

高温胁迫对粉带扦插苗形态和生理特征的影响

夏 钦, 何丙辉*, 刘玉民*, 徐 健

(西南大学资源环境学院, 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:对粉带扦插苗进行高温处理, 研究高温胁迫对其外观形态和生理生化指标的影响。结果表明, 35 °C 高温胁迫或 40 °C 高温胁迫短时间(2d)内, 扦插苗受害指数和大部分生理生化指标均与对照差异不显著, 粉带未产生热伤害; 40 °C 高温胁迫长时间(3d)或 45 °C 高温胁迫短时间(2d)内, 粉带产生较严重的热伤害, 但植株仍能自我调节和恢复, 受害指数、可溶性蛋白、可溶性糖、Pro、MDA 含量、SOD 和 CAT 活性均急剧上升, 叶绿素、类胡萝卜素含量明显减少, POD 活性略有降低; 45 °C 高温胁迫 3d, 对粉带产生热伤害, 各项生理生化指标急剧下降, 40% 的扦插苗整株萎蔫枯死, 大部分植株已无法通过自身调节恢复。粉带叶片的叶绿素、Pro、MDA 含量和 POD 活性在高温胁迫时变化明显, 且 4 种指标与受害指数之间具有显著相关性, 其相关系数绝对值均在 0.88 ($P < 0.001$) 以上, 可作为耐热性鉴定指标。

关键词:粉带; 高温胁迫; 形态变化; 生理反应

Effects of high temperature stress on the morphological and physiological characteristics in *Scaevola albida* cutting seedlings

XIA Qin, HE Binghui*, LIU Yumin*, XU Jian

College of Resources and Environment, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Region (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: High temperature stress is one of the important ecological factors affecting growth and development, and physiological characteristics in many plants. On the other hand, plants adapt different strategies for improving high temperature tolerance during their life cycling. *Scaevola albida* is a popular ornamental flowering crop cultivated as a bedding plant or as a beautiful cultivar in hanging baskets. Pink Ribbon, one of *Scaevola albida*'s cultivated species originated from Australia, is a perennial herb with characteristics of fan-shaped flowers, a long flowering period, and easily cutting propagation. It has been reported that continuous high temperature would generate adverse influence on *S. albida*'s growth, but the damage mechanisms of high temperature stress have not fully understood. Because *S. albida* is introduced to China for the first time, less is known its ability of adapting to the new environment and habitat in China. The effects of high temperature on the appearance shape, physiological and biochemical indices in *S. albida* cutting seedlings were investigated in Chongqing, China. The purpose of the project was to reveal the physiological adaptation mechanisms of *S. albida* to high temperature in order to provide a theoretical basis for the introduction and cultivation of this species in some regions with high temperature in summer, such as Chongqing. In the study, four temperatures: 35 °C/27 °C (10 hour day/14 hour night), 40 °C/30 °C, 45 °C/32 °C, 25 °C/22 °C (control) were set up as the levels of treatment, and 30 *S. albida* cutting seedlings were randomly selected as subjects in each of the four temperature treatments. The cutting seedlings were experienced the temperature treatment for 3 days as a processing cycle, and the observations and measurements started at the end of 1, 2 and 3 days after treatment, respectively. The results showed that compared to the

基金项目:国家林业局“948”项目(2006-4-88); 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC-2008BA7032); 西南大学青年基金项目(SWU208048); 中央高校基本科研专项资金资助项目(XDJK2009C143); 西南大学生态学重点学科“211 工程”建设经费资助项目; 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2009AB1115)

收稿日期: 2009-08-22; 修订日期: 2010-02-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hebinghui@swu.edu.cn; yuminliu@163.com

control, the injury indices and most of physiological indices of the cutting seedlings were no significant differences under the high temperature stress of 35/27 °C for 3 days or 40/30 °C for 2 days, and *S. albida* did not show symptoms of heat injury. Under the treatment of 40/30 °C for 3 days or 45/32 °C for 2 days, some serious heat injuries were produced, but the seedlings were still able to recover from the damages. The injury indices, the contents of soluble protein, soluble sugar, Pro and MDA, the activities of SOD and CAT were significantly higher in the treatments than in the control, while the contents of Chlorophyll and Carotenoid were obviously lower, and the activity of POD decreased slightly. Under the treatments of 45/32 °C for 3 days, the severe heat injuries were produced and most of the cutting seedlings could not be able to recover from the considerable damages. Each of the physiological and biochemical indices decreased dramatically, and 40% of the examined cutting seedlings were wilted to death. As the heat tolerance of plants is a genetic expression result from comprehensive physiological and biochemical processes, it is difficult to judge the synthetic adaptability of plants to heat stress using a single thermal indicator. Our studies demonstrated that the contents of Chlorophyll, Pro, MDA and the activity of POD were changed obviously to the high temperature stress, and the four variables had remarkable correlations with the injury indices (the absolute values of the correlation coefficients > 0.88 for each variable) and, therefore, they could be used as heat tolerance indices of *S. albida*.

