

CO₂ 加富下空气湿度调控对高温大棚嫁接 黄瓜逆境生理的影响

刘杰才¹ 崔世茂¹ 吴玉峰² 其日格² 霍秀文¹ 杨文秀¹ 付崇毅¹ 王玉静¹

(1. 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古包头市农业技术推广站, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 试验在 CO₂ 加富, 气温为 40 ~ 45℃ 条件下, 将空气湿度设置为 (95 ± 5) % (L₁)、(75 ± 5) % (L₂) 和 (55 ± 5) % (L₃) 3 个处理, 研究了空气湿度调控对大棚嫁接黄瓜逆境生理的影响, 以期为大棚黄瓜越夏高产栽培奠定理论基础。结果表明: 随着处理时间的延长, 3 个处理黄瓜叶片中的渗透调节物质均呈增加趋势, 即丙二醛含量 L₂、L₃ 呈增加趋势, 而 L₁ 则呈先增后降趋势变化; 细胞膜透性 L₂、L₃ 呈增加趋势, L₁ 则呈降低趋势变化; 保护酶活性 L₁、L₂ 呈增强趋势, 而 L₃ 则呈先增后降趋势变化。不同的空气湿度处理中, 随着处理湿度的升高, 黄瓜叶片中的渗透调节物质、丙二醛含量、保护酶活性和细胞膜透性均呈降低趋势, 表现为 L₁ < L₂ < L₃。在处理第 24 天时, L₁ 比 L₂、L₃ 的可溶性蛋白含量分别降低了 17.23% 和 18.61%, 脯氨酸含量分别降低了 51.28% 和 70.72%, 可溶性糖含量分别降低了 24.02% 和 37.21%, 丙二醛含量分别降低了 43.44% 和 55.28%, 细胞膜透性分别降低了 74.46% 和 74.46%, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性分别降低了 41.88% 和 38.19%, 过氧化氢酶 (CAT) 活性分别降低了 61.21% 和 67.35%, 过氧化物酶 (POD) 活性分别降低了 27.80% 和 39.45%。说明在 CO₂ 加富和空气湿度为 (95 ± 5) % 处理下, 植株遭受的逆境胁迫较小, 强化了高温管理大棚嫁接黄瓜抵御逆境胁迫的能力, 降低了逆境胁迫的程度, 缓解了逆境伤害。

关键词: CO₂; 空气湿度; 高温; 黄瓜; 逆境生理

中图分类号: S642.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2012)03-0130-06

The Effect of Air Humidity on the Stress Physiology of the Grafted Cucumber in High Temperature Plastic Tunnel under CO₂ Enrichment

LIU Jie-cai¹, CUI Shi-mao¹, WU Yu-feng², Qi Rige², HUO Xiu-wen¹,
YANG Wen-xiu¹, FU Chong-yi¹, WANG Yu-jing¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

2. The Station for Popularizing Agricultural Technique of Baotou, Baotou 014010, China)

Abstract: The purpose was to study the effects of air humidity on stress physiology of the grafted cucumber in high temperature in plastic tunnel under CO₂ enrichment. With the cucumber variety Jinchun 4 as the tested material, the cucumber plants were made for 3 treatments of air humidity as (95 ± 5) % (L₁), (75 ± 5) % (L₂), (55 ± 5) % (L₃) in high temperature of 40 - 45℃ under CO₂ enrichment respectively. The result showed osmoregulation substances had an increased tendency with the treating days; MDA of the treatment L₂ and L₃ was increased and L₁ was increased first and then decreased; cell membrane permeability of cucumber leaves of treatment L₂ and L₃ was increased and L₁ was decreased; the cell protective enzymes activities of L₁ and L₂ was all increased and L₃ was increased first and then decreased with the treating day. It was revealed that the plants had self-adjust abilities of stress tolerance. Proline content, MDA, the cell protective enzymes activities and cell membrane permeability of cucumber leaves had a decreased tendency respectively with the treating days and showed L₁ < L₂ < L₃. The soluble protein of treatment L₁ was decreased 17.23% and 18.61% respectively compared to L₂ and L₃ after treatment 24 d. The same situation was for proline content was decreased 51.28% and 70.72%; soluble sugar was decreased

