

根际高温胁迫对5种瓜类作物生长及叶片光合和叶绿素荧光参数的影响

郝婷^{1,2}, 朱月林^{1,①}, 丁小涛², 金海军², 张红梅², 余纪柱^{2,①}

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095;

2. 上海市农业科学院设施园艺研究所 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403)

摘要: 采用营养液栽培法, 比较分析了根际高温(35 ℃)处理0、3和5 d以及恢复5 d后黑籽南瓜(*Cucurbita ficifolia* Bouché)、‘春秋王2号’黄瓜(*Cucumis sativus* ‘Chunqiuwang No. 2’)、‘兴蔬’丝瓜(*Luffa cylindrica* ‘Xingshu’)、‘五叶香’丝瓜(*Luffa cylindrica* ‘Wuyexiang’)和‘傲美’苦瓜(*Momordica charantia* ‘Aomei’)幼苗的生长及叶片光合和叶绿素荧光参数的变化。结果表明: 与对照(25 ℃)相比, 在高温处理期间及恢复期间, 黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜和‘傲美’苦瓜的株高、茎粗、叶面积、叶绿素相对含量(SPAD)以及叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)、PS II的光能捕获效率(F_v'/F_m')、PS II的实际光化学效率(Φ_{PSII})、实际光化学量子产量(Yield)、表观光合电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)及PS II用于光化学反应的能量比例(P)总体上均显著低于对照; 而‘五叶香’丝瓜的上述指标大多无明显变化, 但其非光化学猝灭系数(qN)及PS II用于天线色素热耗散的能量比例(D)均低于对照; ‘兴蔬’丝瓜的各项指标在高温处理期间均有不同程度的降低或升高, 但在恢复5 d后各项指标均接近或高于对照。研究结果表明: 5种瓜类作物对根际高温的耐受性有明显差异。其中, 黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜对根际高温的耐性最差; 2个丝瓜品种特别是‘五叶香’丝瓜的耐性较强, 可作为耐高温瓜类作物的砧木。

关键词: 瓜类作物; 根际高温胁迫; 生长; 光合参数; 叶绿素荧光参数

中图分类号: Q945.78; Q948.112+.2; S642 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)02-0065-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.02.10

Effects of high temperature stress in rhizosphere on growth, leaf photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of five cucurbit crops HAO Ting^{1,2}, ZHU Yuejin^{1,①}, DING Xiaotao², JIN Haijun², ZHANG Hongmei², YU Jizhu^{2,①} (1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Protected Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(2): 65-73

Abstract: By hydroponic cultivation method, changes of growth, leaf photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of *Cucurbita ficifolia* Bouché, *Cucumis sativus* ‘Chunqiuwang No. 2’, *Luffa cylindrica* ‘Xingshu’, *Luffa cylindrica* ‘Wuyexiang’ and *Momordica charantia* ‘Aomei’ seedlings after treated by high temperature (35 ℃) in rhizosphere for 0, 3 and 5 d and recovered for 5 d were compared and analyzed. The results show that compared to the control (25 ℃), during high temperature treating and recovering periods, plant height, stem diameter, leaf area, chlorophyll relative content (SPAD), and leaf net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO₂ concentration (Ci), transpiration rate (Tr), excitation energy capture efficiency of PS II (F_v'/F_m'), actual photochemical efficiency of PS II (Φ_{PSII}), actual photochemical quantum yield (Yield), apparent

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 上海市农业委员会重大项目([2010]第4-1号); 上海市科学技术委员会重大项目(13231204200); 上海市农业科学院青年人才成长计划(沪农青字[2014]第1-10号)

作者简介: 郝婷(1986-),女,山西洪洞人,硕士研究生,主要从事蔬菜生理与生物技术研究。

①通信作者 E-mail: ylzhu@njau.edu.cn; yy2@saas.sh.cn

photosynthetic electron transport rate (ETR), photochemical fluorescence quenching coefficient (qP) and energy fraction of PS II used for photochemical reaction (P) of *C. ficifolia*, *C. sativus* 'Chunqiuwang No. 2' and *M. charantia* 'Aomei' are generally significantly lower than those of the control. While most of above indexes of *L. cylindrica* 'Wuyexiang' do not change obviously, but its non-photochemical quenching coefficient (qN) and energy fraction of PS II used for heat dissipation of antenna pigment (D) are lower than those of the control. During high temperature treating period, every index of *L. cylindrica* 'Xingshu' decreases or increases in different degrees, but that is close to or higher than the control after recovered for 5 d. It is suggested that there is obvious difference in tolerance to high temperature in rhizosphere among five cucurbit crops. In which, tolerances of *C. ficifolia* and *C. sativus* 'Chunqiuwang No. 2' are the worst, while tolerances of two cultivars of *L. cylindrica*, especially *L. cylindrica* 'Wuyexiang' are stronger, and it can be used as rootstock of cucurbit crops of resisting high temperature stress.

Key words: cucurbit crops; high temperature stress in rhizosphere; growth; photosynthetic parameters; chlorophyll fluorescence parameters

瓜类作物是重要的园艺蔬菜作物,黑籽南瓜(*Cucurbita ficifolia* Bouché)、黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)、丝瓜[*Luffa cylindrica* (Linn.) M. Roem.]和苦瓜(*Momordica charantia* Linn.)在瓜类作物栽培中各占一定比例,尤其是黄瓜,是设施农业生产中的主要栽培作物之一。各种瓜类作物起源地不同,其对低温或高温的敏感程度也不同^{[1]17-18,23-34}。以不同瓜类作物作为砧木进行嫁接,嫁接苗对不同环境胁迫的耐受能力和抗病性均有一定提高。例如:用黑籽南瓜作砧木可提高黄瓜耐低温、耐盐及抗病害的能力^[2-4];以丝瓜作砧木可提高黄瓜的耐涝能力^[5]及苦瓜的抗病能力^[6]。有研究^[7-9]表明:植物对其根际温度更为敏感,根际温度不仅影响作物根系的生长及其对营养的吸收和运输,还影响植物叶片的光合作用、水分状况及体内激素的产生和分配。