Key Words: *Scaevola albida*; high temperature stress; morphological change; physiological response

粉带(译名)是澳大利亚扇子花(*Scaevola albida*)的栽培种,英文名为 Pink Ribbon,属于草海桐科草海桐属植物。粉带是我国首次引进的澳大利亚特产花卉,其特点为多年生、生长快、适应性强,种植当年开花,花量大、花期长、花形特别、颜色鲜艳而丰富,易扦插繁殖,是优良的观赏花卉。研究表明,逆境胁迫可导致叶片失水,从而影响叶绿素的生物合成,促进叶绿素分解,造成叶片变黄^[1];渗透调节是植物耐热和抵御高温逆境的重要生理机制之一,高温胁迫诱发细胞脱水是高温伤害的重要原因^[2];可溶性蛋白对渗透调节有一定程度的贡献,通过测定其含量在高温胁迫下的变化,可了解可溶性蛋白在植物体内的稳定性及其对高温危害的防御作用^[3];在逆境条件下植物通过合成和积累可溶性糖、脯氨酸(Pro)等有机物质来调节细胞内的渗透压,稳定细胞中酶分子的活性构象,保护酶免受直接伤害,增强适应环境的能力^[4];在高温胁迫下植物体内会不断产生活性氧破坏细胞生长,丙二醛(MDA)是膜脂过氧化产物,是细胞膜被破坏的标志物质^[3],其含量可表示膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[5]。植物体具有的抗氧化酶保护系统,如 SOD、CAT 和 POD 等,可在一定范围内清除活性氧以维持体内自由基代谢的动态平衡,降低膜脂过氧化,保护膜系统的稳定性,提高植物的耐热性^[6]。在栽培过程中发现,持续不断的高温会对粉带生长造成不利影响^[7],但高温对粉带的伤害机制尚未被揭示。

本试验通过对粉带扦插苗进行不同梯度的高温胁迫,研究其外观形态的受害情况及其生理生化指标的变化,揭示粉带对高温的生理适应机制,为其在重庆等夏季高温地区引种栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与高温处理

试验以引自澳大利亚的粉带(*S. albida*)扦插苗为材料。2008 年 12 月 1 日在西南大学南校区温室内进行扦插,扦插基质为 1 紫色土:1 珍珠岩:2 腐殖质,对扦插苗进行统一管理,不施肥,不喷激素,浇水情况一致。

2009 年 3 月 1 日开始依次(从 45 °C/32 °C 开始)进行各高温处理试验,根据重庆的气象资料^[8](最高气温达到 43 °C,最高地温达到 50 °C,6—8 月份的平均昼夜温差 8—9 °C),设定处理温度为 45 °C/32 °C(10 h 光照/14 h 黑暗)、40 °C/30 °C、35 °C/27 °C,以 25 °C/22 °C 作对照。每个温度处理试验均随机选取粉带扦插苗 30 株,采用 WASON 人工气候箱对其进行持续高温处理,控制空气湿度(60 ± 10)%,光照强度 100 μmol·m⁻²·s⁻¹,浇水情况一致。各温度处理区的处理周期均为 3d,分别于各处理 1d、2d 和 3d 后观察植株受害情况,并测定叶片的各项生理生化指标(取样从第 2 片起采叶片,同一测定指标取同一序号的叶片),所有指

标测定均重复 3 次。

1.2 测定方法

(1) 受害指数 受害指数(%) = Σ (各级株数 × 级数) / (最高级数 × 总株数) × 100%^[5]。受害程度分 5 级, 0 级: 无受害症状; 1 级: 1—2 片叶变黄; 2 级: 全部叶变黄; 3 级: 1—2 片叶萎蔫; 4 级: 整株萎蔫枯死。

(2) 参照《植物生理学实验技术》^[9], 叶绿素和类胡萝卜素含量用比色法, 可溶性蛋白用考马斯亮蓝 G-250 染色法, 可溶性糖用蒽酮比色法, 脯氨酸 (Pro) 用酸性茚三酮比色法, 丙二醛 (MDA) 用硫代巴比妥酸 (TBA) 法, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性用 NBT 光还原法, 过氧化氢酶 (CAT) 活性用碘量滴定法, 过氧化物酶 (POD) 活性用愈创木酚比色法。

1.3 统计方法与数据处理

所有数据采用 SPSS for Windows 11.0 版进行统计、方差分析和相关分析, 显著性运用最小极差法分析, 试验图表采用 Microsoft Office Excel 2003, 根据 SPSS 分析结果制作。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对粉带形态的影响