收稿日期: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060269); 内蒙古自然科学基金重点项目(200508010302)

作者简介: 刘杰才(1965-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 副教授, 在读博士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培与栽培生理的教学及研究。

通讯作者: 崔世茂(1961-), 男, 内蒙古包头人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事设施园艺及其抗性生理研究。

24.02% and 37.21%; MDA was decreased 43.44% and 55.28%; cell membrane permeability of cucumber leaves was decreased 74.46% and 74.46%; SOD activity was decreased 41.88% and 38.19%; CAT activity was decreased 61.21% and 67.35%; POD activity was decreased 27.80% and 39.45%. These results illustrated that the grafted cucumber plants was protected from stress tolerance in higher air humidity (95 ± 5)% with high temperature plastic tunnel under CO₂ enrichment. The ability of resistance stress tolerance of grafted cucumber plants was increased and hurt of plants was alleviated by stress tolerance under higher air humidity with high temperature under CO₂ enrichment.

Key words: CO₂; Air humidity; High temperature; Cucumber; Stress physiology

黄瓜是设施栽培中经济效益较高的一种蔬菜,因此,连作难以避免。嫁接技术是目前普遍采取的解决土传病害的有效方法^[1-2],通过嫁接可以抑制病害的发生,促进植株生长,改善和提高果实品质及产量^[3]。黄瓜不耐高温,夏秋黄瓜生长在炎夏高温环境下,易使植株的抵抗力下降而感染各种病害,从而影响黄瓜的产量和品质^[4]。CO₂不仅是植物光合作用的原料,也是人类活动引起的最重要的温室气体^[5-6]。21世纪末,大气CO₂浓度将倍增^[7-8]。但在封闭的园艺设施内,光照充足、光合作用旺盛时,CO₂亏缺更为突出,作物处于严重的CO₂饥饿状态,成为光合作用和产量提高的重要限制因素之一。CO₂施肥能促进黄瓜生长发育,提高产量,改善品质,提高抗逆性^[9]。我国北方大棚黄瓜采用越夏长季节栽培模式,可以充分利用丰富的光照资源,延长收获季节,提高黄瓜产量和设施的利用率。然而,大棚内经常会出现35~45℃的高温,与高温相伴的还有干旱,在快速升温的过程中空气湿度迅速下降,造成黄瓜叶片萎蔫,影响光照的截获,成为越夏栽培中的重大障碍。

本研究在CO₂加富,气温为40~45℃(每天9:30-16:30)条件下,研究了空气湿度调控对大棚嫁接黄瓜渗透调节物质含量、丙二醛含量、细胞膜透性和保护酶活性的影响,以期为大棚黄瓜越夏高产优质栽培提供理论指导和实践支持。

1 材料和方法

1.1 供试材料

本试验采用靠接法嫁接黄瓜,接穗为津春四号黄瓜,砧木为黑籽南瓜。

1.2 试验设计

试验分别于2010年4-9月和2011年4-9月在内蒙古农业大学教学农场进行。黄瓜嫁接苗于四叶一心时定植在塑料大棚内的自制生长箱中。自制生长箱用φ14的螺纹钢筋做骨架,长、宽、高分别为220、150、200 cm,顶部和四周用塑料薄膜围护,北侧

的塑料薄膜可以自由起放,以便人员进出和环境因子调控。定植前15 d,在自制生长箱内建造行间秸秆生物反应堆,并在地面铺设滴灌和地膜,以最大限度地减少地面水分蒸发对空气湿度的影响。每个自制生长箱内定植2行,株行距为30 cm×60 cm。

