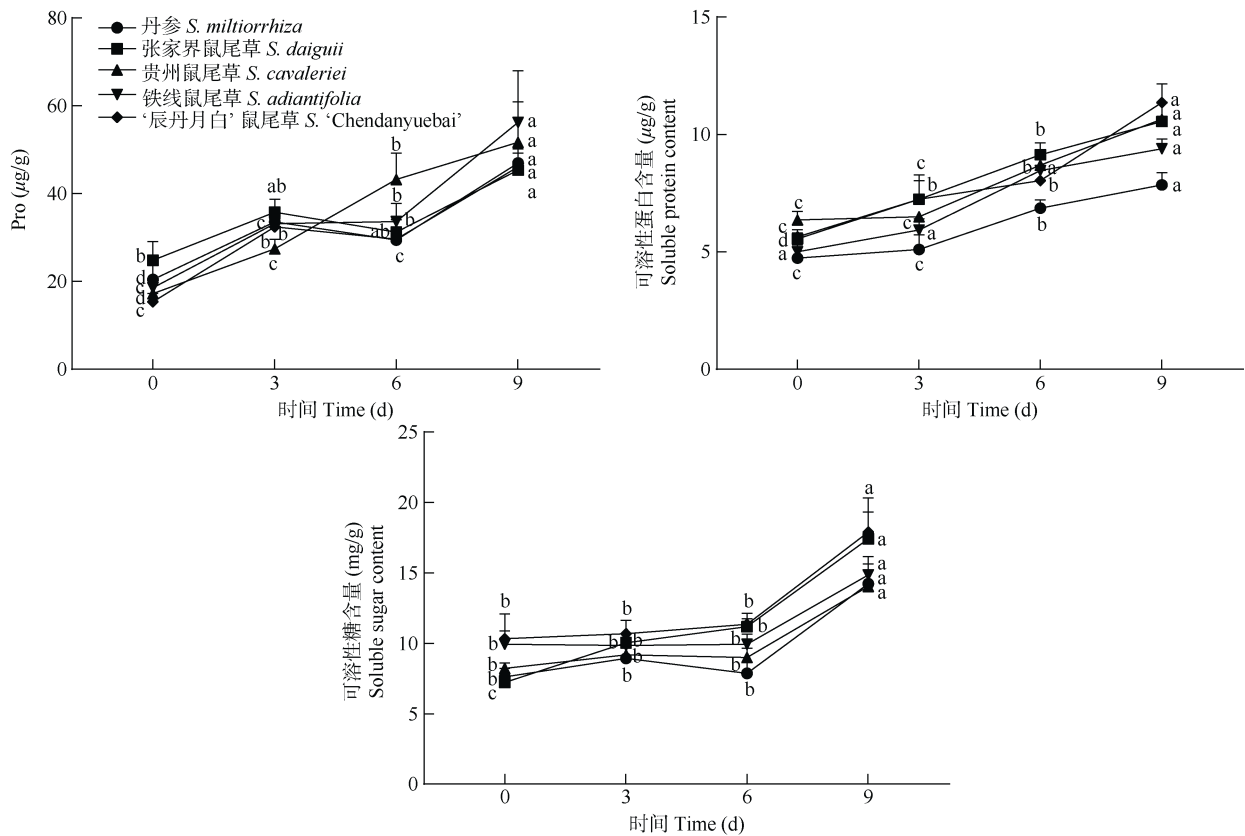


图 4 高温高湿胁迫对 5 种鼠尾草叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effects of high temperature and humidity stress on osmoregulatory substances contents in leaves of five *Salvia* species

表 2 耐湿热指标的综合隶属函数值

Table 2 Comprehensive membership function values of humidity and heat resistance indexes

植物 Species	指标 Index								平均 Average	排序 Rank
	SPAD	相对电导率 Relative conductivity	SOD	MDA	Pro	可溶性蛋白 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar			
张家界鼠尾草 <i>Salvia daigui</i>	0.53	0.48	0.43	0.40	0.42	0.51	0.46	0.46	1	
铁线鼠尾草 <i>S. adiantifolia</i>	0.70	0.54	0.31	0.45	0.26	0.50	0.45	0.46	1	
'辰丹月白'鼠尾草 <i>Salvia 'Chendanyuebai'</i>	0.52	0.49	0.39	0.41	0.30	0.42	0.50	0.43	3	
丹参 <i>S. miltiorrhiza</i>	0.38	0.50	0.61	0.33	0.31	0.45	0.46	0.43	3	
贵州鼠尾草 <i>S. cavaleriei</i>	0.47	0.38	0.39	0.34	0.32	0.39	0.51	0.40	5	