由表 1 可看出, 随着温度升高和胁迫时间延长, 粉带扦插苗的受害指数呈上升趋势。35 ℃ 高温对扦插苗形态基本无影响; 40 ℃ 高温胁迫 2d 后或 45 ℃ 高温胁迫 3d 内受害指数均与对照差异显著。在 35 ℃ 处理区, 2d 内粉带扦插苗叶片无明显变化, 生长良好, 处理 3d 后有 10% 植株出现 1 片叶变黄; 在 40 ℃ 处理区, 2d 内扦插苗生长良好, 处理 3d 后 50% 植株大部分叶片变黄, 30% 植株叶片开始卷曲、萎蔫、变软且重量变轻; 在 45 ℃ 处理区, 2d 内有半数植株出现叶萎蔫, 处理 3d 后 60% 植株出现叶萎蔫且叶片全部变黄, 40% 整株萎蔫枯死。

2.2 高温胁迫对粉带光合色素含量的影响

从表 2 可以看出, 随着温度升高和胁迫时间延长, 叶绿素含量逐渐下降。在 35 ℃ 处理区, 叶绿素和类胡萝卜素含量与对照基本相同; 在 40 ℃ 处理区, 处理 3d 后叶绿素含量显著减少, 为对照的 66.3%, 类胡萝卜素含量、Chl. a/Chl. b 值和 Car/Chl 值逐渐上升, 处理 3d 后三者均与对照差异显著; 在 45 ℃ 处理区, 叶绿素含量和对照差异显著, 随处理时间延长含量逐渐减少, 处理 1—3d 叶绿素含量分别降为对照的 72.5%、54.9%、37.3%, 处理 1d 后类胡萝卜素含量显著增加并达到最大值, 处理 2d 后显著减少; 45 ℃ 处理 1d 后与 40 ℃ 处理 3d 后 Chl. a/Chl. b 值变化趋势一致, 均达到最大值, 45 ℃ 处理 2d 后其比值开始下降, 但仍高于对照。

2.3 高温胁迫对粉带可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸 (Pro) 含量的影响

随着处理温度的升高, 粉带扦插苗的可溶性蛋白含量呈现微增—急剧增加—急剧减少的趋势 (图 1 A)。在 35 ℃ 处理区, 可溶性蛋白含量缓慢增加, 与对照差异不显著; 在 40 ℃ 处理区, 蛋白含量均显著高于对照, 处理 1d 后含量达到最大值, 为对照的 3.3 倍, 处理 2d 后含量急剧减少, 但胁迫时间延长至 3d 后, 蛋白含量又出现微增; 在 45 ℃ 处理区, 随着胁迫时间的延长, 蛋白含量急剧减少, 均低于对照, 处理 3d 后达到最小值, 降为对照的 64.7%。

在 35 ℃ 或 40 ℃ 处理区, 粉带的可溶性糖含量略有升高, 但与对照差异均不显著; 在 45 ℃ 处理区, 处理 1d 后可溶性糖含量显著增加达到最大值, 为对照的 1.1 倍, 处理 2—3d 其含量又显著下降, 分别降为对照的 73.6% 和 51.1% (图 1 B)。

表 1 高温胁迫对受害指数的影响 (平均值 ± 标准误) / %

Table 1 Effects of high temperature on injury indices (mean ± SE)

处理温度 Treated temperature/℃	时间 Time/d		
	1	2	3
25/22 (CK)	0.0 ± 0.0b	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
35/27	0.0 ± 0.0 b	0.0 ± 0.0c	10.0 ± 0.0c
40/30	10.0 ± 0.0b	20.0 ± 0.5b	46.7 ± 0.6b
45/32	60.0 ± 0.8a	73.3 ± 1.0a	85.0 ± 0.5a

同列不同字母表示不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)

表 2 高温胁迫对光合色素含量的影响(平均值 ± 标准误)

Table 2 Effects of high temperature on photosynthetic pigment contents (mean ± SE)

