

亚高温下不同空气湿度对番茄光合作用和物质积累的影响^{*}

张宇^{1,2} 宋敏丽^{1**} 李利平¹

(¹山西农业大学园艺学院, 山西太谷 030801; ²晋中职业技术学院, 山西晋中 030600)

摘 要 为了研究亚高温下不同空气湿度对番茄植株光合作用及物质积累的影响, 本试验利用人工气候室, 在 11:00—15:00 平均温度为 33 ℃ 的亚高温条件下, 设置 3 个空气相对湿度处理, 分别为 70%~80% (高湿)、50%~60% (中湿) 和不加湿的 30%~40% (低湿)。结果表明: 在处理 25 d 时, 高湿处理番茄叶片叶绿素含量、净光合速率显著高于低湿处理, 而低湿处理果实空洞率比高湿处理高 18.4% ($P<0.05$); 在 33 ℃ 亚高温条件下, 70%~80% 的相对湿度有利于光合作用的增强和果实品质的提高。

关键词 番茄; 亚高温; 湿度; 光合作用; 物质积累

中图分类号 S626.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)2-0342-06

Effects of air humidity on tomato plant photosynthesis and dry matter accumulation at sub-high temperature. ZHANG Yu^{1,2}, SONG Min-li^{1**}, LI Li-ping¹ (¹College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; ²Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong 030600, Shanxi, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 342–347.

Abstract: An experiment with growth chambers was conducted to study the effects of air relative humidity (RH) on the photosynthesis and dry matter accumulation of tomato plant at 33 ℃ from 11:00 to 15:00. Three treatments were installed, i. e., 70%–80% (high RH), 50%–60% (medium RH), and 30%–40% (low RH, control). After treated for 25 days, the tomato leaf chlorophyll content and net photosynthetic rate in treatment high RH were significantly higher than those in treatment low RH, while the empty rate of tomato in treatment low RH was 18.4% higher than that in high treatment RH ($P<0.05$), suggesting that at sub-high temperature 33 ℃, 70%–80% air relative humidity could benefit the improvement of tomato photosynthesis and fruit quality.

Key words: tomato; sub-high temperature; air humidity; photosynthesis; dry matter accumulation.

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)是中国设施栽培主要作物之一(张洁等, 2007), 也是全世界种植面积和消费量居前的一种主要蔬菜(丁云华, 2003)。番茄在生长的过程中, 经常会遇到高温逆境的危害, 为了减少高温危害, 常采用耐高温品种、遮阴、嫁接和空气湿度控制(Bertin *et al.*, 2000; 毛胜利等, 2001; 刘贤赵和康绍忠, 2002)。目前, 常用的温室降温措施主要有遮阴、间接喷雾等(王本根等, 2004), 通过喷雾措施, 不仅降低了室内温度, 而且

增加了室内的空气相对湿度。Peet 等(2003)研究了不同空气相对湿度下对番茄开花坐果的影响, 但研究中昼夜保持相同的空气湿度, 与植物自然环境不同。本试验在高温干燥时段进行喷雾, 从亚高温下不同空气湿度对日光温室番茄光合作用的影响入手, 研究番茄植株光合作用和物质积累的变化, 为设施番茄栽培中进行环境调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验处理

试验于 2009 年 2—6 月在山西省太谷县(37°25'N, 112°25'E), 山西农业大学设施农业工程研究

^{*} 山西省科技攻关项目(041018-2)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: smlee@126.com

收稿日期: 2011-07-25 接受日期: 2011-11-14

中心的非对称三连跨温室(温祥珍和李亚灵,2003)内进行。温室内安装有3个自然光照人工生长箱(长、宽、高分别为120 cm、200 cm、150 cm),每个生长箱内均装有温湿度传感器,可通过JCJ900C智能温湿度控制器对温湿度进行自动记录。试验于2009年春季于温室中穴盘基质育苗。育苗基质为蛭石和农家肥,比例为4:1。待子叶平展后开始浇灌营养液,每日一次。营养液的pH为5.5~6.5。待幼苗长至两叶一心时,选择长势整齐一致的幼苗移植到23 cm×17 cm高花盆中,育苗基质为蛭石:炉渣:腐熟有机肥=5:4:1,并用百菌清进行消毒。