SPAD: 叶绿素相对含量; SOD: 超氧化物歧化酶; MDA: 丙二醛; Pro: 游离脯氨酸。

SPAD: Relative content of chlorophyll; SOD: Superoxide dismutase; MDA: Malondialdehyde; Pro: Proline.

黄, 说明植物都受到一定程度的湿热伤害。但胁迫结束后鼠尾草均可恢复正常生长, 表明本研究的高温高湿胁迫程度并未对鼠尾草产生不可逆的损伤, 耐湿热性较好。此外, 在对照环境下, 除铁线鼠尾草外, 其余鼠尾草的底部老叶也出现发黄、枯萎, 与我们在资源圃中(正常生长条件)观察的结果一致, 这可能是植物生长过程中的正常更新, 而高温高湿使得这一过程加快, 黄叶数明显增多。

叶绿素是植物光合作用的物质基础, 对植物

生长有重要作用, 其含量变化与植物抗逆性密切相关^[22]。SPAD 值是一个与叶片叶绿素含量相关的无量纲比值, 反映植物绿色程度, 与叶片叶绿素含量呈正比^[24]。本研究中, '辰丹月白'鼠尾草的 SPAD 值的变化幅度小于亲本, 说明其叶绿素受高温高湿胁迫影响小于亲本。贵州鼠尾草叶绿素下降最多, 受到的影响最大, 而铁线鼠尾草最小, 说明各鼠尾草对高温高湿的耐受性差异。

细胞膜的稳定性能准确反映植物在逆境中的

适应能力,是评价植物抗逆性的适宜指标之一^[26]。植物在逆境中细胞膜结构会遭到破坏,使细胞内的内含物外渗,引起电导率的改变^[28],因而电导率可以判断植物细胞膜的受损程度。本研究中,鼠尾草在高温高湿胁迫下相对电导率持续下降,细胞膜持续受损,这与前人^[14]的研究结果相似,且与其形态表现较一致,说明相对电导率的变化可以作为判断鼠尾草属植物耐湿热性的根据。此外,本研究还表明鼠尾草的细胞膜受损程度与 SPAD 的下降幅度具有一致性,故推测叶片细胞膜透性增加是导致叶绿素含量降低的重要原因。

植物在逆境中,细胞氧自由基的产生和清除的平衡遭到破坏,细胞膜脂过氧化加剧,导致膜脂过氧化最终分解产物 MDA 含量的增加^[31]。SOD 是植物体内重要的抗氧化酶,能通过歧化反应使 O_2^- 、 $\cdot OH$ 等活性氧转变为 O_2 和 H_2O_2 ^[32]。在高温高湿胁迫下,不同植物的 SOD 活性和 MDA 含量变化趋势有差异,无明显上升或下降规律^[29]。本研究结果相似,且鼠尾草的 MDA 含量变化与细胞膜透性变化并不吻合,说明 MDA 并非唯一影响细胞膜透性的因子,可能还有其他原因导致膜透性增加。张家界鼠尾草、铁线鼠尾草和‘辰丹月白’鼠尾草的 SOD 活性和 MDA 含量呈显著负相关,说明 SOD 对 MDA 含量的重要影响;但在丹参和贵州鼠尾草中并未呈现这种规律,可能其他抗氧化酶在高温高湿胁迫中同样对 MDA 含量的降低起着重要作用,这与许华等^[22]对美丽鼠尾草和贵州鼠尾草的研究相似。

脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白都属于渗透调节物质,其含量变化可以反映植物的抗逆性,抗性强的植物往往积累更多的渗透调节物质^[34]。不同植物体内的渗透调节物质在受到胁迫后变化趋势不一致,多数呈持续上升或先升后降的变化趋势,但也有持续下降或暂时下降的现象^[14]。本研究结果表明,不同鼠尾草的渗透调节物质含量变化趋势存在差异,可能是不同鼠尾草对于逆境的敏感性和耐受性不同,对环境变化较不敏感或所受伤害超过自身调节范围时,渗透调节物质的上升速度小于其被分解或破坏的速度,从而导致其含量短暂降低。但胁迫结束后 5 种鼠尾草的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量比对照仍有不同程度的提升,表明鼠尾草所受的湿热伤害仍在其调节范围内,具有较强的耐湿热能力。

通过隶属函数对 7 项指标进行综合分析,耐湿

热性为张家界鼠尾草~铁线鼠尾草>‘辰丹月白’鼠尾草~丹参>贵州鼠尾草。但各鼠尾草的隶属函数值差距较小,且在实际栽培中铁线鼠尾草在上海的夏季表现不如丹参,这可能是由于不同鼠尾草耐胁迫时间的临界点不同。在胁迫 9 d 内,鼠尾草的耐湿热性均表现较好,而随着胁迫时间的延长,如夏季的持续高温高湿,鼠尾草的胁迫能力可能会发生变化。因此,未来在对鼠尾草属植物的耐湿热性测定时应适当延长胁迫时间。

综上,5 种鼠尾草在胁迫中未出现严重的湿热伤害,胁迫结束后仍能恢复正常生长,具有较好的耐湿热性,可以在上海及周边地区进行引种栽培。杂交鼠尾草花朵美丽、花序及植株挺拔,兼具父母本的优点,且耐湿热性好,可以作为观赏植物进行推广种植。

致谢 感谢魏宇昆老师在研究过程中对本人的支持及解惑。

参考文献

- [1] DREW B T. Evolution, pollination biology, and species richness of *Salvia* (Lamiaceae) [J]. *Int J Plant Sci*, 2020, 181(8): 767–769. doi: 10.1086/710711.
- [2] CELEP F, ATALAY Z, DIKMEN F, et al. Pollination ecology, specialization, and genetic isolation in sympatric bee pollinated *Salvia* (Lamiaceae) [J]. *Int J Plant Sci*, 2020, 181(8): 800–811. doi: 10.1086/710238.
- [3] HUANG Y B, WEI Y K, GE B J, et al. Pollination mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(9): 2282–2289. [黄艳波, 魏宇昆, 葛斌杰, 等. 鼠尾草属东亚分支的传粉模式 [J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2282–2289. doi: 10.5846/stxb201308152084.]
- [4] LI H W, HEDGE I C. Lamiaceae [M]// WU Z Y, RAVEN P H. *Flora of China*, Vol. 17. Beijing: Science Press & St. Louis: Missouri Botanical Garden, 1994: 50–299.
- [5] WEI Y K, WANG Q, HUANG Y B. Species diversity and distribution of *Salvia* (Lamiaceae) [J]. *Biodiv Sci*, 2015, 23(1): 3–10. [魏宇昆, 王琦, 黄艳波. 唇形科鼠尾草属的物种多样性与分布 [J]. *生物多样性*, 2015, 23(1): 3–10. doi: 10.17520/biods.2014070.]
- [6] CHANG Y H, WEI Y K, MA Y P, et al. Current situation and future of Chinese native *Salvia* L. in garden and landscape application [J]. *J W China For Sci*, 2020, 49(5): 37–41. [常宇航, 魏宇昆, 马永鹏, 等. 中国原生鼠尾草属植物园林应用现状与展望 [J]. *西部林业科学*,