时间 Time/d	温度 Temperature /°C	叶绿素 a Chl. a /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chl. b /(mg·g ⁻¹)	叶绿素(总) Chl (Total) /(mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 Car /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a / 叶绿素 b Chl. a/Chl. b	类胡萝卜素/ 叶绿素 Car/Chl
1	25/22 (CK)	1.32 ± 0.05 a	0.52 ± 0.05 a	1.84 ± 0.04 a	0.24 ± 0.01 c	2.60 ± 0.34 a	0.13 ± 0.01 c
	35/27	1.31 ± 0.04 a	0.50 ± 0.01 a	1.81 ± 0.05 a	0.25 ± 0.01 c	2.63 ± 0.03 a	0.14 ± 0.00 c
	40/30	1.11 ± 0.02 b	0.45 ± 0.01 ab	1.56 ± 0.03 b	0.28 ± 0.00 b	2.46 ± 0.02 a	0.18 ± 0.00 b
	45/32	0.94 ± 0.01 c	0.39 ± 0.01 b	1.33 ± 0.02 c	0.35 ± 0.01 a	2.40 ± 0.04 a	0.26 ± 0.01 a
2	25/22 (CK)	1.27 ± 0.02 a	0.59 ± 0.01 a	1.86 ± 0.02 a	0.24 ± 0.01 b	2.17 ± 0.07 b	0.13 ± 0.00 b
	35/27	1.10 ± 0.03 a	0.49 ± 0.01 ab	1.58 ± 0.04 a	0.25 ± 0.01 b	2.26 ± 0.02 ab	0.16 ± 0.01 ab
	40/30	1.05 ± 0.12 a	0.42 ± 0.05 bc	1.47 ± 0.17 a	0.28 ± 0.02 a	2.49 ± 0.08 ab	0.20 ± 0.03 a
	45/32	0.73 ± 0.10 b	0.29 ± 0.06 c	1.02 ± 0.16 b	0.13 ± 0.01 c	2.61 ± 0.19 a	0.12 ± 0.01 b
3	25/22 (CK)	1.29 ± 0.07 a	0.54 ± 0.03 a	1.83 ± 0.10 a	0.24 ± 0.01 b	2.38 ± 0.03 a	0.13 ± 0.01 b
	35/27	1.12 ± 0.07 ab	0.42 ± 0.03 b	1.54 ± 0.10 b	0.26 ± 0.01 b	2.66 ± 0.02 a	0.17 ± 0.02 b
	40/30	0.94 ± 0.04 b	0.28 ± 0.03 c	1.21 ± 0.05 c	0.32 ± 0.02 a	3.44 ± 0.36 a	0.27 ± 0.01 a
	45/32	0.48 ± 0.04 c	0.21 ± 0.04 c	0.68 ± 0.06 d	0.10 ± 0.01 c	2.52 ± 0.64 a	0.14 ± 0.02 b

同列不同字母表示不同处理组之间差异显著($P < 0.05$)

从图 2 A 可以看出,在 35 °C 处理区,扦插苗的 Pro 含量与对照差异不显著;在 40 °C 处理区,处理 2d 内 Pro 含量略有升高,处理 3d 后含量显著上升为对照的 3.1 倍;在 45 °C 处理区,处理 2d 内 Pro 含量急剧上升到最大值,为对照的 5.1 倍,处理 3d 后与处理 2d 后的含量基本相同。

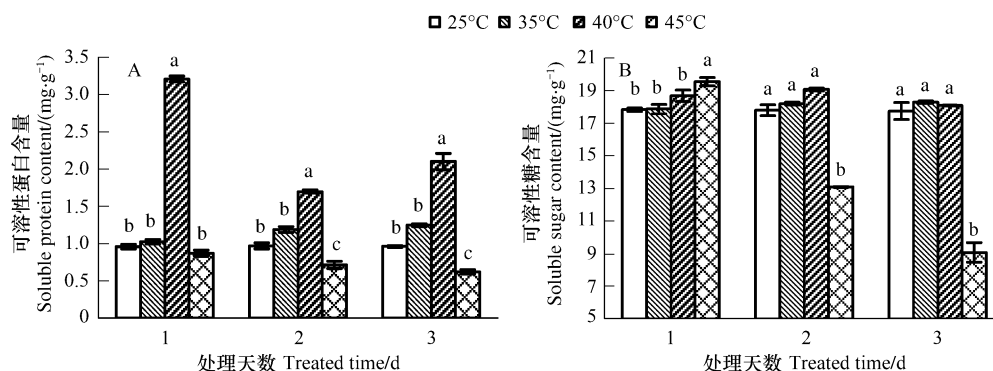


图 1 高温胁迫对可溶性蛋白和可溶性糖的影响(平均值 ± 标准误)

Fig. 1 Effects of high temperature on contents of soluble protein and soluble sugar content (mean ± SE, $n = 8$)

不同字母表示同一处理时间内不同处理组之间差异显著($P = 0.05$)

2.4 高温胁迫对粉带丙二醛(MDA)含量的影响

高温处理下,粉带扦插苗的 MDA 含量与 Pro 含量变化相似,但 MDA 含量增幅不如 Pro 含量增幅大(图 2 B)。在 35 °C 处理区,扦插苗的 MDA 含量与对照差异不显著;在 40 °C 处理区,处理 2—3d 粉带的 MDA 含量显著上升,分别为对照的 1.2 倍和 1.8 倍;在 45 °C 处理区,处理 2d 内 MDA 含量显著上升到最大值,为对照的 2.4 倍,处理 3d 后与处理 2d 后含量基本相同。

2.5 高温胁迫对粉带的抗氧化酶体系活性的影响

高温胁迫下,粉带的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性变化如图 3 A 和图 3 B。在 35 °C 处理区,SOD 和 CAT 活性均呈上升趋势,其中 SOD 活性与对照差异显著;在 40 °C 处理区,处理 2d 内 SOD 和 CAT 活性继续升高,处理 3d 后 SOD 活性显著上升为对照的 2.5 倍,CAT 活性达到最大值,为对照的 1.9 倍;在 45 °C 处理区,处理 2d 后 SOD 活性达到最大值,为对照的 3.1 倍,而 CAT 活性逐渐下降,处理 3d 后 SOD 活

