

# 高温胁迫对设施番茄和黄瓜光合特性及抗氧化酶活性的影响

朱 静<sup>1,2</sup>, 杨再强<sup>1,2</sup>, 李永秀<sup>1,2</sup>, 顾礼力<sup>1,2</sup>, 张 波<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏 南京 210044)

**摘 要:**以黄瓜品种“津优 35”和番茄品种“金粉 2 号”为试材, 于 2011 年 1~6 月在南京信息工程大学人工气候箱进行环境控制试验, 系统研究高温 32~40℃ 处理不同时间对黄瓜、番茄叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响。结果表明: 高温胁迫处理明显抑制了黄瓜和番茄光合速率, 处理时间越长, 光合速率下降越快, 当 38~40℃ 高温持续一段时间后, 黄瓜、番茄的最大光合速率为负值; 随高温胁迫程度的增加和胁迫时间的延长, 黄瓜和番茄的 PSII 潜在光化学效率(Fv/Fm)、光化学淬灭(qP)均呈现下降趋势, 40℃ 高温胁迫 5 d 后再经过恢复, 黄瓜和番茄的 Fv/Fm 及 qP 无法恢复到对照水平; 当温度达到 38℃ 以上时, 黄瓜和番茄的 SOD、POD、CAT、MDA 酶随着胁迫温度的升高和持续时间的增加而呈现与 38℃ 以下时相反的情况, 根据高温对黄瓜和番茄叶片光合参数的影响将高温胁迫划分为轻度胁迫、中度胁迫、重度胁迫和极重度胁迫 4 个等级, 并确定气象指标。

**关键词:**高温; 番茄; 黄瓜; 光合特性; 抗氧化酶活性

**中图分类号:**S 642. 226 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)01-0063-06

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)和黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是我国产量和面积最高的设施蔬菜, 一直倍受关注<sup>[1-8]</sup>。温度是植物生长发育的必要条件, 过高或过低的温度胁迫在植物整个发育过程中会造成不利影响<sup>[1-2]</sup>。番茄和黄瓜都属于喜温植物, 但不耐高温, 近年来对二者的研究大多集中在抗寒、抗冷性上<sup>[8-14]</sup>。因全球气候变化所引起的季节性或突发性的给设施蔬菜的生长和产量带来巨大的影响。这些逆境导致蔬菜品质下降, 产量降低, 直接或间接地造成巨大的经济损失。因此, 研究设施蔬菜对高温胁迫的响应, 对设施环境优化调控及设施作物高温气象灾害防御提供科学依据。

近年来, 国内外关于高温对植物生理方面的影响有较多研究报道, Song J J 等<sup>[5]</sup>研究了多胺对高温抑制番茄花粉萌芽改善的影响; Zhao X 等<sup>[7]</sup>研究了高温作用对黄瓜叶片的衰老和光合特性的影响, 认为在高温胁迫下

黄瓜叶片衰老加速; Lohar D P 等<sup>[15]</sup>认为番茄的花芽和总花数在高温胁迫下明显低于正常温度下的数量; 孟令波等<sup>[16]</sup>研究了高温胁迫对黄瓜生理、生化过程的影响, 认为高温胁迫对植物光合作用、呼吸作用以及蛋白质含量都有一定的影响; 贾洪涛等<sup>[17]</sup>研究了高温胁迫对植物光系统的影响及对策, 认为高温胁迫 PS I 功能激发, PS II 放氧活性及受体端电子传递被抑制, 结构也发生变化。

该研究设计环境控制试验, 系统研究高温胁迫对番茄和黄瓜光合作用、叶绿素荧光参数及抗氧化酶活性的影响, 研究结果为设施黄瓜和番茄环境控制及高温气象灾害预警提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试黄瓜品种为“津优 35”和番茄品种为“金粉 2 号”。“津优 35”黄瓜以主蔓结瓜为主, 叶片中等大小, 瓜码密, 单性结实能力强, 化瓜少, 畸型瓜(弯瓜、尖嘴、大肚等)率低, 商品外观好; 该品种早熟、丰产、耐低温、弱光、高湿高温, 耐、抗病毒病, 后期耐热, 适应性强, 连续 7 d 最低 7~8℃ 低温弱光条件下生长发育正常, 生长后期在 36℃ 高温条件下仍可正常结瓜, 适应日光温室越冬及早春栽培中极端温光条件<sup>[18]</sup>。“金粉 2 号”番茄由辽宁省农业科学院园艺研究所育成。无限生长型, 早熟, 生育期 105 d 左右, 抗逆性强, 耐低温弱光, 且耐高温高湿, 在

**第一作者简介:**朱静(1987-), 女, 江苏南通人, 硕士, 现从事设施农业气象保障与服务研究工作。E-mail: zhujing. 1223@163. com。

**责任作者:**杨再强(1967-), 男, 四川安岳人, 教授, 博士生导师, 现从事设施农业气象灾害。E-mail: yzq@nuist. edu. cn。

**基金项目:**公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY(QX) 201006028; GYHY(QX) 200906023); 江苏省科技支撑资助项目(BE2010734)。