光合作用是植物体最基本也是最重要的生命活动之一,对光合同化物的产量及植物源库输出与输入的比例具有重要影响^[10];叶绿素荧光动力学法是一种无损伤且快速的测定植物叶绿素荧光参数的方法,它可以从内部分析和探索逆境对植物光合生理的影响^[11-12]。

为了明确'春秋王 2 号'('Chunqiuwang No. 2')黄瓜、黑籽南瓜、'兴蔬'('Xingshu')丝瓜、'五叶香'('Wuyexiang')丝瓜及'傲美'('Aomei')苦瓜 5 种常见瓜类作物对根际高温的耐受能力,作者对根际高温(35 °C)条件下这 5 种瓜类作物的生长及叶片的光合及叶绿素荧光参数的变化进行了分析,以期探讨根际高温对不同瓜类作物地上部生长、光化学效率及光合作用的影响机制,并筛选出耐根际高温的瓜类作物砧

木,为瓜类作物耐高温遗传资源的选育及利用研究奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

实验用黑籽南瓜、黄瓜品种'春秋王 2 号'、丝瓜品种'兴蔬'和'五叶香'以及苦瓜品种'傲美'5 种瓜类作物的种子均由上海市农业科学院设施园艺研究所提供。

使用的主要仪器有日生 LP-40 型低噪音气泵、新加坡艾柯 HT033 型电子显示加热棒(额定功率为 100W)、雷磁 DDB-303A 型电导率仪(上海雷磁公司)、502 型手提式叶绿素计(日本美能达有限公司)、LI-6400 型光合测定仪(美国 LI-COR 公司)和 PAM-2100 型便携式调制叶绿素荧光仪(德国 Walz 公司)。

1.2 方法

1.2.1 供试幼苗培养方法 实验于 2013 年在上海市农业科学院庄行综合试验站玻璃温室内进行。于 3 月 22 日将上述 5 种瓜类作物的种子在 50 °C ~ 55 °C 条件下温汤浸种,在 28 °C 条件下催芽 1 d 后播种于具有 50 个孔的育苗盘中,栽培基质为由草炭、蛭石和珍珠岩组成的混合基质,三者体积比为 7:2:1。待幼苗的 2 片子叶完全展平后,选取长势一致的健壮幼苗移栽到嵌有小孔(直径 1 cm,孔间距 10 cm)的泡沫板(长 37.5 cm、宽 24.5 cm、高 3 cm)上进行水培,每孔 1 株,每板 8 株。用岩棉将幼苗固定在泡沫板上,植株根系浸入装有营养液的塑料盆(长 38 cm、宽 25 cm、高 20 cm)中,每盆 1 板。实验用营养液采用山崎配

方^[13],调节营养液的电导率至 $2.3 \sim 2.5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,每隔5 d更换1次营养液,定期测定营养液的pH值及电导率,栽培期间使用通气泵进行24 h连续通气。

1.2.2 根际高温胁迫方法 于4月23日(即黑籽南瓜和黄瓜幼苗为4片真叶期,苦瓜幼苗为6片真叶期,丝瓜幼苗为3片真叶期)进行根际 $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续高温处理,以根际温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为对照(CK)。每个品种每处理各3盆,每盆视为1次重复;盆底各放1个加热棒进行加热,达到设定温度后加热棒自动停止加热并维持营养液温度恒定,带有LED显示屏的一端放在盆外以便观察温度读数。分别于处理的第0天、第3天和第5天测定各处理植株的生长指标及叶片的光合和叶绿素荧光参数;高温处理5 d后将根际温度恢复至 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 并持续处理5 d,同样测定植株的生长指标及叶片的光合和叶绿素荧光参数。

1.2.3 生长指标及叶绿素相对含量测定方法 每种瓜类作物各处理随机选取3株样株测量株高、茎粗、叶面积和叶绿素相对含量。其中,株高是用卷尺测量子叶到生长点的高度;茎粗是用游标卡尺测量上胚轴的直径;参照文献[14]的方法用拍照法测定所有叶片的叶面积;叶绿素相对含量用502型手提式叶绿素计进行测定,以最大功能叶片的叶绿素相对含量(SPAD)进行记录。

1.2.4 光合及叶绿素荧光参数测定方法 于晴天上午9:00至11:00,每种瓜类作物各处理分别选取5株样株,测定其最大功能叶片的光合参数及叶绿素荧光参数。测定光合参数时,环境光照强度均设置为 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 体积浓度为 $(400 \pm 10) \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。测定叶绿素荧光参数时,设置光量子通量密度为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,测定光下最大荧光(F_m')、光下最小荧光(F_o')、稳态荧光(F_i)、实际光化学量子产量(Yield)、表观光合电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(qN),并计算PS II光能捕获效率(F_v'/F_m')和实际光化学效率(Φ_{PSII}),其中, $F_v' = F_m' - F_o'$; $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F_i) / F_m'$ 。参照周艳虹等^[15]的方法计算PS II吸收的光能用于天线色素热耗散、光化学反应和非光化学反应耗散的能量比例,分别用D、P、E表示,计算公式如下: $D = 1 - F_v'/F_m'$; $P = qP \times (F_v'/F_m')$; $E = (1 - qP) \times (F_v'/F_m')$ 。

1.3 数据处理和分析

采用SAS 8.0统计分析软件对实验数据进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 根际高温对5种瓜类作物生长及叶绿素相对含量(SPAD)的影响