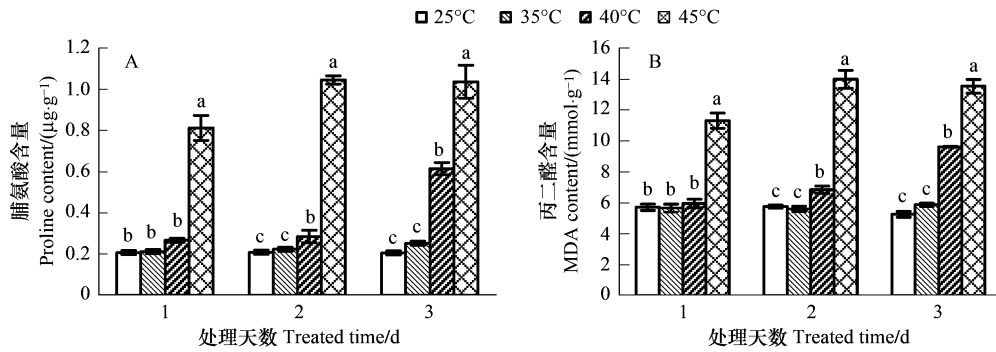


图2 高温胁迫对 Pro (A) 和 MDA (B) 的影响(平均值 ± 标准误)
Fig.2 Effects of high temperature on contents of proline (A) and MDA (B) (mean ± SE)

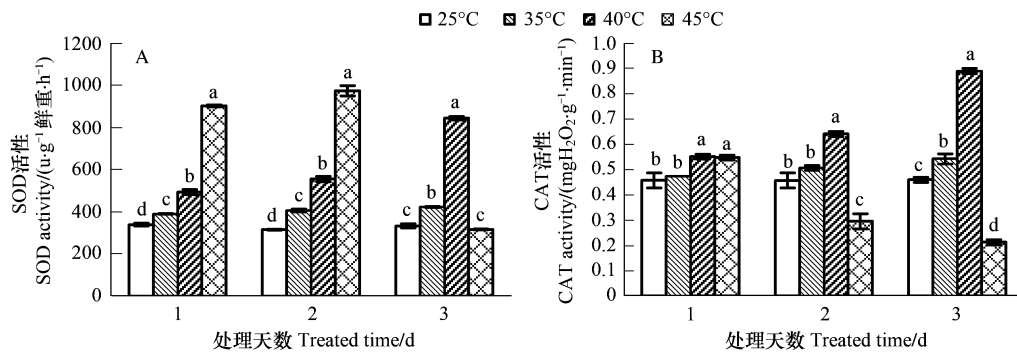


图3 高温胁迫对 SOD (A) 和 CAT (B) 活性的影响(平均值 ± 标准误)
Fig.3 Effects of high temperature on SOD (A) and CAT (B) activities (mean ± SE)

性也开始下降,降为对照的 94.9%,CAT 活性则降至最小值,为对照的 46.2%。

在 35 °C 处理区或 40 °C 处理 2d 内,粉带的过氧化物酶(POD)活性均高于对照(图 4)。其中 35 °C 处理 2d 后 POD 活性达到最大值,为对照的 1.2 倍;在 45 °C 处理区,POD 活性与对照差异显著,处理 1—3d 分别降为对照的 79.7%、67.0%和 39.8%。

2.6 高温胁迫下粉带各项生理生化指标的相关性分析

对高温胁迫下粉带的各项生理生化指标进行相关分析(表 3),结果显示:可溶性糖与 Pro 呈显著负相关,Pro、SOD 与 MDA 呈显著正相关,叶绿素、可溶性糖、POD 与 MDA 呈显著负相关。另外,叶绿素、可溶性糖、CAT、POD 与受害指数呈显著负相关,Pro、MDA、SOD 与受害指数呈显著正相关,这表明高温胁迫对粉带扦插苗的叶绿素、可溶性糖含量、CAT 和 POD 活性具有一定的抑制作用,对 Pro、MDA 含量和 SOD 活性的增加具有一定的诱导作用。

3 讨论

高温胁迫时植物正常的生理代谢会受到抑制,产生包括细胞结构、生理生化过程等各方面的一系列变化,这是植物对胁迫信号感受、传导和适应的结果,是产生高温危害的原因,同时也是植物抗高温的基础^[10]。孙玉芳等^[11]曾对黄连进行 35 °C 高温处理,胁迫 6d 后与胁迫 3d 后相比,可溶性糖、Pro 和 MDA 含量等生理指标