**收稿日期:**2011-10-10

较低温度下坐果率高,在弱光下连续坐果能力强,果实膨大快。高抗叶霉病,抗病毒病,耐贮运,适合长途运输,货架期较长。果实圆形,粉红色,色泽艳丽,果面光滑,大小均匀,果脐小,果肉厚,硬度高<sup>[19-20]</sup>。

## 1.2 试验方法

试验于 2011 年 1~6 月在南京信息工程大学农业气象试验站内的人工气候箱(TPG1260, Australian)中进行,高温设计 32、34、36、38、40℃ 5 个水平,以 25℃ 处理为对照,处理 1~5 d,并在 25℃ 环境下恢复 1~5 d。试验期间,相对湿度控制为 75%,光合有效辐射控制为 800  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**1.2.1 光合参数的测定** 光合作用的测量采用 LI-6400 便携式光合作用测定系统(LI-COR Biosciences Inc., USA)在 9:00~1:00 时,3 次重复。光响应曲线的测量利用 LI-6400 光合作用测定系统的 6400-02B 红蓝光源,控制叶室内光合有效辐射(PAR)为 0~2 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的 14 个水平,分别测量不同 PAR 水平下的光合速率,测量期间控制叶室内空气温湿度、CO<sub>2</sub> 浓度恒定。

**1.2.2 荧光参数测定** 叶绿素荧光参数的测量用 LI-6400 光合作用测定系统的 6400-40 荧光叶室,于黎明前测量暗适应荧光参数 Fo、Fm,然后在 10:00 左右测量同一叶片的光适应荧光参数 Fo'、Fm'、Fs,进而计算得到 PSII 最大量子产量(Fv/Fm)、光下开放的 PSII 反应中心的激发能捕获效率(Fv'/Fm')、作用光存在时 PSII 实际的光化学量子效率( $\Phi_{\text{PSII}}$ )、光化学淬灭(qp)及电子传递效率 ETR,3 次重复。

**1.2.3 酶活性参数的测定** SOD 的测定:将 20  $\mu\text{L}$  酶液和 3 mL 反应液(含 0.02 M pH=7.8 磷酸缓冲液 150 mL、130 mM 甲硫氨酸 30 mL、750  $\mu\text{M}$  氮蓝四唑 30 mL、100  $\mu\text{M}$  EDTA 30 mL、20  $\mu\text{M}$  核黄素 30 mL 和蒸馏水 25 mL)放入 10 mL 试管中,同时取 2 支试管做对照,2 支试管做空白(不加酶液,用缓冲液代替),空白置暗处,对照与酶液同置于 4 000 lx 条件下光照 30 min,以空白调零,560 nm 比色。计算公式:SOD 总活性 =

$(A_{\text{CK}} - A_{\text{E}}) \times V(W \times 0.5 \times A_{\text{CK}} \times V_{\text{E}})$ , W 为样重, V 为样液总体积(mL),  $V_{\text{E}}$  为测定时酶液用量(mL),  $A_{\text{CK}}$  为照光对照管的吸光度值,  $A_{\text{E}}$  为样品管的吸光度值; POD 的测定:将 20  $\mu\text{L}$  酶液和 3 mL 反应液(含 0.1 M pH=6.0 磷酸缓冲液 50 mL,愈创木酚 28  $\mu\text{L}$ , 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 19  $\mu\text{L}$ )于比色皿中,470 nm 下每隔 1 min 读 1 次数,共 3 次。计算公式:POD 活性 =  $A \cdot V / (V_{\text{a}} \cdot W)$ , A 为样品管的吸光度值, W 为样重, V 为样液总体积(mL),  $V_{\text{a}}$  为测定时酶液用量(mL); CAT 的测定:将 50  $\mu\text{L}$  酶液和 2.5 mL 反应液(含 0.1 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 5 mL 和 0.1 M pH 7.0 磷酸缓冲液 20 mL)于比色皿中,240 nm 比色,每 1 min 读 1 次,共 3 次。计算公式:POD 活性 =  $A \cdot V / (V_{\text{a}} \cdot W)$ , A 为样品管的吸光度值, W 为样重, V 为样液总体积(mL),  $V_{\text{a}}$  为测定时酶液用量(mL); MDA 的测定:将 1 mL 酶液和 2 mL 0.6% TBA 反应液(含 0.6 g 硫代巴比妥酸, 10% 三氯乙酸)于离心管中,封口沸水浴 15 min,迅速冷却后 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液在 600、532、450 nm 波长下比色。计算公式:MDA 活性 =  $(6.45 \times (D_{532} - D_{600}) - 0.56 \times D_{450}) \times 0.015 / W$ 。  $D_{600}$  为样品在 600 nm 处的吸光度值,  $D_{532}$  为样品在 532 nm 处的吸光度值,  $D_{450}$  为样品在 450 nm 处的吸光度值。