经根际高温($35 \text{ }^{\circ}\text{C}$)胁迫后5种瓜类作物的生长及SPAD变化见表1。由表1可见:与对照相比,黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜和‘傲美’苦瓜的株高、叶面积及SPAD值在高温处理3 d后显著降低,并且在高温处理5 d及高温处理结束恢复至室温5 d后仍显著低于对照;而高温胁迫条件下‘兴蔬’和‘五叶香’丝瓜的株高、叶面积及SPAD值指标大多与对照差异不显著,但2种丝瓜的叶面积均在恢复5 d后显著高于对照。与对照相比,黑籽南瓜的茎粗在高温处理3 d后显著减小,‘春秋王2号’黄瓜的茎粗在高温处理5 d后显著减小,而‘傲美’苦瓜的茎粗在恢复5 d后显著减小,2种丝瓜的茎粗均无显著变化。

由表1还可见:与处理0 d相比,根际高温胁迫下处理3和5 d及恢复5 d后5种瓜类作物的株高、茎粗和叶面积总体上显著提高;黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜和‘傲美’苦瓜的SPAD值均显著降低,但2种丝瓜的SPAD值却显著提高。

2.2 根际高温对5种瓜类作物叶片光合参数的影响

经根际高温($35 \text{ }^{\circ}\text{C}$)胁迫处理后5种瓜类作物叶片光合参数的变化见表2。由表2可以看出:与对照相比,5种瓜类作物的净光合速率(P_n)在高温处理3 d后均显著下降;处理5 d和恢复5 d后黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜和‘傲美’苦瓜的 P_n 值仍显著小于对照,而2种丝瓜的 P_n 值则高于对照。与对照相比,经根际高温胁迫处理以及高温处理结束恢复至室温5 d后,5种瓜类作物的气孔导度(G_s)均显著下降,并且黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜的 G_s 下降幅度大于另外3种瓜类作物。黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜的胞间 CO_2 浓度(C_i)在高温处理期间及恢复期间均显著低于对照,另外3种瓜类作物的 C_i 则在高温处理3 d后高于对照,但在处理5 d和恢复5 d后显著低于对照。与对照相比,高温处理期间黑籽南瓜及‘春秋王2号’黄瓜的蒸腾速率(T_r)均显著下降;‘兴蔬’丝瓜及‘傲美’苦瓜的 T_r 在高温处理3 d后略高于对照,但在高温处理5 d后显著低于对照,恢复5 d后也均低于对照;在高温处理3和5 d后‘五叶香’丝瓜的 T_r 均低于对照,但恢复5 d后则显著高于对照。

表1 根际高温对5种瓜类作物生长及叶绿素相对含量(SPAD)的影响¹⁾
 Table 1 Effect of high temperature in rhizosphere on growth and chlorophyll relative content (SPAD) of five cucurbit crops¹⁾

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间幼苗的株高/cm Plant height of seedlings at different treatment times				不同处理时间幼苗的茎粗/cm Stem diameter of seedlings at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	10.20Ad	25.83Ac	35.50Ab	79.20Aa	0.62Ad	0.78Ac
	35	10.52Ad	17.84Bc	18.50Bb	35.15Ba	0.63Ac	0.67Bbc	0.71Bb	0.77Ba
CS	25 (CK)	8.17Ad	10.20Ac	12.33Ab	20.67Aa	0.45Ac	0.52Ab	0.57Aa	0.62Aa
	35	8.20Ab	8.43Bb	9.20Bb	13.40Ba	0.43Ab	0.48Aab	0.50Bab	0.52Ba
LCX	25 (CK)	7.63Ad	16.17Ac	23.50Ab	48.10Aa	0.23Ab	0.32Aa	0.30Aa	0.37Aa
	35	7.50Ad	16.33Ac	23.83Ab	54.00Aa	0.22Ac	0.31Ab	0.34Aab	0.37Aa
LCW	25 (CK)	10.53Ad	19.50Ac	30.83Ab	66.50Aa	0.32Ab	0.35Aab	0.37Aab	0.41Aa
	35	10.71Ad	19.33Ac	30.34Ab	70.33Aa	0.31Aa	0.35Aa	0.37Aa	0.40Aa
MC	25 (CK)	18.95Ad	28.67Ac	38.00Ab	68.33Aa	0.27Ac	0.31Abc	0.33Ab	0.38Aa
	35	19.67Ad	25.83Bc	31.67Bb	48.00Ba	0.27Aa	0.28Aa	0.30Aa	0.31Ba

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间幼苗的叶面积/cm ² Leaf area of seedlings at different treatment times				不同处理时间叶片的SPAD值 SPAD value of leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	452.53Ac	953.78Ab	1030.70Ab	1738.38Aa	31.57Ac	33.80Ab
	35	450.30Ab	621.42Ba	644.72Ba	647.95Ba	30.21Aa	29.10Bb	25.00Bc	27.90Bb
CS	25 (CK)	271.14Ad	335.50Ac	366.97Ab	534.25Aa	33.53Ab	33.70Ab	37.93Aa	38.20Aa
	35	272.93Ab	278.60Bb	282.02Bb	314.16Ba	32.68Aa	24.79Bc	22.57Bd	27.07Bb
LCX	25 (CK)	156.37Ad	328.40Ac	407.45Bb	545.10Ba	36.43Ac	46.77Aa	44.70Aa	40.57Ab
	35	158.41Ad	302.58Bc	466.14Ab	686.83Aa	36.28Ac	39.53Bb	45.00Aa	43.03Aa
LCW	25 (CK)	184.76Ad	327.62Ac	454.40Ab	784.40Ba	34.67Ab	41.83Aa	42.90Aa	43.37Aa
	35	188.01Ad	303.99Bc	420.89Ab	891.45Aa	35.81Ab	41.53Aa	42.17Aa	43.30Aa
MC	25 (CK)	228.22Ac	427.47Ab	453.83Ab	910.48Aa	18.83Ab	23.40Aa	25.10Aa	25.63Aa
	35	226.41Ac	320.66Bb	342.20Bb	501.53Ba	19.63Aa	14.73Bb	9.60Bd	12.00Bc

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示同一作物不同温度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) among different temperature treatments of the same crop; 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同处理时间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$) in the same index among different treatment times.