- 2020, 49(5): 37–41. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.05.006.]
- [7] HUANG Y B, WEI Y K, WANG Q, et al. Floral morphology and pollination mechanism of *Salvia liguliloba*, a narrow endemic species with degraded lever-like stamens [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(7): 753–761. [黄艳波, 魏宇昆, 王琦, 等. 舌瓣鼠尾草退化杠杆雄蕊的相关花部特征及传粉机制 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 753–761. doi: 10.17521/cjpe.2015.0072.]
- [8] FENG J H, BYEOL K S, JUNG L H, et al. Effects of *Salvia multi-orrhiza* Bunge extract and its single components on monosodium urate-induced pain *in vivo* and lipopolysaccharide-induced inflammation *in vitro* [J]. *J Trad Chin Med*, 2021, 41(2): 219–226.
- [9] HONG Q, YANG Y, ZHU B, et al. Protective effect and active mechanism research of *Salvia przewalskii* total phenolic acid extract against ionizing radiation damage in vascular endothelial cells [J]. *Mil Med Sci*, 2021, 45(9): 646–652. [洪倩, 杨阳, 朱斌, 等. 甘西鼠尾草总酚酸提取物对电离辐射血管内皮细胞损伤的保护作用及机制研究 [J]. *军事医学*, 2021, 45(9): 646–652. doi: 10.7644/j.issn.1674-9960.2021.09.002.]
- [10] XIAO H W, HUANG Y B, WANG Q, et al. Diversity of visiting insects and changes of pollinator behavior in alpine species *Salvia castanea* Diels (Lamiaceae) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(5): 1841–1853. [肖汉文, 黄艳波, 王琦, 等. 高山物种栗色鼠尾草(*Salvia castanea* Diels)访花昆虫多样性与传粉行为变化 [J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1841–1853. doi: 10.5846/stxb202101070071.]
- [11] LIU L. Global extreme weather tends to normalization [J]. *Ecol Econ*, 2021, 37(9): 5–8. [刘兰. 全球极端天气走向常态化 [J]. *生态经济*, 2021, 37(9): 5–8.]
- [12] ZHAI P M, PAN X H. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th Century [J]. *Acta Geogr Sin*, 2003, 58(S1): 1–10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 2003, 58(S1): 1–10. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001.]
- [13] XU Y L, HUANG X Y, ZHANG Y, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. *Adv Clim Change Res*, 2005, 1(2): 80–83. [许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 中国21世纪气候变化情景的统计分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(2): 80–83. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2005.02.007.]
- [14] WANG Y. Comprehensive evaluation and physiological reaction of ground-cover chrysanthemum (*Chrysanthemum × morifolium*) under heat and humidity stress [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [王亚. 地被菊苗期耐湿热能力评价及其生理的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [15] PAN W, ZHANG F Q, ZHANG W Q, et al. Effects of high temperature and humidity stress on physiological-biochemical indexes of *Rhodoleia championii* and others and its comprehensive evaluation [J]. *Guangdong For Sci Technol*, 2012, 26(3): 1–8. [潘文, 张方秋, 张卫强, 等. 高温高湿胁迫对红花荷等植物生理生化指标的影响及评价 [J]. *广东林业科技*, 2012, 26(3): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2012.03.001.]
- [16] YU X Y. Studies on response to heat stress and *in vitro* selection of heat-tolerant variants in *Senecio × hybridus* [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006. [于晓英. 瓜叶菊(*Senecio × hybridus*)对热胁迫的反应及耐热变异体的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.]
- [17] CHEN W Z. Studies on the effects of medicament treatment on improving the heat-resistance of *Primula L.* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007. [陈文志. 药物处理对报春花抗热性的影响研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.]
- [18] FENG S, LIU Q L, WEI Y K, et al. Research on thermo tolerance of eight domestic *Salvia* in China [J]. *Hubei Agric Sci*, 2017, 56(16): 3088–3092. [冯时, 刘群录, 魏宇昆, 等. 八种中国原产鼠尾草属植物耐热性比较 [J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(16): 3088–3092. doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2017.16.022.]
- [19] CANG J, ZHAO S J. Experimental Course of Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. [苍晶, 赵会杰. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.]
- [20] ZHENG Y, HE T Y, CHEN L Y, et al. Effects of high temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Rhododendron hybridum* [J]. *J Fujian Agric For Univ (Nat Sci)*, 2012, 41(6): 608–615. [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. doi: 10.3969/j.issn.1671-5470.2012.06.010.]
- [21] ZHU J, HUANG W C, CAO J G, et al. Study on moisture tolerance evaluation and physiological mechanisms in *Bletilla* spp. in Shanghai [J]. *Plant Physiol Commun*, 2019, 55(2): 209–217. [朱娇, 黄卫昌, 曹建国, 等. 上海适生白及属植物的耐湿性评价及其生理机制研究 [J]. *植物生理学报*, 2019, 55(2): 209–217. doi: 10.13592/j.cnki.pppj.2018.0438.]
- [22] XU H, XIE C, WEI Y K, et al. Comparison of tolerance between two *Salvia* plants to stress of simulated acid rain and study of the physiological mechanisms [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2017, 12(6): 206–214. [许华, 谢璨, 魏宇昆, 等. 2种鼠尾草对模拟酸雨胁迫的耐受性比较及其生理机制研究 [J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(6): 206–214. doi: 10.7524/AJE.1673-5897.20161127001.]
- [23] LI C C, LI N G, WU Z F. Effects of high temperature and drought combined stress on physiological indexes of seedlings of different