## 2 结果与分析

### 2.1 高温胁迫对黄瓜、番茄最大光合速率的影响

由图 1 可知,随着高温胁迫程度和时间的增加,番茄、黄瓜的最大光合速率都逐渐降低。32℃ 处理 12~72 h,黄瓜光合速率由 17.5  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  下降到 9.5  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显低于对照的 18.8  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,34、36℃ 等高温胁迫不同时间后,黄瓜光合作用速率显著下降。当 38℃ 高温持续 72 h 或 40℃ 高温持续 48 h 后,最大光合速率为负值,说明黄瓜光系统已经被完全破坏,黄瓜植株停止生长。对于番茄,最大光合作用速率随高温胁迫变化规律的趋势与黄瓜一致,当 38℃ 高温持续 48 h 或 40℃ 高温持续 24 h 后,最大光合速率为负值,此时番茄光系统被完全破坏。

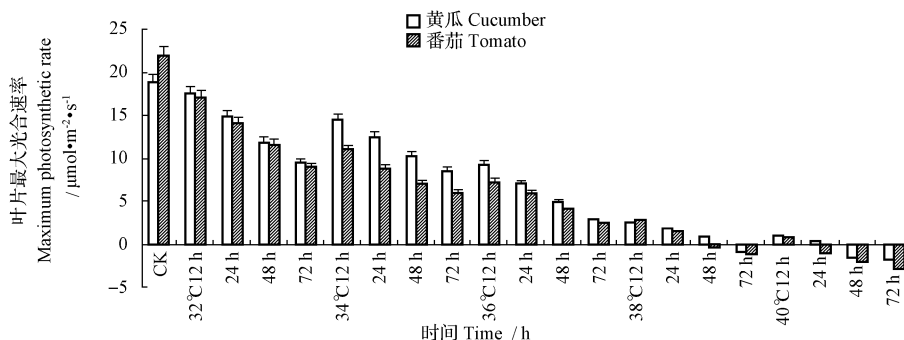


图 1 高温胁迫对黄瓜、番茄最大光合速率的影响

Fig. 1 Effect of high temperature on maximum photosynthetic rate of cucumber and tomato leaves

## 2.2 高温胁迫及恢复对黄瓜、番茄叶绿素荧光参数的影响

随着高温胁迫程度的增加和胁迫时间的延长,黄瓜、番茄的非光化学淬灭  $q_N$  均呈上升趋势,PSII 潜在光化学效率  $F_v/F_m$ 、光化学淬灭  $q_P$  均呈下降趋势。在高温胁迫 5 d 后再进行恢复处理,发现不同高温胁迫处理过的黄瓜、番茄植株恢复能力差异较大,32℃ 高温处理 5 d 后,黄瓜(图 2-A)、番茄(图 2-B)的  $F_v/F_m$  逐渐降低,分别达到 0.55 和 0.52,明显低于对照的 0.831 与 0.835。32℃ 高温对黄瓜(图 2-C)、番茄(图 2-D)化学淬灭  $q_P$  分别降到 0.62 和 0.61,均低于对照的 0.87,在恢复 5 d 适宜温度后,基本能恢复到处理前状态,34℃ 高温处理 5 d 及恢复 5 d 适宜温度后,黄瓜、番茄的  $F_v/F_m$  与  $q_P$  相对 32℃ 有所降低,变化趋势与 32℃ 差异不大,而 38℃ 和

40℃ 处理过的植株,在恢复 5 d 后  $F_v/F_m$  和  $q_P$  无法恢复到对照水平,特别是 40℃ 处理下,植株的光合系统遭到严重破坏,在恢复处理过程中  $F_v/F_m$  和  $q_P$  仍处于下降状态,可见 38℃ 和 40℃ 高温对黄瓜、番茄植株造成了不可逆转的伤害,使得植株濒临死亡。

在 32℃ 高温胁迫 5 d 后,黄瓜(图 2-E)、番茄(图 2-F)的  $q_N$  呈明显上升的趋势,分别达到 0.51 和 0.50,明显高于对照的 0.21 和 0.23,经过恢复 5 d 适宜温度后,基本能恢复到处理前状态,34℃ 与 36℃ 高温处理 5 d 后,黄瓜、番茄的  $q_N$  相对 32℃ 有所增加,变化趋势与 32℃ 差异不大,恢复 5 d 适宜温度后, $q_N$  有所降低,但已无法恢复原来的状态,在 38℃ 和 40℃ 高温处理 4 d 后,尽管  $q_N$  已经升高到 0.8 以上,但是  $F_v/F_m$  和  $q_P$  仍然降至 0.4 以下,且恢复 5 d 正常温度处理后仍不能逆转。