试验于2009年5月6日开始,对番茄(品种为荷兰温室专用品种“Counter”)进行亚高温条件下不同湿度的处理,用加湿器提高空气湿度,空调机控制箱内温度。人工气候箱的温度设定为33℃/20℃(昼/夜),湿度分别设定为高湿(70%~80%)、中湿(50%~60%)、低湿(30%~40%),每个处理重复3次。每日于11:00—15:00进行湿度处理。试验测得的数据用SAS软件进行处理。

1.2 测定项目与方法

光合作用指标测定:采用LI-6400型光合测定仪于亚高温下不同湿度处理后的第7、12、16、21、25天10:00—11:00,分别测定各处理番茄植株第2花序下第1片叶的净光合速率(P_n)、细胞间隙CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)等光合作用指标,并根据 $L_s=1-C_i/C_a$ (C_a 为空气中CO₂浓度)计算叶片气孔限制值(L_s)。

叶绿素含量测定:采用乙醇提取比色法。取新鲜番茄叶片,每个处理称取剪碎的新鲜样品0.5 g共3份,分别放入研钵中,加少量石英砂及95%乙醇2~3 mL,研磨成匀浆,再加95%乙醇10 mL,继续研磨至组织变白,静置3~5 min。取上清液,用乙醇定容至50 mL,摇匀。把叶绿体色素提取液倒入光径1 cm的比色杯内。以95%乙醇为空白,用722分光光度计,在波长665、649、470 nm下测定吸光度(邹琦,1995)。

干物质积累测定:每个处理分别于7、12、16、25 d选择3株番茄植株,连根拔起,轻轻去掉根部的土壤,防止损害番茄植株的根部。然后用水轻轻冲洗干净,放在阴凉处阴干,用剪刀分别剪下根、茎、叶、果实,装入牛皮纸袋中,放入100℃的烘干箱中杀青20 min,60℃通风烘干至恒重。用千分之一的电子天平测量根、茎、叶、果实的重量,重复3次。

有机酸与可溶性糖测定:当番茄果实成熟时将果实打成匀浆后测定有机酸与可溶性糖含量,计算糖酸比,同时记录每一花序果实空洞比率。

1.3 数据分析

试验所得数据使用DPS软件进行统计分析,采用Duncan检验进行显著性差异分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 亚高温下不同空气湿度对叶绿素含量的影响

从表1可以看出,番茄叶片中的光合色素主要为叶绿素a,叶绿素b含量较低。在亚高温条件下,

表1 亚高温下不同空气湿度对番茄叶绿素含量的影响
Table 1 Effects of different air humidity on chlorophyll content of tomato under sub-high temperature

天数	处理	叶绿素 a(mg · g ⁻¹)	叶绿素 b(mg · g ⁻¹)	叶绿素 a+b	叶绿素 a/b
7	低湿	8.35±1.16 b	3.34±0.25 a	11.69±1.41 b	2.50 a
	中湿	8.52±1.23 b	3.23±0.17 a	11.75±1.40 b	2.64 a
	高湿	11.28±0.98 a	4.06±0.34 a	15.34±1.32 a	2.78 a
12	低湿	8.44±1.25 b	3.53±0.33 a	11.97±1.58 b	2.40 a
	中湿	8.78±1.19 b	3.25±0.24 a	12.03±1.43 b	2.70 a
	高湿	11.30±1.75 a	4.07±0.26 a	15.37±2.01 a	2.78 a
16	低湿	7.19±1.11 b	3.04±0.21 a	10.23±1.32 b	2.37 a
	中湿	8.53±1.01 b	3.20±0.30 a	11.73±1.31 b	2.67 a
	高湿	11.29±1.39 a	4.05±0.13 a	15.34±1.52 a	2.79 a
21	低湿	5.78±0.69 c	2.91±0.19 b	8.69±0.88 c	1.99 b
	中湿	8.11±1.28 b	3.17±0.16 ab	11.28±1.44 b	2.56 a
	高湿	11.26±1.21 a	4.05±0.16 a	15.31±1.37 a	2.78 a
25	低湿	4.15±0.56 c	2.67±0.11 b	6.82±0.67 c	1.55 b
	中湿	7.6±1.21 b	3.12±0.21 ab	10.72±1.42 b	2.44 a
	高湿	11.22±1.58 a	4.04±0.39 a	15.26±1.97 a	2.78 a

同一测定日期系列中不同字母表示差异达到5%显著水平。下同。

低湿和中湿处理 12 d 以内,叶绿素含量均增加,此后,叶绿素的含量随着处理时间的延长而下降。处理 16 d 时,低湿处理叶绿素 a 与叶绿素 (a+b) 显著低于高湿处理,低湿处理与中湿处理差异不显著。处理 25 d 后,低湿处理叶绿素各项含量均显著低于高湿处理,低湿、中湿处理叶绿素 a 分别比高湿处理低 63%、32%。其中对叶绿素 a 的影响大,而对叶绿素 b 的影响小,导致叶绿素 a/b 下降。