²⁾ CF: 黑籽南瓜 *Cucurbita ficifolia* Bouché; CS: ‘春秋王2号’黄瓜 *Cucumis sativus* ‘Chunqiuwang No. 2’; LCX: ‘兴蔬’丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Xingshu’; LCW: ‘五叶香’丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Wuyexiang’; MC: ‘傲美’苦瓜 *Momordica charantia* ‘Aomei’.

³⁾ R: 高温处理5 d后将温度恢复至25 °C再处理5 d Retreated by temperature recovered to 25 °C for 5 d after treated by high temperature for 5 d.

由表2还可以看出:与处理0 d相比,根际高温胁迫处理3和5 d及恢复5 d后黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜叶片的光合参数均显著下降,其他3种瓜类作物,特别是2种丝瓜的大部分光合参数下降幅度较小,且有少部分参数升高。

2.3 根际高温对5种瓜类作物叶片叶绿素荧光参数的影响

经根际高温(35 °C)胁迫处理后5种瓜类作物叶片的叶绿素荧光参数变化见表3。由表3可见:黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜及‘傲美’苦瓜PS II的光能捕获效率(F_v'/F_m')和实际光化学效率(Φ_{PSII})以及实际光化学量子产量(Yield)和表观光合电子传递速率(ETR)在高温处理期间及恢复期间均显著低于对照

(处理3 d后‘傲美’苦瓜的 F_v'/F_m' 除外);高温处理3 d后‘兴蔬’丝瓜的上述参数均显著低于对照,但恢复5 d后则高于对照且 F_v'/F_m' 和ETR与对照差异显著;高温处理3 d后‘五叶香’丝瓜的 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 均显著高于对照而Yield和ETR则显著低于对照,高温处理5 d后其 F_v'/F_m' 和 Φ_{PSII} 略高于对照而Yield和ETR却显著高于对照,恢复5 d后其 F_v'/F_m' 显著高于对照,但 Φ_{PSII} 与对照持平,而Yield和ETR则略高于对照。高温处理3和5 d后,黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜及‘傲美’苦瓜的光化学猝灭系数(qP)均显著低于对照,而非光化学猝灭系数(qN)总体上显著高于对照;‘五叶香’丝瓜的 qP 在高温处理3 d后显著低于对照,在高温处理5 d后则显著高于对照,而

表2 根际高温对5种瓜类作物叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)的影响¹⁾Table 2 Effect of high temperature in rhizosphere on net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO₂ concentration (Ci) and transpiration rate (Tr) of leaf of five cucurbit crops¹⁾

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间叶片的 Pn 值/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Pn value of leaf at different treatment times				不同处理时间叶片的 Gs 值/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Gs value of leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	18.61Aa	18.62Aa	16.72Ac	17.62Ab	0.61Ab	0.61Ab
	35	18.62Aa	10.59Bb	2.34Bd	3.12Bc	0.62Aa	0.09Bb	0.04Bc	0.04Bc
CS	25 (CK)	17.58Aa	17.91Aa	16.21Aa	14.57Aa	0.49Ab	0.48Ab	0.60Aa	0.34Ac
	35	17.62Aa	4.17Bb	1.60Bb	1.51Bb	0.48Aa	0.06Bb	0.04Bb	0.03Bb
LCX	25 (CK)	16.80Aa	16.79Aa	16.45Ba	16.49Aa	0.48Ac	0.48Ac	0.56Aa	0.54Ab
	35	16.81Ab	14.87Bd	17.71Aa	16.54Ac	0.47Ab	0.40Bd	0.43Bc	0.53Aa
LCW	25 (CK)	15.43Ab	15.40Ab	17.73Aa	18.27Ba	0.71Aa	0.70Aa	0.55Ac	0.62Ab
	35	15.51Ab	13.47Bc	18.50Aa	19.14Aa	0.71Aa	0.51Bc	0.48Bc	0.58Bb
MC	25 (CK)	15.76Aa	15.70Aa	15.59Aa	16.76Aa	0.46Ab	0.46Ab	0.35Ac	0.54Aa
	35	15.72Aa	14.16Bb	8.53Bd	11.43Bc	0.45Aa	0.43Bb	0.16Bd	0.41Bc

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间叶片的 Ci 值/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ Ci value of leaf at different treatment times				不同处理时间叶片的 Tr 值/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Tr value of leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	304.66Ac	305.06Ac	319.62Ab	362.06Aa	11.38Aa	11.47Aa
	35	302.01Aa	287.20Bb	178.58Bd	259.72Bc	11.30Aa	3.34Bb	1.37Bc	2.99Bb
CS	25 (CK)	310.07Ab	309.07Ab	321.91Aa	295.98Ac	10.78Aa	11.18Aa	11.03Aa	7.52Ab
	35	311.67Aa	227.03Bd	241.42Bc	288.15Bb	10.41Aa	2.09Bb	1.95Bb	1.08Bc
LCX	25 (CK)	298.48Ac	299.45Bc	318.15Ab	333.78Aa	9.87Ab	9.88Ab	12.23Aa	9.08Ab
	35	296.07Ac	316.30Ab	294.87Bd	326.05Ba	9.84Ab	11.81Aa	10.47Bab	7.13Ac
LCW	25 (CK)	320.43Ab	323.93Bb	312.97Ac	337.81Aa	11.26Aa	11.30Aa	11.37Aa	7.05Bb
	35	321.20Ab	330.02Aa	301.15Bc	323.79Bab	11.35Aa	9.31Bc	10.54Ab	9.13Ac
MC	25 (CK)	302.18Ab	300.41Ab	296.72Ac	318.13Aa	9.54Aa	9.53Aa	8.70Ab	7.44Ac
	35	303.36Ab	304.89Ab	269.09Bc	312.21Ba	9.50Ab	10.11Aa	4.47Bc	3.62Bd

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示同一作物不同温度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) among different temperature treatments of the same crop; 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同处理时间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$) in the same index among different treatment times.