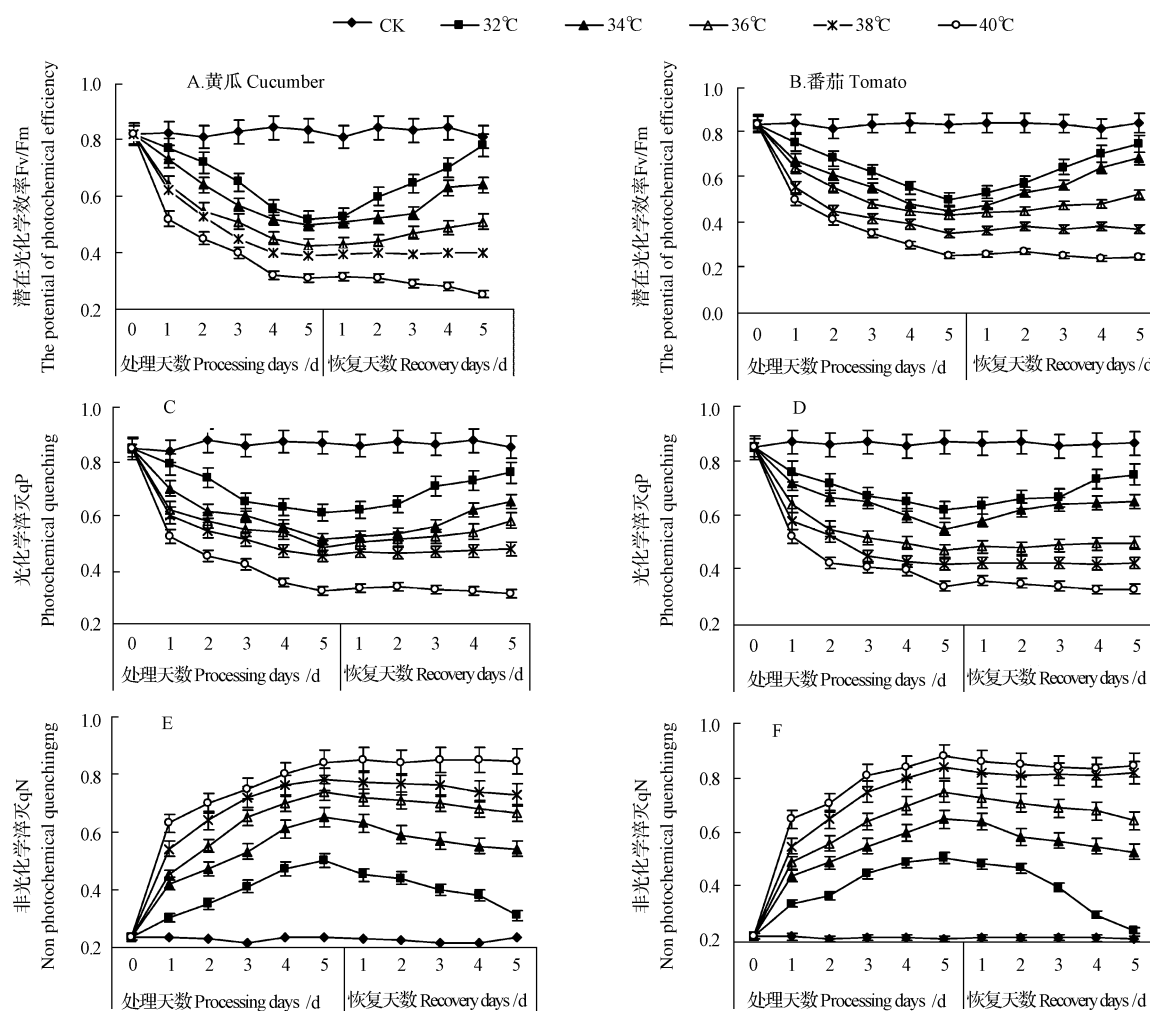


图 2 高温胁迫及恢复对黄瓜(A,C,E)和番茄(B,D,F)叶片叶绿素荧光特性的影响

Fig. 2 The effect of high temperature and recovery on chlorophyll fluorescence characteristics of cucumber (A,C,E) and tomato (B,D,F)

## 2.3 高温胁迫对黄瓜、番茄抗氧化酶活性的影响

由表 1 可知,32℃ 高温处理 5 d 后,黄瓜叶片 SOD、POD 酶活性值逐渐增加,分别达 666.35  $U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$  和 189.72  $U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ ,远高于对照 504.98  $U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

和 131.69  $U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ ,番茄叶片的 SOD、POD 酶活性值与黄瓜变化趋势一致,分别比对照增加了 103.98  $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$  和 21.78  $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。34、36℃ 高温处理 5 d 后,黄瓜、番茄叶片 SOD、POD 酶活性值一直保持