2.2 亚高温下不同空气湿度对番茄 P_n 影响

由图 1 可以看出,随着处理天数的变化,不同湿度处理的 P_n 的变化与叶绿素的变化基本一致,在处理 12 d 内,各处理叶片的 P_n 上升,12 d 以后, P_n 逐渐下降,但是高湿处理的 P_n 在处理阶段内都显著高于低湿处理。从不同湿度处理看,亚高温下随着处理时间的延长降低了 P_n ,湿度越低, P_n 越小。在 16 d 时,中、低湿处理分别较高湿处理低 29%、48%,在处理 25 d 时,中、低湿处理分别较高湿处理低 21%、36%。

2.3 亚高温下不同空气湿度对番茄 G_s 、 C_i 、 L_s 、 T_r 的影响

由表 2 可以看出,亚高温下不同空气湿度对番茄 G_s 、 C_i 、 L_s 的影响。 G_s 、 C_i 各处理变化趋势基本一致,在处理 12 d 时, G_s 、 C_i 达到最高值,高湿处理与低湿处理差异显著。而后随着亚高温处理时间的延长,在 16 d 时, G_s 、 C_i 有所下降,而后又出现增加趋势。同一时间处理下,低湿处理明显低于高湿处理。 L_s 与 G_s 、 C_i 的变化成反比,在同一时间处理不同湿度处理中, G_s 、 C_i 升高,而 L_s 降低。 T_r 在高温干燥时,随

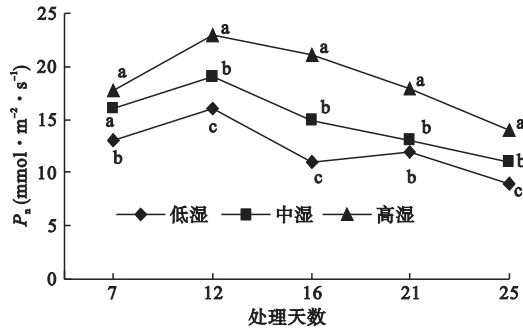


图 1 亚高温下不同空气湿度对番茄叶片净光合速率的影响

Fig.1 Effects of different air humidity on net photosynthetic of tomato leaves under sub-high temperature

着湿度的增加,植株不但没有减少蒸腾,反而有较高的蒸腾速率,高湿的 T_r 显著高于其他两个处理,在处理 25 d 时高湿高于中湿、低湿 57%、97%,中湿与低湿差异不显著。

2.4 亚高温下不同空气湿度对番茄植株干物质积累的影响

从表 3 可以看出,各处理植株的根、茎、叶的变化趋势基本一致,随着处理湿度的增加,干物质积累有所增加。其中对根部干物质积累影响较大,处理 25 d 时,低湿处理比高湿处理降低 8.7%。果实是中湿处理明显大于高湿处理处理,低湿处理介于二者之间。

2.5 亚高温下不同空气湿度对番茄生育进程和果实质量的影响

亚高温下空气湿度增加降低了番茄植株的生育进程。从表4可以看出,各处理果实发育过程中鲜

表 2 亚高温下不同空气湿度对番茄叶片 G_s 、 C_i 、 L_s 、 T_r 的影响

Table 2 Effects of different air humidity on G_s , C_i , T_r and L_s of tomato leaves under sub-high temperature

天数	处理	G_s ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	L_s
7	低湿	0.17±0.01 a	154±7.69 b	2.36±0.09 a	0.601 a
	中湿	0.21±0.01 a	171±6.78 a	2.57±0.08 a	0.502 a
	高湿	0.26±0.01 a	162±10.32 a	3.28±0.12 a	0.522 a
12	低湿	0.53±0.03 c	307±13.24 c	2.74±0.16 b	0.278 a
	中湿	0.78±0.03 b	351±16.72 b	3.05±0.11 b	0.234 a
	高湿	1.36±0.03 a	401±12.43 a	4.13±0.20 a	0.151 b
16	低湿	0.15±0.01 b	237±10.62 b	3.51±0.14 b	0.423 a
	中湿	0.20±0.01 a	253±14.33 a	4.18±0.10 b	0.403 a
	高湿	0.22±0.01 a	267±9.76 a	6.47±0.43 a	0.395 a
21	低湿	0.16±0.01 b	189±8.97 c	3.68±0.17 b	0.517 a
	中湿	0.21±0.01 a	203±10.86 b	4.53±0.07 b	0.561 a
	高湿	0.23±0.01 a	230±10.42 a	7.46±0.19 a	0.281 b
25	低湿	0.20±0.02 a	201±9.68 b	4.06±0.20 b	0.560 a
	中湿	0.23±0.02 a	264±12.11 a	5.08±0.15 b	0.413 a
	高湿	0.26±0.01 a	282±11.37 a	7.98±0.35 a	0.297 b