- peanut varieties [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2021, 43(5): 906–913. [李聪聪, 李乃光, 吴正锋. 高温干旱复合胁迫对花生幼苗生理指标的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(5): 906–913. doi: 10.19802/j.issn.1007-9084.2020199.]
- [24] WU S X, MAO R Z, LI H J, et al. Study on spatio-temporal variability of green degree in winter wheat leaf [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2005, 13(4): 82–85. [吴素霞, 毛任钊, 李红军, 等. 冬小麦叶片绿度时空变异特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 82–85.]
- [25] LI H Y, REN Q P, SUN S E, et al. Study on relation between SPAD value and chlorophyll contents in 10 kinds horticulture woody plants [J]. *For Sci Technol*, 2009, 34(3): 68–70. [李海云, 任秋萍, 孙书娥, 等. 10 种园林树木叶绿素与 SPAD 值相关性研究 [J]. *林业科技*, 2009, 34(3): 68–70. doi: 10.3969/j.issn.1001-9499.2009.03.024.]
- [26] FOKAR M, NGUYEN H T, BLUM A. Heat tolerance in spring wheat: I. Estimating cellular thermotolerance and its heritability [J]. *Euphytica*, 1998, 104(1): 1–8. doi: 10.1023/A:1018346901363.
- [27] THIAW S, HALL A E. Comparison of selection for either leaf-electrolyte-leakage or pod set in enhancing heat tolerance and grain yield of cowpea [J]. *Field Crops Res*, 2004, 86(2/3): 239–253. doi: 10.1016/j.fcr.2003.08.011.
- [28] SAVCHENKO G E, KLYUCHAREVA E A, ABRAMCHIK L M, et al. Effect of periodic heat shock on the inner membrane system of *Etioplasts* [J]. *Russ J Plant Physiol*, 2002, 49(3): 349–359. doi: 10.1023/A:1015592902659.
- [29] XU Y. Studies on the physiological and biochemical characteristics of heat and humidity tolerant tree peony [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007. [徐艳. 几个牡丹品种的耐湿热生理生化特性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.]
- [30] LIU L Y. Studies on the physiological and biochemical character of heat and humidity tolerant *Paeonia lactiflora* [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008. [刘林艳. 几个芍药品种的耐湿热生理生化特性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.]
- [31] GOSSETT D R, MILLHOLLON E P, LUCAS M C. Antioxidant response to NaCl stress in salt-tolerant and salt-sensitive cultivars of cotton [J]. *Crop Sci*, 1994, 34(3): 706–714. doi: 10.2135/cropsci1994.0011183X003400030020x.
- [32] FADZILLA N M, FINCH R P, BURDON R H. Salinity, oxidative stress and antioxidant responses in shoot cultures of rice [J]. *J Exp Bot*, 1997, 48(2): 325–331. doi: 10.1093/jxb/48.2.325.
- [33] LIU C. Effect of high temperature and waterlogging on agronomic and physiological traits in flowering Chinese cabbage [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. [刘畅. 高温涝渍对菜心农艺性状和生理特性影响的研究 [D]. 广州: 广州大学, 2020.]
- [34] WANG Y, CHEN J W, DI X Y. A comparative study on the SOD, POD, MDA and dissoluble protein of six provenances of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) under water stress [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(10): 1449–1453. [王琰, 陈建文, 狄晓艳. 水分胁迫下不同油松种源 SOD、POD、MDA 及可溶性蛋白比较研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1449–1453. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.10.011.]