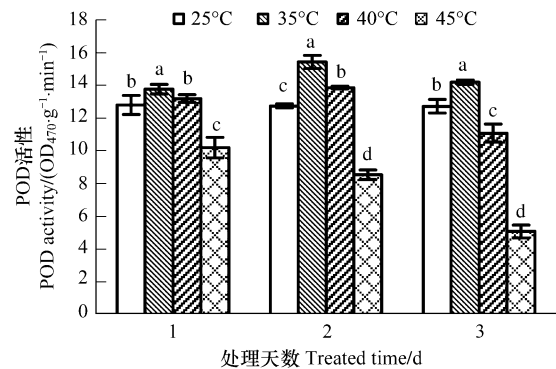


图4 高温胁迫对 POD 活性的影响(平均值 ± 标准误)
Fig.4 Effects of high temperature on POD activities (mean ± SE)

无显著变化,本试验中,35 ℃ 高温处理 3d 内,对粉带的形态和生理方面均未产生热伤害,在粉带引种栽培过程中,夏季 35 ℃ 左右的高温条件下多数植株能长时间正常生长,未产生严重的热伤害,表明粉带对 35 ℃ 高温有较强的忍耐作用。40 ℃ 高温处理 1—2d,受害指数与大部分生理生化指标均与对照差异不显著;40 ℃ 高温处理 3d 或 45 ℃ 高温处理 1—2d,对粉带会产生较严重的热伤害,但植株仍能自我调节和恢复;45 ℃ 高温处理 3d 对粉带会产生非常严重的热伤害,大部分植株已无法通过自身调节恢复。

表 3 高温胁迫下粉带叶片各生理生化指标相关性分析

Table 3 Correlation between physiological and biochemical indices in *S. albidula* leaves under high temperature stresses

指标 Parameters	受害指数 Injury indices	叶绿素 含量 Chloro-phyll content	类胡萝卜 素含量 Carote-noid content	可溶性蛋 白含量 Soluble protein content	可溶性 糖含量 Soluble sugar content	Pro 含量 Proline content	MDA 含量 MDA content	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity
受害指数 Injury indices	1.000	-0.890 *	-0.398	-0.239	-0.676 *	0.978 *	0.978 *	0.610 *	-0.556 *	-0.888 *
叶绿素含量 Chlorophyll content		1.000	0.458	0.115	0.698 *	-0.853 *	-0.853 *	-0.444	0.208	0.763 *
类胡萝卜素含量 Carotenoid content			1.000	0.475	0.898 *	-0.450	-0.443	0.213	0.802 *	0.569 *
可溶性蛋白含量 Soluble protein content				1.000	0.420	-0.306	-0.305	0.090	0.590 *	0.337
可溶性糖含量 Soluble sugar content					1.000	-0.688 *	-0.687 *	0.048	0.691 *	0.823 *
Pro 含量 Proline content						1.000	0.979 *	0.615 *	-0.333	-0.876 *
MDA 含量 MDA content							1.000	0.625 *	-0.325	-0.875 *
SOD 活性 SOD activity								1.000	0.306	-0.302
CAT 活性 CAT activity									1.000	0.461
POD 活性 POD activity										1.000

* 表示在 $\alpha = 0.05$ 水平下相关性达到显著

植物体内光合色素是光合作用的物质基础,叶绿素含量的高低在很大程度上反映了植株的生长状况和光合能力。类胡萝卜素既是光合色素,又是内源抗氧化剂,除在光合作用中具有一定的功能外,在细胞内还可吸收剩余能量,淬灭活性氧,从而防止膜脂过氧化^[12]。本试验中,在一定的高温范围内(45 ℃ 以下),粉带类胡萝卜素含量和 Car/Chl 值的升高说明植株对高温胁迫产生了响应,刺激类胡萝卜素的合成以对机体形成保护;随着高温胁迫的加重,粉带的光合色素含量显著降低,可能是由于类胡萝卜素含量和 Car/Chl 值显著下降,减少了机体对活性氧的淬灭,导致细胞内积累较多的氧自由基,从而进一步破坏叶绿体膜结构,使其光合作用受到严重抑制。

植物通过代谢活动增加细胞内的溶质浓度以降低渗透势、维持膨压,从而使体内各种与膨压有关的生理过程正常进行^[13]。粉带的可溶性蛋白含量与可溶性糖含量变化趋势相似,均随着高温胁迫加重先上升后下降,且两者间存在正向相关性。可溶性蛋白具有较强的亲水性,一定程度的高温胁迫下,其含量显著增加,可提高细胞保水力。在 45 ℃ 胁迫 1d 后粉带的可溶性糖含量仍高于对照,说明在一定的高温范围内,粉带扦插苗通过增加可溶性糖含量,减少高温胁迫对其产生的不良影响,具有一定的耐热性。但也有研究表明光合色素含量的降低会使光合产物减少,从而导致植物体内来源于光合作用的可溶性糖含量下降^[14],关于高温胁迫对可溶性糖的机理还有待进一步研究。