²⁾ CF: 黑籽南瓜 *Cucurbita ficifolia* Bouché; CS: ‘春秋王2号’黄瓜 *Cucumis sativus* ‘Chunqiuwang No. 2’; LCX: ‘兴蔬’丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Xingshu’; LCW: ‘五叶香’丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Wuyexiang’; MC: ‘傲美’苦瓜 *Momordica charantia* ‘Aomei’.

³⁾ R: 高温处理5 d后将温度恢复至25 °C再处理5 d Retreated by temperature recovered to 25 °C for 5 d after treated by high temperature for 5 d.

其 qN 在高温处理期间及恢复期均低于对照; ‘兴蔬’丝瓜的 qP 在高温处理期间均低于对照、恢复5 d后显著高于对照, 而其 qN 在高温处理3 d后显著高于对照并在恢复5 d后降至对照水平。

由表3还可见: 与处理0 d相比, 根际高温胁迫处理期间和恢复期间黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜、‘兴蔬’丝瓜和‘傲美’苦瓜叶片的大部分叶绿素荧光参数均显著降低 (qN 除外), 而‘五叶香’丝瓜的叶绿素荧光参数则有所升高 (qN 除外)。

2.4 根际高温对5种瓜类作物叶片PS II吸收光能分配比例的影响

经根际高温(35 °C)胁迫处理后5种瓜类作物叶

片PS II吸收光能分配比例的变化见表4。由表4可以看出: 与对照相比, 高温处理期间和恢复期间, 黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜叶片PS II用于光化学反应的能量比例(P)显著低于对照, 而用于天线色素热耗散的能量比例(D)和用于非光化学反应耗散的能量比例(E)却显著高于对照, 仅恢复5 d后黑籽南瓜的E值显著低于对照。‘傲美’苦瓜叶片的P值和E值在高温处理3 d后均高于对照而在高温处理5 d和恢复5 d后却均低于或显著低于对照, 仅恢复5 d后其E值显著高于对照; ‘傲美’苦瓜叶片的D值在高温处理3 d后显著低于对照而在高温处理5 d和恢复5 d后均显著高于对照。‘兴蔬’丝瓜叶片的P值在高温

表 3 根际高温对 5 种瓜类作物叶片叶绿素荧光参数的影响¹⁾Table 3 Effect of high temperature in rhizosphere on chlorophyll fluorescence parameters of leaf of five cucurbit crops¹⁾

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间叶片 PS II 的光能捕获效率 Excitation energy capture efficiency of PS II in leaf at different treatment times				不同处理时间叶片 PS II 的实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II in leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	0.64Aa	0.63Aa	0.57Ab	0.56Ab	0.59Aa	0.58Aa
	35	0.64Aa	0.47Bb	0.44Bb	0.47Bb	0.56Aa	0.42Bb	0.30Bc	0.39Bb
CS	25 (CK)	0.63Aa	0.64Aa	0.55Ab	0.50Ac	0.58Aa	0.58Aa	0.46Ac	0.50Ab
	35	0.63Aa	0.52Bb	0.47Bc	0.40Bd	0.58Aa	0.44Bb	0.34Bc	0.33Bc
LCX	25 (CK)	0.60Aa	0.57Ab	0.48Ac	0.41Bd	0.56Aa	0.54Aa	0.33Ab	0.34Ab
	35	0.60Aa	0.46Bc	0.49Ab	0.45Ac	0.56Aa	0.40Bb	0.25Bc	0.38Ab
LCW	25 (CK)	0.50Ac	0.54Bb	0.53Ab	0.57Ba	0.44Ac	0.41Bd	0.49Ab	0.54Aa
	35	0.50Ad	0.57Ab	0.54Ac	0.59Aa	0.43Ac	0.52Aab	0.50Ab	0.54Aa
MC	25 (CK)	0.58Aa	0.51Bb	0.60Aa	0.51Ab	0.52Aa	0.51Aa	0.54Aa	0.46Ab
	35	0.58Aa	0.56Aa	0.46Bb	0.46Bb	0.52Aa	0.46Bb	0.35Bd	0.40Bc

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间叶片的实际光化学量子产量 Actual photochemical quantum yield of leaf at different treatment times				不同处理时间叶片的表观光合电子传递速率 Apparent photosynthetic electron transport rate of leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	0.59Aa	0.58Aa	0.51Ab	0.48Ab	124.00Aa	123.90Aa
	35	0.59Aa	0.45Bb	0.30Bc	0.43Bb	123.00Aa	94.29Bb	62.58Bd	86.10Bc
CS	25 (CK)	0.58Aa	0.59Aa	0.47Ab	0.48Ab	122.33Aa	122.35Aa	97.44Ac	103.85Ab
	35	0.59Aa	0.48Bb	0.33Bc	0.34Bc	122.33Aa	100.17Bb	68.99Bc	70.14Bc
LCX	25 (CK)	0.54Aa	0.55Aa	0.36Ab	0.35Ab	114.35Aa	114.24Aa	75.29Ab	67.10Bc
	35	0.54Aa	0.38Bb	0.25Bc	0.38Ab	114.35Aa	79.17Bb	51.98Bc	79.70Ab
LCW	25 (CK)	0.41Ac	0.49Ab	0.41Bc	0.54Aa	86.31Ac	102.59Ab	86.10Bc	112.88Aa
	35	0.41Ac	0.47Bb	0.54Aa	0.55Aa	86.31Ac	98.46Bb	113.93Aa	114.87Aa
MC	25 (CK)	0.50Ab	0.49Ab	0.56Aa	0.48Ab	104.16Ab	102.06Ab	117.71Aa	103.11Ab
	35	0.50Aa	0.46Bb	0.35Bd	0.40Bc	103.90Aa	97.55Bb	73.82Bd	84.42Bc