表 3 亚高温下不同空气湿度对番茄干物质积累的影响

Table 3 Effects of different air humidity on amount of dry matter of tomato plant under sub-high temperature

天数	处理	根 (g)	茎 (g)	叶 (g)	果实 (g)	总计 (g)
7	低湿	1.23±0.06 b	9.11±0.57 a	25.31±0.85 b	1.09±0.11 b	36.74±1.59 b
	中湿	1.30±0.19 a	11.02±0.11 a	27.61±0.31 a	2.08±0.20 a	42.01±1.81 a
	高湿	1.35±0.23 a	10.13±0.95 a	28.31±1.16 a	1.15±0.18 b	40.94±1.52 a
12	低湿	1.58±0.22 b	12.87±1.09 b	34.19±0.13 c	4.56±0.34 b	53.20±1.78 b
	中湿	1.74±0.31 a	14.03±0.98 a	40.78±0.87 b	5.48±0.43 a	62.03±1.59 a
	高湿	1.81±0.35 a	14.68±0.31 a	43.26±1.28 a	4.31±0.31 b	64.06±1.25 a
16	低湿	1.87±0.18 b	15.36±1.42 b	44.53±1.08 b	12.67±0.93 a	74.43±1.61 b
	中湿	2.04±0.19 a	17.14±1.57 a	48.67±1.68 a	11.69±0.50 a	79.54±2.94 a
	高湿	2.10±0.30 a	17.34±1.28 a	50.72±1.19 a	11.09±1.01 a	81.25±2.78 a
25	低湿	2.08±0.29 a	19.48±1.76 a	55.46±1.95 b	22.64±0.68 a	99.66±2.68 b
	中湿	2.21±0.12 a	20.25±1.84 a	57.64±1.39 a	24.37±1.83 a	104.47±2.18 a
	高湿	2.29±0.21 a	20.73±1.15 a	58.39±1.87 a	17.32±1.51 b	98.73±2.74 b

表 4 亚高温下不同空气湿度对番茄第 1 花序平均单果质量变化的影响

Table 4 Effects of different air humidity on the development of tomato fruits under sub-high temperature

湿度	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d	52 d	56 d	62 d
低湿	25.1±1.3	55.6±1.2	87.4±3.6	98.4±3.6	131.5±9.1	204.1±10.1		
中湿	23.9±1.0	59.6±1.5	89.3±3.0	103.2±5.1	165.4±10.2		212.0±9.1	
高湿	18.5±0.6	46.7±1.0	65.3±2.3	89.3±3.1	124.7±8.2			211.6±8.3

质量变化,低湿处理果实前期发育较快,比高湿处理提早 10 d 成熟,生育期缩短。中湿处理比高湿处理提早 6 d 成熟。

如图 2、图 3 所示,亚高温下湿度降低,果实的品质变差,着色不良,颜色变黄,发生大量的空洞果,含糖量降低,酸含量增加,糖酸比下降,处理湿度越低越严重。低湿处理果实空洞率与高湿处理存在显著差异,达 68.5%,比高湿处理高 18.4%;低湿处理果实糖酸比 5.3,比高湿处理降低 2.8;中湿处理介于二者之间。

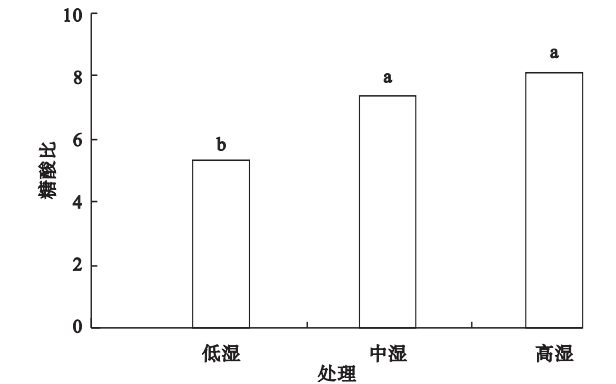


图 2 亚高温下不同空气湿度对番茄糖酸比的影响
Fig.2 Effects of different air humidity on the ratio of sugar and acid of tomato fruits under sub-high temperature