本试验将空气湿度设置为(95 ± 5)%(L₁), (75 ± 5)%(L₂), (55 ± 5)%(L₃)3个处理,每个处理的小区面积3.3 m²,栽植14株。每天9:30-16:30采用行间秸秆生物反应堆技术和化学反应法($2\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$)进行CO₂加富,使用长虹空调(KFR-23GW/DHR)来调节温度,利用亚都加湿器(YI-DS160)和微喷来调控空气湿度,使生长箱内的气温控制在40~45℃之间,CO₂的浓度保持在1 000~1 500 μL/L。每天16:30停止温湿度调控和CO₂加富,卷起自制生长箱北侧塑料膜,使黄瓜处在相同的大棚环境中。

1.3 测定方法

黄瓜缓苗后第5天开始处理,在处理第8天、第16天、第24天时的11:30-16:30期间,分3次取样,测定黄瓜植株从上往下数第4片叶的各项指标,最终数据均为3次测定结果的平均值。

丙二醛(MDA)含量的测定按邹琦^[10]方法进行;可溶性蛋白质含量按考马斯亮蓝G-250法测定^[11];可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[11];脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮比色法测定^[11];细胞膜透性采用电导法测定,以相对电解质渗出率(%)表示^[11];超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)及过氧化物酶(POD)的活性测定均采用李合生^[12]的方法进行。

2 结果与分析

2.1 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片中渗透调节物质的影响

可溶性蛋白质、脯氨酸、可溶性糖均为渗透调节物质,在植株遭遇逆境胁迫时,渗透调节物质含量的增加,有利于植物体抵御逆境胁迫,在一定程度上增

强了对胁迫环境的适应性。

2.1.1 对可溶性蛋白质含量的影响 图1是空气湿度调控第8天、第16天、第24天时黄瓜叶片的可溶性蛋白质含量变化情况。从图1可以看出,不同处理随着处理时间的延长,黄瓜叶片的可溶性蛋白含量亦随之增加,到第24天时, L_1 、 L_2 、 L_3 各处理分别比其在第8天时增加了47.46%、56.25%、53.30%;不同处理的可溶性蛋白含量亦存在差异,在处理第16天、24天时 L_1 与 L_2 、 L_3 相比其差异均达到极显著水平, L_2 与 L_3 差异不明显, L_1 在处理第8天、第16天、第24天时分别比 L_3 降低了8.43%、21.20%、18.61%。

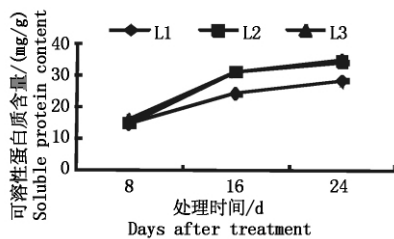


图1 空气湿度调控对黄瓜叶片可溶性蛋白质含量的影响

Fig.1 Effect of air humidity regulation on soluble protein content of cucumber seedling leaves

2.1.2 对脯氨酸含量的影响 从图2可以看出,随着处理时间的延长,黄瓜叶片的脯氨酸(Pro)含量均呈显著增加的趋势变化。在处理第24天时, L_1 、 L_2 、 L_3 分别比处理第8天时增加了23.50%、64.96%和55.13%;但不同处理的Pro含量却表现不同,3个处理间其差异均达到极显著水平,表现为 $L_1 < L_2 < L_3$,其中, L_1 处理的Pro含量较低,在处理第8天、第16天、第24天时分别比 L_2 减少18.07%、36.38%和51.28%,比 L_3 减少61.55%、58.81%和70.72%。这说明黄瓜植株为了适应逆境积累了较多的Pro^[13],且 L_1 处理下黄瓜植株受到的逆境胁迫小。

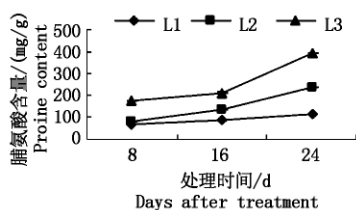


图2 空气湿度调控对黄瓜叶片脯氨酸含量的影响

Fig.2 Effect of air humidity regulation on proline content of cucumber seedling leaves

2.1.3 对可溶性糖含量的影响 图3是不同处理在第8天、第16天、第24天时黄瓜叶片的可溶性糖含量的变化情况。从图3可以看出,随着处理时间的延长,叶片的可溶性糖含量呈逐渐增加的趋势变化,在处理第24天时, L_1 、 L_2 、 L_3 分别比处理第8天