作物 ²⁾ Crop ²⁾	处理温度/°C Treatment temperature	不同处理时间叶片的光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient of leaf at different treatment times				不同处理时间叶片的非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient of leaf at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ³⁾	0 d	3 d	5 d	R ³⁾
		CF	25 (CK)	0.92Aa	0.91Ab	0.92Aa	0.90Ab	0.89Ac	0.88Bc
	35	0.92Aa	0.85Bc	0.65Bd	0.91Ab	0.88Ad	0.94Ac	0.97Aa	0.95Ab
CS	25 (CK)	0.91Ab	0.92Ab	0.84Ac	0.98Aa	0.87Ab	0.86Bb	0.94Ba	0.95Ba
	35	0.91Aa	0.82Bb	0.64Bc	0.89Ba	0.88Ac	0.95Ab	0.96Aab	0.97Aa
LCX	25 (CK)	0.91Aa	0.89Aa	0.86Ab	0.82Bc	0.90Ac	0.89Bc	0.96Aa	0.92Ab
	35	0.90Ab	0.88Ac	0.82Bd	0.95Aa	0.89Ad	0.94Ab	0.96Aa	0.91Ac
LCW	25 (CK)	0.92Ac	0.94Aa	0.91Bd	0.93Ab	0.91Ac	0.91Ac	0.96Aa	0.93Ab
	35	0.92Aa	0.93Ba	0.93Aa	0.93Aa	0.92Ab	0.89Bc	0.95Aa	0.91Bb
MC	25 (CK)	0.88Aa	0.88Aa	0.83Ab	0.89Aa	0.94Aa	0.93Aa	0.94Ba	0.95Ba
	35	0.88Aa	0.85Bb	0.80Bc	0.84Bb	0.93Ac	0.95Ab	0.98Aa	0.98Aa

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示同一作物不同温度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) among different temperature treatments of the same crop; 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同处理时间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$) in the same index among different treatment times.

²⁾ CF: 黑籽南瓜 *Cucurbita ficifolia* Bouché; CS: ‘春秋王 2 号’ 黄瓜 *Cucumis sativus* ‘Chunqiuwang No. 2’; LCX: ‘兴蔬’ 丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Xingshu’; LCW: ‘五叶香’ 丝瓜 *Luffa cylindrica* ‘Wuyexiang’; MC: ‘傲美’ 苦瓜 *Momordica charantia* ‘Aomei’.

³⁾ R: 高温处理 5 d 后将温度恢复至 25 °C 再处理 5 d Retreated by temperature recovered to 25 °C for 5 d after treated by high temperature for 5 d.

表 4 根际高温对 5 种瓜类作物叶片 PS II 反应中心光能吸收分配比例的影响¹⁾Table 4 Effect of high temperature in rhizosphere on allocation fraction of light absorption of PS II reaction center in leaf of five cucurbit crops¹⁾

作物 Crop	处理温度/℃ Treatment temperature	不同处理时间用于光化学反应的能量比例 Energy fraction used for photochemical reaction at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ²⁾
		黑籽南瓜 <i>Cucurbita ficifolia</i>	25 (CK)	0.59Aa	0.58Aa
	35	0.58Aa	0.41Bc	0.29Bd	0.43Bb
‘春秋王 2 号’ 黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	25 (CK)	0.58Aa	0.58Aa	0.46Ac	0.49Ab
‘Chunqiuwang No. 2’	35	0.59Aa	0.42Bb	0.30Bd	0.36Bc
‘兴蔬’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Xingshu’	25 (CK)	0.55Aa	0.51Ab	0.42Ac	0.34Bd
	35	0.54Aa	0.40Bc	0.40Ac	0.43Ab
‘五叶香’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Wuyexiang’	25 (CK)	0.47Ac	0.50Bb	0.48Ac	0.54Ba
	35	0.48Ad	0.53Ab	0.50Ac	0.56Aa
‘傲美’ 苦瓜 <i>Momordica charantia</i> ‘Aomei’	25 (CK)	0.51Aa	0.45Ab	0.50Aa	0.45Ab
	35	0.50Aa	0.47Ab	0.37Bc	0.38Bc

作物 Crop	处理温度/℃ Treatment temperature	不同处理时间用于天线色素热耗散的能量比例 Energy fraction used for heat dissipation of antenna pigment at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ²⁾
		黑籽南瓜 <i>Cucurbita ficifolia</i>	25 (CK)	0.36Ab	0.35Bb
	35	0.36Ab	0.52Aa	0.55Aa	0.53Aa
‘春秋王 2 号’ 黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	25 (CK)	0.36Ac	0.35Bc	0.45Bb	0.49Ba
‘Chunqiuwang No. 2’	35	0.35Ad	0.48Ac	0.53Ab	0.60Aa
‘兴蔬’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Xingshu’	25 (CK)	0.39Ad	0.43Bc	0.51Ab	0.59Aa
	35	0.40Ac	0.54Aa	0.51Ab	0.55Ba
‘五叶香’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Wuyexiang’	25 (CK)	0.49Aa	0.46Ab	0.47Ab	0.42Ac
	35	0.49Aa	0.43Bc	0.46Ab	0.40Bd
‘傲美’ 苦瓜 <i>Momordica charantia</i> ‘Aomei’	25 (CK)	0.42Ab	0.49Aa	0.40Bb	0.49Ba
	35	0.43Ab	0.44Bb	0.54Aa	0.54Aa