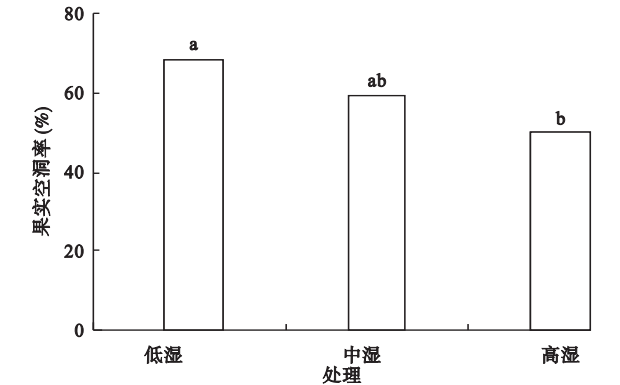


图 3 亚高温下不同空气湿度对番茄果实空洞率的影响
Fig.3 Effects of different air humidity on the empty rate of tomato fruits under sub-high temperature

3 讨 论

3.1 亚高温下空气湿度对番茄植株光合作用的影响

光合作用是植物物质生产的基础,水分胁迫直接影响植物的光合作用,通常是通过两方面进行影响:一方面直接影响光合机构与活性。另一方面通过影响植物体中其他生理生化过程间接影响光合作用。有研究表明,30℃以上的高温,番茄叶片的光合速率随温度上升而逐渐降低(丁兆堂等,2003),

而高温胁迫产生的同时往往伴随空气相对湿度的降低(刘东焕等,2002)。在本研究中,33℃亚高温条件下,低湿处理生长期内的空气相对湿度为30%~40%,当相对湿度达到50%~60%时,番茄叶片的净光合速率有所提高,但效果不显著,继续加湿使空气相对湿度达高湿处理70%~80%,净光合速率得到显著增加。

引起光合速率降低的原因是属气孔限制还是非气孔限制有许多不同的结论。早期研究认为,光合速率的降低是由于叶片的 G_s 下降,使叶绿体内 CO_2 的供应受阻,属于气孔限制引起的(张洁等,2005a,2005b)。但许大全和沈允刚(1998)研究认为,高温对光合作用的抑制是由非气孔因素引起的,是叶肉细胞气体扩散阻抗增加、 CO_2 溶解度下降、Rubisco对 CO_2 的亲和力降低等原因所致。本试验表明,在亚高温条件下,处理12d后,番茄叶片的 P_n 逐渐下降,同时伴随着 G_s 、 C_i 不同程度的增加, L_s 的明显降低,认为较长时间亚高温条件下不同湿度处理 P_n 的降低可能是由于非气孔因素的限制作用,这与王艳芳等(2010)的结论不尽一致,可能是由于环境差异所致。

Ivakin(1981)认为不同番茄品种在高温处理下,光合作用都稍有下降,叶绿素含量的变化趋势与光合作用基本相同。侯兴亮等(1999)认为,番茄叶片叶绿素含量的多少直接影响到光合作用的强弱,本试验结果对此进行了进一步的证实。

在本试验中,亚高温、高湿条件促进了气孔开放,蒸腾速率显著增加,叶片散失更多的热量,减缓叶温的升高,从而减小了高温对叶肉细胞光合能力的影响(薛义霞等,2010),有效地缓解高温对光合作用的不良影响,而低湿不利于植株的光合作用,植株不能有效地利用光能(王艳芳等,2010)。

3.2 亚高温下不同空气湿度对番茄生育进程和果实品质的影响

郭建平和高素华(2002)指出,高温胁迫可使农作物生育进程加快,生育期缩短。潘瑞炽和董愚得(1979)也指出,高温加快作物的出叶速度,生育期缩短。长期35℃的昼间亚高温的处理下,番茄植株徒长,叶片变薄,出现早衰现象,番茄植株相对生长速率降低、净同化率减小,影响同化产物在体内的运输及代谢,缩短了植株生育期,提早果实发育(张洁等,2005b)。在本试验中,由于湿度的增加,生育期延长,果实干物质的积累高湿低于其他两个处理,可