时增加了61.60%、62.47%、62.03%;3个处理的可溶性糖含量也存在差异,在处理第24天时, L_1 与 L_2 、 L_3 间及 L_2 与 L_3 间均达到显著差异。可溶性糖含量表现为 $L_1 < L_2 < L_3$,处理 L_1 在第16天、第24天时的可溶性糖含量分别比处理 L_2 降低了41.35%、24.02%,比 L_3 降低了34.66%、37.21%。黄瓜叶片中可溶性糖含量增加,这是在高温条件下植株自我保护的一种适应,可调节组织的渗透势,对维持膜的完整性及提高植物的抗逆性有重要的生理意义^[14]。

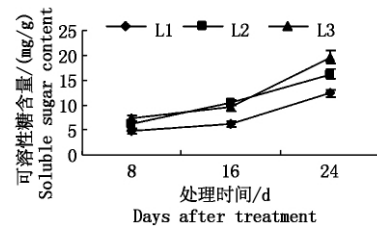


图3 空气湿度调控对黄瓜叶片可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effect of air humidity regulation on soluble sugar content of cucumber seedling leaves

2.2 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片中丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终产物,其含量的高低是膜脂氧化程度的重要标志^[15]。图4是空气湿度调控随处理时间的延长对黄瓜叶片MDA含量的影响。从图4可以看出,随着处理时间的延长,黄瓜叶片中MDA的含量,处理 L_2 、 L_3 表现增加,而处理 L_1 则表现先增后降的变化趋势;MDA含量随着处理空气湿度的升高而降低,在第24天时, L_1 、 L_2 、 L_3 之间差异均达到极显著水平,在处理第8天、第16天、第24天时, L_1 处理的MDA含量分别比 L_3 降低57.14%、35.95%和55.28%。 L_1 处理MDA含量最低,说明发生膜脂氧化的程度也最低。

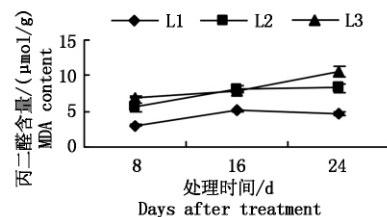


图4 空气湿度调控对黄瓜叶片丙二醛含量的影响

Fig.4 Effect of air humidity regulation on MDA of cucumber seedling leaves

2.3 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片细胞膜透性的影响

膜脂过氧化作用是导致膜结构破坏,引起植株损伤甚至死亡的重要原因^[16]。从图5可以看出,随着处理时间的延长,黄瓜叶片细胞膜透性 L_2 、 L_3 处理增加, L_1 处理降低;在处理第16天、第24天时,处理 L_1 与 L_2 、 L_3 间差异达到极显著水平,而处理 L_2 与

L₃ 间则差异不明显, 在处理第 24 天时, L₁ 比 L₂、L₃ 处理均降低 74.45%。

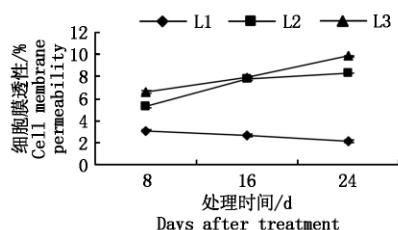


图 5 空气湿度调控对黄瓜叶片细胞膜透性的影响

Fig. 5 Effect of air humidity regulation on cell membrane permeability of cucumber seedling leaves

2.4 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片中保护酶活性的影响

植物对膜脂过氧化酶促防御系统包括 SOD, CAT, POD 等, 它们在高温胁迫中能够清除植物体内的 HO₂, OH, O₂ 等自由基, 维持体内的活性氧代谢平衡, 保护膜结构, 减轻有毒物质对细胞的毒害, 延迟或阻止细胞结构的破坏^[17]。