增加的趋势,而在温度 38℃ 与 40℃ 时,黄瓜、番茄叶片 SOD、POD 酶活性值呈现下降趋势。

黄瓜、番茄叶片 CAT 酶活性随着胁迫温度的升高先升高后降低,34、34、36℃ 高温处理 5 d 后,CAT 值一直保持上升趋势,最高值比对照分别增加了 2.61 U · g<sup>-1</sup> ·

min<sup>-1</sup>和 0.28 U · g<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>,而在温度 38℃ 与 40℃ 后,黄瓜、番茄叶片 CAT 值呈现下降趋势。黄瓜、番茄叶片 MDA 酶活性在 32℃ 时随处理时间延长先增加后降低,当温度高于 32℃ 时则处理时间延长先不断升高,最高值分别比对照增加了 0.06 μmol/g 和 0.056 μmol/g。

表 1

高温胁迫对黄瓜、番茄不同酶活性的影响

Table 1

The effect of high temperature on the enzyme activity of cucumber and tomato

处理 Treatment		黄瓜 Cucumber				番茄 Tomato			
温度 /℃	时间 /d	SOD /U · g <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup>	POD /U · g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup>	CAT /U · g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup>	MDA /μmol · g <sup>-1</sup>	SOD /U · g <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup>	POD /U · g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup>	CAT /U · g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup>	MDA /μmol · g <sup>-1</sup>
CK		504.98±0.02	131.69±0.015	1.26±0.025	0.006±0.03	376.25±0.035	5.74±0.025	0.17±0.01	0.011±0.015
32	1	544.74±0.03	157.38±0.02	1.93±0.01	0.007±0.035	406.39±0.025	10.03±0.035	0.21±0.01	0.014±0.02
	3	625.45±0.02	173.47±0.02	2.42±0.015	0.008±0.03	445.92±0.02	22.89±0.025	0.25±0.02	0.013±0.01
	5	666.35±0.03	189.72±0.035	2.55±0.025	0.006±0.02	480.23±0.035	27.52±0.02	0.31±0.035	0.012±0.015
34	1	574.89±0.015	165.49±0.02	2.17±0.015	0.011±0.03	426.84±0.035	27.74±0.015	0.25±0.02	0.013±0.035
	3	596.12±0.035	179.47±0.015	2.79±0.01	0.017±0.015	473.56±0.01	38.95±0.03	0.33±0.025	0.021±0.01
	5	635.09±0.03	193.54±0.035	3.34±0.015	0.025±0.025	525.33±	41.68±0.015	0.38±0.035	0.029±0.015
36	1	612.93±0.015	182.14±0.035	3.68±0.01	0.027±0.035	489.12±0.015	37.71±0.025	0.31±0.03	0.033±0.035
	3	708.67±0.02	197.53±0.03	3.75±0.015	0.036±0.025	534.89±0.02	44.82±0.015	0.39±0.015	0.042±0.03
	5	726.54±0.04	206.74±0.02	3.87±0.015	0.042±0.02	585.45±0.025	51.67±0.035	0.45±0.02	0.046±0.035
38	1	623.43±0.04	204.69±0.01	4.25±0.04	0.039±0.04	546.28±0.015	42.14±0.035	0.43±0.015	0.044±0.02
	3	606.87±0.01	190.85±0.015	4.36±0.015	0.047±0.035	490.15±0.04	34.86±0.035	0.41±0.04	0.054±0.04
	5	572.38±0.02	186.09±0.01	3.69±0.01	0.052±0.025	436.47±0.035	26.64±0.025	0.37±0.025	0.062±0.03
40	1	511.57±0.04	151.78±0.015	3.91±0.04	0.050±0.015	519.61±0.025	34.72±0.015	0.39±0.04	0.058±0.015
	3	474.63±0.025	138.36±0.035	3.34±0.03	0.056±0.025	468.53±0.01	25.88±0.035	0.33±0.025	0.063±0.01
	5	458.97±0.01	127.40±0.03	3.17±0.04	0.066±0.03	414.87±0.04	17.09±0.015	0.31±0.015	0.067±0.015

## 2.4 高温胁迫等级指标的确定

高温胁迫时,黄瓜和番茄最大光合速率和 PSII 潜在光化学效率 Fv/Fm 下降显著,为了更好地描述高温胁迫对黄瓜、番茄生理特性的影响,在此,引进高温胁迫指数,其计算方法见公式(1)。

$$HTI = \frac{P'_{g \max}}{P_{g \max}} \times \frac{(Fv/Fm)'}{Fv/Fm} \times 10 \quad (1),$$

式中,HTI 为高温胁迫指数, $P_{g \max}$  和  $P'_{g \max}$  分别表示最适温度及高温胁迫下的最大光合速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),Fv/Fm 和 (Fv/Fm)' 分别表示最适温度及高温状态下的 PSII 潜在光化学效率。

将试验所得的  $P'_{g \max}$ 、 $P_{g \max}$ 、(Fv/Fm)'、Fv/Fm 值代入公式(1),计算得到 HTI 的值(表 2)。对于黄瓜和