Pro 具有多种生理功能,如作为细胞质渗透调节物质、稳定的大分子结构、降低细胞酸度以及作为能量库

调节细胞氧化还原势等,其含量的增加与膜脂过氧化作用有很大关系,对细胞内保水和清除活性氧具有一定影响^[15]。在高温胁迫下,粉带 Pro 含量剧烈变化,说明 Pro 对高温胁迫敏感性较高,在粉带的抗热性中起着重要作用。有研究表明,在植物受到高温胁迫时,蛋白质合成受阻,高温抑制了蛋白质的合成,从而抑制了 Pro 参与蛋白质的合成作用,因此 Pro 在植物体内大量积累^[16],40 ℃ 高温处理 3 d 或 45 ℃ 高温胁迫下,粉带的 Pro 大量积累,可能与可溶性蛋白含量急剧下降有关。Pro 对高温胁迫表现出相对持续稳定的上升趋势,表明 Pro 是粉带应对高温胁迫的主导性渗透调节物质,这与缪旻珉等^[17]的研究结果相同。

Martireau 等^[18]认为高温打破了细胞内如丙二醛(MDA)等一系列活性氧的产生与清除之间的平衡,造成 MDA 等氧化物的积累,引起膜蛋白与膜内脂的变化,从而引发膜透性增大,细胞内电解质外渗,对植物造成高温伤害。各高温处理下粉带叶片中都有 MDA 积累,且随温度升高和胁迫时间延长而积累增多,表明高温胁迫的加剧使粉带的膜脂过氧化程度加重。根据粉带 MDA 与各项指标间的相关分析,表明 MDA 的积累对 Pro 含量和 SOD 活性的增加有一定的诱导作用,对叶绿素、可溶性糖含量和 POD 活性则具有一定的抑制作用。

SOD 是生物体内唯一以自由基为底物的抗氧化酶,可通过歧化反应使超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)生成 H_2O_2 和 O_2 ,从而阻止危害性很大的 $O_2^{\cdot-}$ 大量生成^[19]。植物组织中高浓度的 H_2O_2 主要通过 CAT 清除,从而使 H_2O_2 控制在较低水平;而低浓度的 H_2O_2 主要靠 POD 在氧化相应基质时被消化^[20]。本试验中,粉带的 SOD 与 CAT 呈正相关,表明随着高温胁迫加剧,粉带组织中产生的 H_2O_2 浓度越来越高,CAT 活性被显著诱导。在高温胁迫过程中,粉带的 SOD、CAT 和 POD 均作出敏感响应,表明高温胁迫引起植物体内活性氧产生和积累,从而诱导抗氧化酶活性升高,但当胁迫超过一定强度时,植物体不能及时清除氧自由基,最终导致酶活性降低,植物体受到氧化损伤。

由于植物的多样性和植物生理过程的复杂性,以及环境条件的易变性和综合性,形成了植物适应高温的多样性^[21]。植物的抗热性是受其生理生化特征综合作用的遗传表现,因此,单一抗热指标难以判断植物对高温的综合适应能力^[22]。由于叶绿素、Pro、MDA 含量和 POD 活性在高温胁迫时变化明显,而且其与受害指数的相关系数绝对值均在 0.88 ($P < 0.001$) 以上,故可将其作为粉带扦插苗的耐热性生理鉴定指标。

植物抗热性是受营养物质、渗透调节物质和保护酶活性等共同调节的,粉带扦插苗叶片中可溶性蛋白、可溶性糖、Pro、SOD、CAT 和 POD 活性随高温胁迫的动态变化,有效减轻了叶片细胞的膜脂过氧化程度,维持了细胞膜的完整性,减轻了高温对植物的伤害,是粉带扦插苗对高温胁迫的适应性反应和耐热生存的重要调节机制。

References:

- [1] Feng D L, Liu Y, Zhong Z C, Yang J, Xie J. Photosynthesis and chlorophyll II fluorescence parameters of the reed (*Phragmites communis*) grown in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2013-2021.
- [2] Zhang G L, Chen L Y, Zhang S T, Xiao Y H, He Z Z, Lei D Y. Effect of high temperature stress on protective enzyme activities and membrane permeability of flag leaf in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(9): 1306-1310.
- [3] Arndt S K, Clifford S C, Wanek W, Jones H G, Popp M. Physiological and morphological adaptations of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive high temperature stress. *Tree Physiology*, 2001, 21(11): 1-11.
- [4] Rivero R M, Ruiz J M, Garcia P C, Lopez-Delgado H, Sanchez E, Romero L. Resistance to cold and heat stress: accumulation of phenolic compounds in tomato and watermelon plants. *Plant Science*, 2001, 160: 345-321.
- [5] Yin X G, Luo Q X. Studies on methodology for identification of heat tolerance of tomato. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2001, 14(2): 62-65.
- [6] Dirk I, Marc V M. Oxidative stress in plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 1996, (6): 153-158.
- [7] Elliot W R, Jones D L. *Encyclopaedia of Australian Plants Suitable for Cultivation*. Melbourne: Lothian Publications, 1984: 302-307.
- [8] Zhang T Y, Cheng B Y, Liu X R, Xiang B, Wang Y. Variability of extreme high temperature and response to regional warming over Chongqing. *Meteorological Monthly*, 2008, 2: 71-78.
- [9] Gao J F. *The Experimental Technique in Plant Physiology*. Guangzhou: World Book Press, 2000: 141-228.