2.4.1 对超氧化物歧化酶活性的影响 图 6 是空气湿度调控第 8 天、第 16 天、第 24 天时黄瓜叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化情况。从图 6 可以看出, 叶片的 SOD 活性随着处理时间的延长, L₁, L₂ 处理亦随之增强, 而 L₃ 处理则呈先增后降的趋势变化; 不同的空气湿度处理中, 空气湿度越高, SOD 的活性越低, 且处理 L₁, L₂, L₃ 之间差异极显著, 在处理第 8 天、第 16 天、第 24 天时, L₁ 分别比 L₂ 降低了 42.79%, 51.57% 和 41.88%, 比 L₃ 分别降低了 57.73%, 66.76% 和 38.19%。

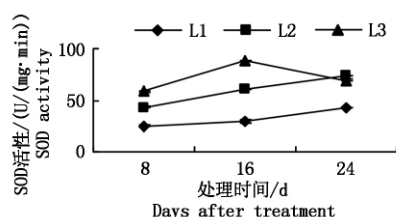


图 6 空气湿度调控对黄瓜叶片 SOD 活性的影响

Fig. 6 Effect of air humidity regulation on SOD activity of cucumber seedling leaves

2.4.2 对过氧化氢酶活性的影响 图 7 是空气湿度调控对黄瓜叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响。从图 7 可以看出, 黄瓜叶片中的 CAT 活性, 随着处理时间的延长, L₁, L₂ 处理呈增强趋势变化, 而 L₃ 处理则呈先增后降的趋势变化; 不同处理的 CAT 活性不同, 表现为 L₁ < L₂ < L₃, 且各处理之间均达到极显著差异, 在处理第 8 天、第 16 天、第 24 天时, L₁ 处理的 CAT 活性分别比 L₂ 降低了 77.27%, 45.98% 和 61.21%, 比 L₃ 分别降低了 86.30%, 79.74% 和 67.35%。

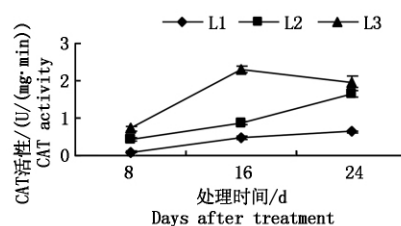


图 7 空气湿度调控对黄瓜叶片 CAT 活性的影响

Fig. 7 Effect of air humidity regulation on CAT activity of cucumber seedling leaves

2.4.3 对过氧化物酶活性的影响 空气湿度调控对黄瓜叶片过氧化物酶(POD)活性的影响如图 8。由图 8 可知, 随着处理时间的延长, 黄瓜叶片中 POD 活性, L₁, L₂ 处理表现增强, 而 L₃ 处则表现先增后降; 但不同处理的 POD 活性不同, 表现为 L₁ < L₂ < L₃, 且各处理之间均达到极显著差异, 在处理第 8 天、第 16 天、第 24 天时, L₁ 处理的 POD 活性分别比 L₂ 降低了 60.77%, 56.90% 和 27.99%, 比 L₃ 分别降低了 62.02%, 76.10% 和 39.45%。

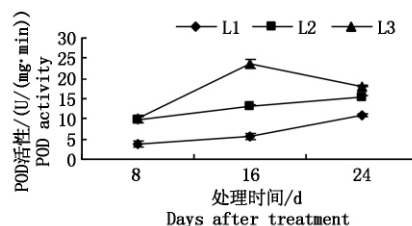


图 8 空气湿度调控对黄瓜叶片 POD 活性的影响

Fig. 8 Effect of air humidity regulation on POD activity of cucumber seedling leaves