表 2

黄瓜和番茄的高温胁迫指数的计算

Table 2

The index calculation of high temperature stress about cucumber and tomato

处理 Treatment		黄瓜 Cucumber					番茄 Tomato				
温度 /℃	时间 /h	$P_{g \max}$	Fv/Fm	$P'_{g \max}/P_{g \max}$	(Fv/Fm)'/(Fv/Fm)	HTI	$P_{g \max}$	Fv/Fm	$P'_{g \max}/P_{g \max}$	(Fv/Fm)'/(Fv/Fm)	HTI
32	12	17.26	0.79	0.90	0.96	8.67	16.88	0.81	0.78	0.93	7.26
	24	14.63	0.78	0.76	0.95	7.26	14.27	0.75	0.66	0.79	5.19
	48	11.48	0.73	0.60	0.89	5.33	10.98	0.69	0.51	0.60	3.07
	72	9.76	0.66	0.51	0.80	4.10	8.67	0.62	0.40	0.48	1.91
34	12	14.41	0.78	0.75	0.95	7.15	10.42	0.73	0.48	0.57	2.77
	24	12.28	0.74	0.64	0.90	5.78	8.56	0.69	0.40	0.47	1.87
	48	10.13	0.66	0.53	0.80	4.25	6.49	0.62	0.30	0.36	1.07
	72	8.78	0.58	0.46	0.71	3.24	5.33	0.55	0.25	0.29	0.72
36	12	9.57	0.71	0.50	0.87	4.32	6.66	0.69	0.31	0.37	1.13
	24	7.65	0.66	0.40	0.80	3.21	5.24	0.63	0.24	0.29	0.70
	48	4.92	0.58	0.26	0.71	1.81	3.77	0.54	0.17	0.21	0.36
	72	2.67	0.51	0.14	0.62	0.87	2.13	0.47	0.10	0.12	0.12
38	12	2.60	0.68	0.145	0.83	1.12	2.26	0.63	0.10	0.12	0.13
	24	1.42	0.61	0.07	0.74	0.55	1.17	0.565	0.05	0.06	0.03
	36	0.54	0.54	0.03	0.66	0.19	-0.06	0.47	0.003	0.00	—
	72	-0.36	0.47	-0.02	0.57	—	-0.82	0.42	-0.04	-0.05	—
40	12	0.67	0.59	0.03	0.72	0.25	0.74	0.56	0.03	0.04	0.01
	24	0.18	0.52	0.01	0.63	0.06	-0.48	0.50	-0.02	-0.03	—
	36	-0.98	0.47	-0.05	0.57	—	-1.35	0.41	-0.06	-0.07	—
	72	-1.23	0.41	-0.06	0.50	—	-2.03	0.36	-0.09	-0.11	—

番茄,在最适宜温度条件下,HTI 值为 10,结合高温处理对黄瓜最大光合速率、荧光参数及酶活性的影响,可以将 32℃ 高温持续 24 h 以内、34℃ 高温持续 12 h 以内划分为轻度胁迫(I 级),即 HTI 在 7~10;将 32℃ 高温持续 48~72 h、34℃ 高温持续 24~48 h 及 36℃ 高温持续 12 h 以内划分为中度胁迫(II 级),即 HTI 在 4~7;34℃ 高温持续 72 h、36℃ 高温持续 24~72 h 及 38℃ 高温持续 24 h 为重度胁迫(III 级),HTI 在 0.5~4.0;38℃ 高温持续 48 h 以上、40℃ 高温为极重度胁迫(IV 级),HTI 在 0.5 以下。此外,将  $P_{g\max}$  出现负值的情况均划分为极重度胁迫(IV 级)。

结合高温处理对番茄最大光合速率、荧光参数及酶活性的影响,可以将 32℃ 高温持续 24 h 以内划分为轻度胁迫(I 级),即 HTI 在 5~10;将 32℃ 高温持续 48~72 h、34℃ 高温持续 48 h 以内、36℃ 高温持续 12 h 划分为中度胁迫(II 级),即 HTI 在 1~5;34℃ 高温持续 72 h、36℃ 高温持续 24~72 h、38℃ 高温持续 12 h 为重度胁迫(III 级),HTI 在 0.1~1.0;38℃ 高温持续 24 h 及以上、40℃ 高温为极重度胁迫(IV 级),HTI 在 0.1 以下。

### 3 结论与讨论

该文利用人工气候箱对黄瓜和番茄进行高温(32~40℃)控制试验,系统测定了不同处理对叶片最大光合作用速率、叶绿素荧光动力参数、抗氧化酶活性,研究表明番茄、黄瓜的最大光合速率都随着胁迫程度和胁迫时间的增加而降低。当 38℃ 高温持续 72 h 或 40℃ 高温持续 48 h 后,黄瓜的  $P_{\max}$  为负值,当 38℃ 高温持续 48 h 或 40℃ 高温持续 24 h 后,番茄的  $P_{\max}$  为负值。该研究结论与 Jorge 等<sup>[21]</sup> 和丁兆堂等<sup>[22]</sup> 观点一致,他们的研究认为番茄光合作用的最佳温度为 25~35℃,温度小于 25℃ 时,光合速率随温度升高增加较快,超过 30℃ 光合速率随温度上升而逐渐下降,而 Berry<sup>[23]</sup> 认为光合作用被认为是植物体对高温最敏感的过程之一,在高温胁迫症状出现时,光系统活性被抑制。