- [10] Chen P Q, Yu S L, Zhan Y N, Kang X L. A review on plant heat stress physiology. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 26(5): 224-225.
- [11] Sun Y F, Wang S G, Yin L, Chen S J, Zhong G Y. Study on effect of high temperature stress on physiological characteristics of *Coptis chinensis* Franch. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(4): 236-238.
- [12] Willekens H, Van Camp W, Van Montagu M, Inze D, Langebartels C, Sandermann H. Ozone, sulfur dioxide, and ultraviolet-B have similar effects on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana plumbaginifolia* L. Plant Physiology, 1994, 106(3): 1007-1014.
- [13] Chaitanya K V, Sundar D, Reddy A R. Mulberry leaf metabolism under high temperature stress. Biologia Plantarum, 2001, 44: 379-384.
- [14] Dong Y C, Liu Y Q. Soil water influences on protective enzymes and osmolytes of *Urtica dioica* and their correlations with leaf photosynthesis and biomass. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2845-2851.
- [15] Qin G Q, Yan C L, Wei L L. Effect of cadmium stress on the contents of tannin, soluble sugar and proline in *Kandelia candel* (L.) Druce seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3366-3371.
- [16] Xu X M, Ye H C, Li G F. Research on proline metabolism and osmotic stress resistance of plant. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 17(6): 536-542.
- [17] Miao M M, Cao B S. The relationship between heat injury and polyamines or proline contents during anther development and pollen germination in cucumber. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(3): 233-237.
- [18] Martireau J R, Specht J E. Temperature tolerance in soybeans. Crop Science, 1979, 19: 75-81.
- [19] Gulen H, Eris A. Effects of heat stress on peroxidase activity and total protein content in strawberry plants. Plant Science, 2004, 166: 739-744.
- [20] Yang S S, Gao J F. Active Oxygen, free radicals and plant senescence. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(2): 215-220.
- [21] Mittler R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. Trends in Plant Science, 2006, 11: 15-19.
- [22] Chen L S, Liu X H. Kinds of identification index for plant heat resistance. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(4): 72-76.

参考文献:

- [1] 冯大兰, 刘芸, 钟章成, 杨娟, 谢君. 三峡库区消落带芦苇 (*Phragmites communis* (reed)) 的光合生理响应和叶绿素荧光特性. 生态学报, 2008, 28(5): 2013-2021.
- [2] 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 肖应辉, 贺治洲, 雷东阳. 高温胁迫对水稻剑叶保护酶活性和膜透性的影响. 作物学报, 2006, 32(9): 1306-1310.
- [5] 尹贤贵, 罗庆熙. 番茄耐热性鉴定方法研究. 西南农业学报, 2001, 14(2): 62-66.
- [8] 张天宇, 程炳岩, 刘晓冉, 向波, 王勇. 重庆极端高温的变化特征及其对区域性增暖的响应. 气象, 2008, 2: 71-78.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验技术. 广州: 世界图书出版社, 2000: 141-228.
- [10] 陈培琴, 郁松林, 詹妍妮, 康喜亮. 植物在高温胁迫下的生理研究进展. 中国农学通报, 2006, 26(5): 224-225.
- [11] 孙玉芳, 王三根, 尹丽, 陈仕江, 钟国跃. 高温胁迫对黄连生理特性的影响研究. 中国农学通报, 2006, 22(4): 236-238.
- [14] 董伊晨, 刘悦秋. 土壤水分对异株荨麻 (*Urtica dioica*) 保护酶和渗透调节物质的影响及其与叶片光合和生物量的相关性. 生态学报, 2009, 29(6): 2845-2851.
- [15] 覃光球, 严重玲, 韦莉莉. 秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量对 Cd 胁迫的响应. 生态学报, 2006, 26(10): 3366-3371.
- [16] 许祥明, 叶和春, 李国凤. 脯氨酸代谢与植物抗渗透胁迫的研究进展. 植物学通报, 2000, 17(6): 536-542.
- [17] 缪旻珉, 曹碯生. 黄瓜花药和花粉高温伤害与多胺和脯氨酸含量的关系. 园艺学报, 2002, 29(3): 233-237.
- [20] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老. 西北植物学报, 2001, 21(2): 215-220.
- [22] 陈立松, 刘星辉. 植物抗热性鉴定指标的种属. 干旱地区农业研究, 1997, 15(4): 72-76.