3 结论与讨论

3.1 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片中渗透调节物质的影响

渗透调节是作物适应逆境的生理机制之一, 高温胁迫下, 提高了黄瓜幼苗叶片的 Pro、可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 增强了植株的渗透调节能力, 从而维持了植株体内的水分平衡, 从而缓解高温胁迫对黄瓜叶片的膜脂过氧化伤害^[18]。本试验中黄瓜叶片中的渗透调节物质含量, 随着处理时间的延长和空气湿度的降低而增加, 在处理第 24 天时, L₁, L₂, L₃ 分别比处理第 8 天时叶片中可溶性蛋白含量增加了 47.46%, 56.25% 和 53.30%, 脯氨酸含量分别增加了 23.50%, 64.96% 和 55.13%, 可溶性糖分别含量增加了 61.60%, 62.47% 和 62.03%, 可见, 植株为了适应高温逆境积累了更多的渗透调节物质。但是, 不同处理的渗透调节物质积累量不同, 表现为 L₁ < L₂ < L₃, 说明高湿(L₁)处理下黄瓜植株遭受的逆境胁迫小, 所以积累的渗透调节物质较少。

3.2 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片中丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)作为膜脂过氧化产物能与蛋白质结合引起膜蛋白的变性,从而直接影响膜的流动性和透性,对植物产生伤害。高温胁迫导致MDA含量的升高,反映出细胞脂质发生过氧化作用。高温造成黄瓜叶片MDA含量的增加,表明其体内存在相当数量的氧自由基,导致细胞质膜发生过氧化代谢而分解形成MDA^[19]。本试验中黄瓜叶片MDA的含量,随着处理时间的延长 L_2 、 L_3 增加, L_1 则呈先增后降趋势变化;随着处理空气湿度的升高,黄瓜叶片中的MDA含量降低,表现为 $L_1 < L_2 < L_3$,说明高湿(L_1)处理分解形成的MDA数量少,细胞脂质发生的过氧化作用小,对植株产生的伤害程度较轻。

3.3 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片细胞膜透性的影响

高温胁迫下正常蛋白合成受阻、蛋白分解加剧是造成膜完整性破坏,导致电解质渗漏及作物伤害的一个重要原因。Martineau^[20]研究表明,植物细胞膜在高温伤害下,膜的通透性增加,电解质扩散出细胞,电导率升高,产生大量的自由基,引起或加剧膜脂过氧化作用。本试验中黄瓜叶片中的细胞膜透性随着处理时间的延长, L_1 降低, L_2 、 L_3 增加;随着处理空气湿度的升高,细胞膜透性降低,在处理第24天时, L_1 比 L_2 、 L_3 均降低74.45%。说明高湿(L_1)处理发生膜脂过氧化作用的程度低,并得到逐渐修复。

3.4 高温下空气湿度调控对黄瓜叶片保护酶活性的影响

高温胁迫使黄瓜幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性均上升,增强了对活性氧的清除能力,有效地缓解了由高温胁迫诱导的膜脂过氧化伤害。高温胁迫可引起植株体内活性氧积累量的增加,这些活性氧若不及时清除,必然造成氧化胁迫,引起膜脂过氧化,导致膜系统受到破坏。为了避免这些伤害,植物在长期的进化适应过程中,形成了一整套酶促防御系统,它主要由SOD、POD、CAT和APX、GPX构成,它们在活性氧的脱毒过程中起重要作用,对抵御多种理化因子胁迫,减少活性氧积累,维护膜结构完整等起着重要作用^[18,21]。一方面它们可以直接与活性氧反应,将其还原;另一方面又可作为酶的底物在活性氧清除过程中扮演重要角色。已有大量的试验研究证实,在非逆境条件下植物抗氧化系统酶活性均处于相对较低的水平,当植物接受适度的逆境诱导过程(即促氧化)后,作为植物对外界逆境因子的适应性反应才表现出上升的

态势^[22]。本试验结果表明,黄瓜叶片中保护酶的活性随着处理时间的延长, L_1 、 L_2 处理增强, L_3 处理则先增后降,从而在一定程度上增强了生物体对环境的适应性,这与张宗申^[23]和马德华等^[24]的报道相一致。但是,不同处理的保护酶活性不同,表现为 L_1 的活性低于 L_2 和 L_3 ,这可能是 L_1 处理下黄瓜植株受到的逆境胁迫小,对酶促防御系统的活性诱导较弱的缘故。