随着高温胁迫程度的增加和胁迫时间的延长,黄瓜、番茄的 PSII 潜在光化学效率  $F_v/F_m$ 、光化学淬灭  $q_P$  均呈现下降趋势, $q_N$  呈上升趋势, $q_N$  上升说明植物叶片的热耗散增加,这也是植物体对高温胁迫的一种适应机制,将过多的能量以热耗散的形式释放,从而保护光系统不受破坏。然而在重度胁迫下,植物体的自身保护机制已经不能够有效保护光系统,因而在 38℃ 和 40℃ 高温处理 4 d 后,尽管  $q_N$  已经升高到 0.8 以上,但是  $F_v/F_m$  和  $q_P$  仍然降至 0.4 以下,且恢复 5 d 正常温度处理后仍不能逆转。而张洁等<sup>[24]</sup> 研究发现,番茄长期在 30℃ 和 35℃ 昼间亚高温处理条件下,叶片光合作用速率显著下降,同时伴随着  $G_s$  和  $C_i$  不同程度的增加及 LS

的明显降低。李森<sup>[4]</sup> 认为在较长时间昼间亚高温处理时,番茄叶片  $P_n$  下降可能是非气孔因素的限制作用。

当温度达到 38℃ 以上时,黄瓜、番茄的 SOD、POD 酶随着胁迫温度的升高和持续时间的增加而降低,CAT、MDA 随着胁迫温度的升高和持续时间的增加而升高,呈现与 38℃ 以上时相反的情况,这与马德华等<sup>[25]</sup> 研究相符合,他认为高温胁迫使黄瓜幼苗体内 MDA 含量明显增加,POD 活性增强,CAT 活性降低,同时 SOD 活性逐渐降低。SOD、POD 可作为组织老化的一种生理指标,CAT 酶活性的大小与植物代谢强度以及抗性有着密切的关系,MDA 含量的多少反映了细胞膜脂的过氧化程度以及对逆境反应的强弱,间接反映出细胞损伤的程度<sup>[26]</sup>。研究结果说明高温胁迫使得黄瓜、番茄加速衰老。Zhao 等<sup>[27]</sup> 认为高温是影响粮食产量和植物衰老的一个重要因素,高温使小麦叶片 MDA 含量增加,SPAD 值减小,SOD 和 CAT 活性降低。

结合高温处理对番茄最大光合速率、荧光参数及酶活性的影响,可以将 32℃ 高温持续 24 h 以内划分为轻度胁迫(I 级),即 HTI 在 5~10;将 32℃ 高温持续 48~72 h、34℃ 高温持续 48 h 以内、36℃ 高温持续 12 h 划分为中度胁迫(II 级),即 HTI 在 1~5;34℃ 高温持续 72 h、36℃ 高温持续 24~72 h 为重度胁迫(III 级),HTI 在 0.1~1.0;38℃ 高温持续 24 h 及以上、40℃ 高温为极重度胁迫(IV 级),HTI 在 0.1 以下或  $P_{g\max}$  为负值。

该研究以黄瓜品种“津优 35”和番茄品种“金粉 2 号”作为对象,研究不同品种对温度的反应不同,今后应该研究不同地区的主栽品种对高温胁迫的反应,深入研究不同变温对作物生理特性的影响,进一步开展环境控制试验,明确不同品种的高温灾害指标,为不同地区的设施农业气象灾害的防御及设施番茄和黄瓜种植区划提供科学依据。

### 参考文献

- [1] 徐晓昀. 高温胁迫对黄瓜叶片光合特性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.
- [2] Shtienberg D, Elad Y, Ariela N, et al. Significance of leaf infection by *Botrytis cinerea* in stem rotting of tomatoes grown in non-heated greenhouses[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 1998, 104: 753-763.
- [3] 宋兴舜. 黄瓜、番茄叶片细胞器中活性氧代谢系统对逆境的响应机制[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [4] 李森. 短期昼间亚高温胁迫下番茄叶片光合作用的变化及其对钙与水杨酸调控的响应[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
- [5] Song J J, Nada K, Tachibana S. Ameliorative effect of polyamines on the high temperature inhibition of *in vitro* pollen germination in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 80: 203-212.
- [6] He Z Q, He C X, Zhang Z B, et al. Changes of antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by arbuscular mycorrhizae under NaCl stress[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 59: 128-133.