能是果实成熟期推后所造成的。

光合作用的提高有利于植株干物质的积累和向花器官供应充足的光合产物,而光合产物主要以蔗糖的形式通过韧皮部向库器官运输,随着高温处理时间的延长,植物韧皮部内会造成胼胝体增加,堵塞维管束,从而影响同化产物在韧皮部的运输。本试验在亚高温低湿处理下,果实的糖酸比下降,可能是由于同化产物的运输受到了影响,但随着处理湿度的增加,糖酸比有所增加,推测高湿有效缓解了亚高温对番茄造成的不良影响,促进了同化产物向库器官的运输。

亚高温低湿条件下,促使植株生长和果实细胞膨大加快、光合速率下降、光合产物积累减少、物质供应不足,从而导致番茄果实空洞果比率增加,番茄果实品质降低,并且湿度越低,果实空洞率越高。这与前人的研究结果(张洁等,2007)一致。另外,亚高温条件下番茄红素受到抑制(李纪锁等,2003)。因本研究历时半年,试验结果有一定的局限性和不足,还有待于进一步深入研究。

参考文献

- 丁云华. 2003. 番茄无公害高效栽培. 北京: 金盾出版社.
- 丁兆堂, 卢育华, 徐 坤. 2003. 环境因子对番茄光合特性的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), **34**(3): 356-360.
- 郭建平, 高素华. 2002. 高温、高 CO_2 对农作物影响的试验研究. 中国生态农业学报, **10**(1): 17-20.
- 侯兴亮, 李景福, 许向阳. 1999. 番茄耐弱光的研究进展. 中国蔬菜, (4): 48-50.
- 李纪锁, 沈火林, 石正强. 2003. 番茄红素的研究进展. 中国蔬菜, (1): 58-60.
- 刘东焕, 赵世伟, 高荣孚, 等. 2002. 植物光合作用对高温的响应. 植物研究, **22**(2): 205-212.
- 刘贤赵, 康绍忠. 2002. 番茄不同生育阶段遮荫对光合作用与产量的影响. 园艺学报, **29**(5): 427-432.
- 毛胜利, 杜永臣, 王孝宣. 2001. 番茄耐热育种研究进展. 园艺学报, **28**(增刊): 655-660.
- 潘瑞炽, 董愚得. 1979. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社.
- 王本根, 苗香雯, 司慧萍, 等. 2004. 华东连栋塑料温室夏季降温效果比较研究. 农机化研究, (5): 187-189, 193.
- 王艳芳, 李亚灵, 温祥珍. 2010. 高温条件下空气湿度对番茄光合作用及生理性状的影响. 安徽农业科学, **38**(8): 3967-3968, 3981.
- 温祥珍, 李亚灵. 2003. 非对称连跨式节能温室的结构设计

与性能特点. 温室园艺, (2): 18-19.

许大全, 沈允刚. 1998. 光合作用的限制因素// 植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社: 262-276.

薛义霞, 李亚灵, 温祥珍. 2010. 空气湿度对高温下番茄光合作用及坐果率的影响. 园艺学报, **37**(3): 397-404.

张洁, 李天来, 徐晶. 2005a. 长期昼间亚高温对日光温室番茄光合作用及光合产物分配的影响. 中国蔬菜, (3): 7-10.

张洁, 李天来, 徐晶. 2005b. 昼间亚高温对日光温室番茄光合作用及物质积累的影响. 园艺学报, **32**(2): 228-233.

张洁, 李天来, 徐晶. 2007. 不同生育期亚高温处理对日光温室番茄光合物质分配及果实的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), **28**(3): 103-108.

邹琦. 1995. 植物生理生化试验指导. 北京: 中国农业出版社.

Bertin N, Guichard S, Leonardi C, *et al.* 2000. Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under mediterranean conditions, as affected by vapor pressure deficit and plant fruit loads. *Annals of Botany*, **85**: 741-750.

Ivakin AP. 1981. Effect of high temperatures on photosynthesis and content of some pigments in tomato under natural conditions. *Trudy Po Prikladnoi Botanike Genetike i Seleksii*, **71**: 70-76.

Peet MM, Sato S, Clemente C, *et al.* 2003. Heat stress increases sensitivity of pollen, fruit and production in tomatoes to non-optimal vapor pressure deficits. *Acta Horticulturae*, **618**: 209-215.

作者简介 张宇, 女, 1973年生, 讲师, 硕士, 主要从事园艺方面的研究。E-mail: zhangyu6438@163.com

责任编辑 李凤芹