综合以上分析可以看出, L_1 处理随着处理时间的延长,渗透调节物质增加,保护酶系统增强,丙二醛积累少,保护酶的活性受到的逆境诱导较小,使细胞膜得到了保护,降低了细胞膜透性。说明在 CO_2 加富下,增加空气湿度可以强化高温管理大棚嫁接黄瓜抵御逆境胁迫的能力,降低逆境胁迫的程度,缓解逆境伤害。

参考文献:

- [1] Zhao H T, Liu W, Liu G X. Analysis on the effect of using graftage for cucumber culture under plastic house [J]. *System Sciences and Comprehensive in Agriculture* 2001, 17 (1): 67-68.
- [2] 胡艳清, 苏媛, 韩凤叶, 等. 嫁接黄瓜在愈合过程中的解剖观察和抗氧化酶活性的变化研究 [J]. *内蒙古农业大学学报* 2007, 28(3): 224-230.
- [3] Hussein I S, Slack D C. Fruit diameter and fruit growth rate of three apple cultivars on rootstock-scion combinations [J]. *Hortsci*, 1994, 29: 179-181.
- [4] 马德华, 庞金安, 霍振荣, 等. 黄瓜对不同温度逆境的抗性研究 [J]. *中国农业科学*, 1999, 32(5): 28-35.
- [5] Easterling W, Apps M. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: A view from the IPCC [J]. *Climatic Change* 2005, 70: 165-189.
- [6] Hu J, Yang L X, Zhou J *et al.* Effect of free-air CO_2 enrichment (FACE) on grain filling dynamics of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica* 2007, 40(11): 2443-2451.
- [7] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M *et al.* Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980 [J]. *Nature*, 1995, 375: 666-670.
- [8] Morison J I L, Lawlor D W. Interactions between increasing CO_2 concentration and temperature on plant growth [J]. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22: 659-682.
- [9] Yuan H M, Zhou J M, Duan Z Q *et al.* Effects of elevated CO_2 and potassium on cucumber growth [J]. *Soils* 2009, 41(6): 869-874.
- [10] 邹琦. 植物生理生化实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

- [12] 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.
- [13] 刘书仁, 郭世荣, 孙 锦, 等. 脯氨酸对高温胁迫下黄瓜幼苗活性氧代谢和渗透物质含量的影响 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(4): 127–131.
- [14] 沈文云, 马德华, 侯 锋, 等. 弱光处理对黄瓜叶绿体超微结构的影响 [J]. 园艺学报, 1995, 22(4): 39–41.
- [15] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害 [J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(21): 84–90.
- [16] 何晓明, 林毓娥, 陈清华, 等. 高温对黄瓜幼苗生长、脯氨酸含量及 SOD 酶活性的影响 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2002, 20(1): 30–33.
- [17] 孟令波, 李淑敏. 高温胁迫对黄瓜生理、生化过程的影响 [J]. 哈尔滨学院学报, 2003, 24(10): 121–125.
- [18] 卢育华, 申育梅, 陈利平. 黄瓜单个叶片光合特性研究 [J]. 园艺学报, 1994, 21(1): 54–58.
- [19] 李建建, 郁继华, 常雅君, 等. 高温胁迫对黄瓜幼苗叶片质膜透性及保护酶活性的影响 [J]. 长江蔬菜, 2007(9): 59–61.
- [20] Martineau J R, Specht J E. Temperature tolerance in soybeans [J]. Crop Science, 1979, 19: 75–81.
- [21] Fridovich I. The biology of oxygen radical [J]. Science, 1978, 201: 875–880.
- [22] Martina S, Wolong M, Cosima W, *et al.* Ozone-induced oxidative burnt in the ozone bicm onitor plant tobacco BelWs [J]. The plant J, 1998, 16: 235–245.
- [23] 张宗申, 利容千, 王建波. 外源 Ca、La、EGTA 处理对辣椒叶片热激反应的影响 [J]. 武汉大学学报, 2000(2): 253–256.
- [24] 马德华, 庞金安, 霍振荣, 等. 高温对黄瓜幼苗膜脂过氧化作用的影响 [J]. 西北植物学报, 2000, 20(1): 141–144.