- [7] Zhao X, Nishimura Y, Fukumoto, et al. Effect of high temperature on active oxygen species, senescence and photosynthetic in cucumber leaves[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70, 212-216.
- [8] Nover L, Scharf K D, Neumann D. Formation of cytoplasmic heat shock granules in tomato cell cultures and leaves[J]. Mol. Cell Biol., 1983 (3):1648-1652.
- [9] 于海霞. 低温霜冻和高温影响加工番茄生长发育及防御措施[J]. 新疆农业科技, 2008(5):48.
- [10] 徐凤霞, 王琪珍. 低温寡照对温室大棚蔬菜的影响及其防御对策探讨[J]. 现代农业科技, 2007(21):15-16.
- [11] 代玉华, 刘训言, 孟庆伟, 等. 低温弱光处理及恢复期间黄瓜叶片的光抑制与类囊体膜中脂肪酸组成的变化[J]. 植物生理学通讯, 2004(1):14-18.
- [12] Miao M, Zhang Z, Xu X, et al. Different mechanisms to obtain higher fruit growth rate in two cold-tolerant cucumber (*Cucumis sativus* L.) lines under low night temperature[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119, 357-361.
- [13] Hu W H, Song X S, Shi K, et al. Changes in electron transport, superoxide dismutase and ascorbate peroxidase isoenzymes in chloroplasts and mitochondria of cucumber leaves as influenced by chilling[J]. Photosynthetica, 2008, 46(4):581-588.
- [14] Oene D, Jan H V, Piet J G, et al. Low-temperature-related growth and photosynthetic performance of alloplasmic tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with chloroplasts from *L. hirsutum* Humb. and Bonpl[J]. Euphytica, 2002, 123:407-421.
- [15] Lohar D P, Peat W E. Floral characteristics of heat-tolerant and heat-sensitive tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars at high temperature[J]. Scientia Horticulturae, 1998, 73:53-60.
- [16] 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.
- [17] 贾洪涛, 曹善东. 高温胁迫对植物光系统的影响及对策[J]. 山东林业科技, 2003, 146:45-46.
- [18] 李加旺, 张文珠, 李愚鹤, 等. 设施黄瓜新品种津优 35 品种特性及高效栽培技术[J]. 天津农业科学, 2010, 16(1):54-56.
- [19] 何仕敏. 秋延后晚番茄的栽培技术[J]. 农技服务, 2007, 24(9):26.
- [20] 瓜菜新品种[N]. 山东蔬菜, 2005(4):46.
- [21] Jorge A B, Theodore C H. Photosynthetic and respiratory characterization of field grown tomato[J]. Photosynthesis Research, 1991, 28:21-32.
- [22] 丁兆堂, 卢育华, 徐坤. 环境因子对番茄光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报, 2003, 34(3):356-360.
- [23] Berry J. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. Annu. Rev. Plant Physiol., 1980, 31:491-543.
- [24] 张洁, 李天来. 短时间亚高温处理及其恢复对番茄光合特性的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1):162-166.
- [25] 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, 2002, 20(1):141-144.
- [26] 文汉, 吴琦. 两季贡菊花生理生化指标及活性成分测定[J]. 作物研究, 2006(3):249-252.
- [27] Zhao H, Dai T, Jing Q, et al. Leaf senescence and grain filling affected by post-anthesis high temperatures in two different wheat cultivars[J]. Plant Growth Regul, 2007, 51:149-158.

## Effect of High Temperature on the Photosynthetic Characteristics and Antioxidant Enzyme Activities of Cucumber and Tomato in Greenhouse

ZHU Jing<sup>1,2</sup>, YANG Zai-qiang<sup>1,2</sup>, LI Yong-xiu<sup>1,2</sup>, GU Li-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044;  
2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

**Abstract:** The cucumber ‘Jinyou 35’ and the tomato ‘Jinfen No. 2’ were used as materials, the environmental control test was conducted in artificial climate chamber, Nanjing university of information science and technology from January to June, 2011. The effects of high temperature 32~40℃ with different time on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activity of cucumber, tomato were systematically studied, the results showed that the heat stress treatment significantly inhibited the photosynthetic rate of cucumber and tomato, with the processing time longer, photosynthetic rate decreased faster, when 38℃ or 40℃ sustained some hours, the maximum photosynthetic rate of cucumber and tomato was negative; with the levels of heat stress increasing and stress time lengthening, the PSII potential photochemical efficiency (Fv/Fm) of cucumber, tomato, photochemical quenching (qP) showed a downward trend, plants treated by 40℃, after recovering 5 days, Fv/Fm and qP values of cucumber and tomato were still in decline; when the temperature reached above 38℃, the SOD, POD, CAT, MDA of tomato and cucumber was in contrast to the case of the temperature under 38℃. According to the effects of high temperature on photosynthetic parameters of cucumber and tomato leaf, dividing heat stress into four grades: mild stress, moderate stress, severe stress, extremely severe stress, and ascertaining meteorological index.

**Key words:** high temperature; tomato; cucumber; photosynthetic characteristics; antioxidant enzyme activity