作物 Crop	处理温度/℃ Treatment temperature	不同处理时间用于非光化学反应耗散的能量比例 Energy fraction used for dissipation of non-photochemical reaction at different treatment times			
		0 d	3 d	5 d	R ²⁾
		黑籽南瓜 <i>Cucurbita ficifolia</i>	25 (CK)	0.052Aa	0.057Ba
	35	0.056Ac	0.072Ab	0.155Aa	0.045Bc
‘春秋王 2 号’ 黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	25 (CK)	0.057Ab	0.054Bb	0.088Ba	0.011Bc
‘Chunqiuwang No. 2’	35	0.051Ac	0.093Ab	0.171Aa	0.043Ac
‘兴蔬’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Xingshu’	25 (CK)	0.058Ab	0.061Aab	0.067Bab	0.075Aa
	35	0.060Ab	0.053Bb	0.090Aa	0.023Bc
‘五叶香’ 丝瓜 <i>Luffa cylindrica</i> ‘Wuyexiang’	25 (CK)	0.041Ab	0.031Bc	0.049Aa	0.039Ab
	35	0.039Aa	0.039Aa	0.038Ba	0.040Aa
‘傲美’ 苦瓜 <i>Momordica charantia</i> ‘Aomei’	25 (CK)	0.070Ab	0.057Bc	0.102Aa	0.057Bc
	35	0.068Ab	0.093Aa	0.092Aa	0.074Ab

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示同一作物不同温度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) among different temperature treatments of the same crop; 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同处理时间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same row indicate the significant difference ($P < 0.05$) in the same index among different treatment times.

²⁾ R: 高温处理 5 d 后将温度恢复至 25 °C 再处理 5 d Retreated by temperature recovered to 25 °C for 5 d after treated by high temperature for 5 d.

处理期间均低于对照,但恢复5 d后其P值显著高于对照;‘兴蔬’丝瓜叶片的P值和E值在高温处理期间呈波动的变化趋势,或高于对照或低于对照,但在恢复5 d后其D值和E值均显著低于对照。‘五叶香’丝瓜叶片的P值在高温处理3 d后及恢复5 d后均显著高于对照,D值则显著低于对照,E值则高于或显著高于对照。

由表4还可以看出:与处理0 d相比,在根际高温胁迫处理期间和恢复期间,黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜、‘兴蔬’丝瓜和‘傲美’苦瓜叶片的P值均显著降低并呈现逐渐降低的趋势,而D值基本上显著高于对照并呈现逐渐升高的趋势;除‘傲美’苦瓜外,其他3种瓜类作物叶片的E值大体在处理5 d后达到最高值。与处理0 d相比,在根际高温胁迫处理期间和恢复期间,‘五叶香’丝瓜的P值均显著增大、D值显著减小而E值无显著差异。

3 讨论和结论

叶绿素是植物体内的主要光合色素,其含量变化与植物的生长发育密切相关^[16]。本研究中,根际高温(35℃)处理导致黑籽南瓜、‘春秋王2号’黄瓜和‘傲美’苦瓜叶片的叶绿素相对含量(SPAD)均较对照显著降低,株高、茎粗和叶面积大多也有不同程度的降低,说明35℃的根际高温处理对这3种瓜类作物的生长有抑制作用,这一结果与其他研究者^[17]的研究结果一致,究其原因可能与根系对水分和养分的吸收能力受到影响有关^[18]。高温处理5 d及恢复5 d后,2种丝瓜的株高、茎粗、叶面积及SPAD值基本上均与对照无显著差异,说明二者对根际高温具有较强的适应能力。

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程之一,可作为判断植物生长及抗逆性强弱的重要指标^[11]。逆境下引起植物光合速率降低的因素可分为气孔限制因素和非气孔限制因素2类,若气孔导度(Gs)和胞间CO₂浓度(Ci)均下降说明导致光合速率降低的是气孔限制因素,若Gs下降而Ci升高则说明导致光合速率降低的是非气孔限制因素^[19]。在高温处理及恢复期间,导致5种瓜类作物净光合速率(Pn)降低的因素明显不同,其中,黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜表现出持续的气孔限制;在高温处理3 d后‘傲美’苦瓜Pn的降低由非气孔限制因素主导,而高温处理5 d及

恢复5 d后则由气孔限制因素主导;在高温处理3 d后2种丝瓜Pn的下降主要由非气孔限制因素主导,而高温处理5 d及恢复5 d后其Pn都大于对照,说明这时2种丝瓜体内可能已经形成耐根际高温的机制,非气孔因素引起的Pn下降可能只是气孔不均匀关闭造成的Ci暂时性升高的结果^[20]。张永平^[159-60]对34℃根际高温条件下黑籽南瓜、黄瓜和苦瓜的气体交换参数变化进行了研究,其变化趋势与本研究结果基本一致。

叶绿体吸收的光能除用于光合作用外,还有一部分在形成同化力之前以热耗散的形式流失和以荧光的形式重新发射出来^[21]。根际高温处理期间,黑籽南瓜和‘春秋王2号’黄瓜PS II的光能捕获效率(F_v'/F_m')、光化学猝灭系数(qP)和PS II吸收的光能用于光化学反应的能量比例(P)降低,非光化学猝灭系数(qN)增大,说明植株叶片的捕光能力降低,用于光化学反应的能量减少,导致PS II的实际光化学效率(Φ_{psII})、实际光化学量子产量(Yield)及表观光合电子传递速率(ETR)下降,从而导致Pn降低。‘傲美’苦瓜的 F_v'/F_m' 、P值和蒸腾速率(Tr)在根际高温处理3 d后均高于对照,处理5 d后则显著低于对照,恢复5 d后虽有所回升但仍未达到对照水平,说明根际高温处理3 d后‘傲美’苦瓜通过增大叶片蒸腾速率来降低根际高温对机体的伤害,此时叶绿体对光能的捕获和利用功能还未受到明显影响,但随着胁迫时间的延长,该功能则受到一定的影响。‘兴蔬’丝瓜的 F_v'/F_m' 和P值在高温处理3 d后均显著低于对照,在高温处理5 d后 F_v'/F_m' 略高于对照且P值与对照接近,这可能与高温处理5 d时‘兴蔬’丝瓜已经启动了较强的耐热机制有关。‘五叶香’丝瓜的 F_v'/F_m' 和P值在高温处理期间以及恢复期间均大于对照,虽然高温处理3 d后其Yield、ETR及Pn均显著低于对照,但高温处理5 d后各指标均回升并高于对照,说明根际高温只是暂时抑制了‘五叶香’丝瓜叶片中光合电子的传递速率,降低了叶片的Pn,但对叶片的光能捕获和利用功能影响较小,也说明根际高温可能作为一种热激诱因^[22]诱导‘五叶香’丝瓜适应更长时间的根际高温胁迫;高温处理5 d及恢复5 d后其Pn都高于对照,这可能与‘五叶香’丝瓜在长期进化过程中形成的光呼吸保护途径有关,使其能在炎热夏季的高光强作用下依然保持较高的Pn和qP水平以及较低的qN水平;而黑籽南瓜和黄瓜主要利用交替电子流途径来应

对过剩光能^{[1]33-34}。

黑籽南瓜是一种耐冷但热敏感的作物,而黄瓜是一种喜温但不耐热的作物^[23]。本实验中,‘春秋王2号’黄瓜幼苗的Pn在高温处理3d后下降至对照的1/4,且恢复处理5d后其Pn和Tr仍持续下降;而黑籽南瓜的Pn在高温处理3d后降为对照的近1/2,且恢复处理5d后其Pn和Tr均有所回升,说明黑籽南瓜的耐根际高温能力强于‘春秋王2号’黄瓜。造成这一差异的原因是同样具有4片真叶的黑籽南瓜植株较‘春秋王2号’黄瓜植株拥有更强大的根系及较大的叶面积,有助于吸收更多的水分和养分供应地上部生长,并且能够利用较大的叶面积提高蒸腾能力以抵御高温胁迫^[24]。

综上所述,通过比较5种瓜类作物在根际高温(35℃)胁迫下植株生长及叶片光合及叶绿素荧光参数的差异,可以推断丝瓜,特别是‘五叶香’丝瓜,具有较强的耐根际高温的能力,可作为耐高温瓜类作物的砧木加以利用。

参考文献:

- [1] 张永平. 瓜类作物对温、光环境变化的响应: 光能利用与活性氧代谢[D]. 杭州: 浙江大学农业与生物技术学院, 2007.
- [2] 高俊杰. 低温胁迫和盐胁迫下嫁接黄瓜(*Cucumis sativus* L.)抗氧化的分子机制[D]. 泰安: 山东农业大学园艺科学与工程学院, 2008.
- [3] 曾义安, 朱月林, 黄保健, 等. 黑籽南瓜砧木对黄瓜生长结实、抗病性及营养元素含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(4): 15-19.
- [4] 季俊杰, 朱月林, 胡春梅, 等. 云南黑籽南瓜砧木对低温下嫁接黄瓜生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(2): 48-52.
- [5] 张健, 刘美艳, 肖炜. 丝瓜作砧木提高黄瓜耐涝性的研究[J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 85-89.
- [6] 张玉灿, 赖正锋, 张少平, 等. 丝瓜砧木对夏秋连作苦瓜产量及品质影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(4): 189-194.
- [7] MOON J H, BOO H O, JANG I O. Effect of root-zone temperature on water relations and hormone contents in cucumber [J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2007, 48(5): 257-264.
- [8] TAHIR I S A, NAKATA N, YAMAGUCHI T, et al. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(2): 141-151.
- [9] LEE S H, SINGH A P, CHUNG G C, et al. Exposure of roots of cucumber (*Cucumis sativus*) to low temperature severely reduces root pressure, hydraulic conductivity and active transport of nutrients [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 120(3): 413-420.
- [10] 张洁, 齐明芳, 李天来. 亚高温处理对番茄叶片光合作用及糖类的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 304-307.
- [11] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659-668.
- [12] 王春萍, 雷开荣, 李正国, 等. 低温胁迫对水稻幼苗不同叶龄叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 38-43.
- [13] 辛苗, 杜相革, 朱晓清. 不同氮水平对黄瓜蚜虫生长发育的影响[J]. 植物保护学报, 2010, 37(5): 408-412.
- [14] 苑克俊, 刘庆忠, 李圣龙, 等. 利用数码相机测定果树叶面积的新方法[J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 829-832.
- [15] 周艳虹, 黄黎锋, 喻景权. 持续低温弱光对黄瓜叶片气体交换、叶绿素荧光猝灭和吸收光能分配的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(2): 153-160.
- [16] 李保印, 周秀梅, 王西波, 等. 不同彩叶植物叶片中叶绿体色素含量研究[J]. 河南农业大学学报, 2004, 38(3): 285-288.
- [17] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258-2264.
- [18] 冯玉龙, 刘恩举, 孙国斌. 根系温度对植物的影响(I)——根际温度对植物生长及光合作用的影响[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(3): 63-69.
- [19] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [20] 许大全. 气孔的不均匀关闭与光合作用的非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 246-252.
- [21] 林达定, 张国防, 于静波, 等. 芳樟不同无性系叶片光合色素含量及叶绿素荧光参数分析[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(3): 56-61.
- [22] GONG M, CHEN B, LI Z G, et al. Heat shock induced cross adaptation to heat, chilling, drought and salt stress in maize seedling and involvement of H₂O₂ [J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158(9): 1125-1130.
- [23] ZHANG Y P, JIA F F, ZHANG X M, et al. Temperature effects on the reactive oxygen species formation and antioxidant defence in roots of two cucurbit species with contrasting root zone temperature optima [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(2): 713-720.
- [24] 水德聚, 石瑜, 曹亮亮, 等. 外源水杨酸预处理对高温胁迫下白菜耐热性和光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2012, 48(4): 386-392.

(责任编辑: 佟金凤)