

空气湿度对高温下番茄光合作用及坐果率的影响

薛义霞^{1,2}, 李亚灵^{1,*}, 温祥珍¹

(¹ 山西农业大学园艺学院, 山西太谷 030801; ² 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041000)

摘要: 利用人工气候室, 研究了空气湿度对高温下番茄幼苗光合作用及坐果率的影响。设置 3 个空气相对湿度处理, 即 $70\% \pm 5\%$ (高湿处理)、 $55\% \pm 5\%$ (中湿处理) 和不加湿的 $40\% \sim 50\%$ 的对照 (低湿处理)。结果表明: 在 10:00 至 16:00 平均温度为 $33 \sim 43^\circ\text{C}$ 的高温条件下, 高湿处理显著促进了番茄叶片的蒸腾速率和净光合速率, 并且减轻或消除了光合“午休”, 测定日内 9:00 至 17:00 的蒸腾累积值和净光合累积值分别比对照提高了 $116\% \sim 133\%$ 和 $31\% \sim 343\%$, 坐果率显著高于低湿处理, 达到 48%; 中湿处理的净光合速率和坐果率与对照没有显著差异。表明在 30°C 以上的高温条件下, 70% 的相对湿度有利于光合作用的增强和坐果率的提高。

关键词: 番茄; 高温; 空气湿度; 光合特性; 坐果率

中图分类号: S 641.2

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2010) 03-0397-08

Effects of Air Humidity on the Photosynthesis and Fruit-set of Tomato Under High Temperature

XUE Yi-xia^{1,2}, LI Ya-ling^{1,*}, and WEN Xiang-zhen¹

(¹ College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; ² College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: The effects of air relative humidity (RH) on the photosynthesis and fruit-set of tomato seedling under high temperature were investigated in growth chambers. Three air relative humidity treatments from 10:00 to 16:00 were $70\% \pm 5\%$ (high RH), $55\% \pm 5\%$ (middle RH) and non-humidification (low RH, as control). The results showed under the high temperature (the average temperature from 10:00 to 16:00 was $33 \sim 43^\circ\text{C}$), high RH treatment significantly promoted transpiration rate and net photosynthetic rate, also decreased or eliminated the photosynthetic midday depression compared with low RH treatment. Hence, the cumulative value of transpiration and photosynthesis from 9:00 to 17:00 of high RH treatment were $116\% \sim 133\%$ and $31\% \sim 343\%$ higher than that of low RH treatment, respectively. The fruit-set rate of high RH treatment was up to 48% and significantly higher than low RH treatment. However, photosynthesis and fruit-set rate of middle RH treatment were not significantly different compared with that of low RH treatment. As a conclusion, relative humidity of 70% (high RH) improved photosynthesis and fruit-set of tomato under high temperature above 30°C .

Key words: tomato; high temperature; air relative humidity; photosynthesis characteristics; fruit-set

收稿日期: 2009 - 12 - 07; 修回日期: 2010 - 03 - 01

基金项目: 山西省科技攻关项目 (041018-2)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: yalingli@sxau.edu.cn)

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 越夏长季节栽培中经常遭遇高温逆境。为了减少高温危害, 通过采用耐高温品种、遮荫、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) 等措施取得了一定的成果, 其中在地中海地区针对结果期番茄的研究表明, 通过喷雾使空气相对湿度从 55% 增加到 70%, 会提高夏季温室番茄的产量和品质 (Bertin et al., 2000)。我国北方夏季温室内除经常会出现 35~45℃ 高温外, 空气相对湿度还比较低, 有时甚至低于 30%, 高温干燥成为温室生产经常会遇到的问题 (闫杰 等, 2004)。

对甜菜和小麦 (许大全, 2002) 的研究表明, 夏季中午喷雾能增加空气湿度, 提高叶片的气孔导度和净光合速率。而较高的光合作用强度有利于番茄向花器官中供应充足的光合产物, 从而有利于保证正常的开花坐果 (毛胜利 等, 2005)。Peet 等 (2003) 研究了 30%、60% 和 90% 的空气相对湿度对番茄开花坐果的影响, 认为在昼夜温度为 31/25℃ 的高温条件下, 适宜的空气相对湿度为 50% (对应的 VPD, 即水汽压亏缺为 2.25 kPa), 但研究中昼夜保持相同的空气湿度, 与植物自然生长环境不同。为此, 本试验中采用高温干燥时段喷雾的措施, 研究高温下空气湿度对番茄叶片光合作用及坐果率的影响, 以期为夏季温室番茄的环境管理提供理论支持和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007—2008 年在山西农业大学设施农业工程中心的非对称三连栋温室内进行。在温室内自行设计了自然光照气候室, 长、宽、高分别为 120、90 和 150 cm。用超声波加湿器提高空气湿度, 空调机控制箱内温度。设 3 个空气相对湿度 (RH) 处理: 70%±5% 高湿处理, 55%±5% 中湿处理, 以 40%~50% 不加湿 (低湿处理) 为对照, 每天 10:00—16:00 进行温度、湿度控制。JCJ600B 智能温湿度控制系统根据试验设定要求自动打开或关闭加湿器和空调机, 使相对湿度稳定在设定水平。阴雨天不进行控制, 但照常记录植株生长环境的温湿度。

栽培基质配比为蛭石: 田园土: 腐熟有机肥=1:1:1。试验 1 采用寿光先正达公司育成的耐热番茄品种 ‘特宝’, 于 2007 年 8 月 21 日幼苗 5 叶 1 心 (苗龄 35 d) 时开始处理, 至 9 月 10 日结束, 共计 21 d。试验 2 采用台湾亚洲蔬菜研究发展中心育成的耐热品种 ‘260’, 于 2008 年 4 月 24 日幼苗现蕾 (苗龄 67 d) 时开始处理, 至 5 月 7 日结束, 共计 14 d。温度的控制在试验 1 中不设上限, 使温度上升到自然高温, 在试验 2 中最高温度控制在 40℃。

1.2 测定方法

1.2.1 光合作用指标测定

采用 CI-301PS 光合测定仪 (CID, Inc, 美国), 测定番茄叶片的光合作用日变化, 包括净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 等光合作用相关指标。气孔限制值 (L_s) 根据 $L_s=1-C_i/C_a$ (C_a 为空气中 CO_2 浓度) 计算。

试验 1 在处理 3 d 时测定植株上从上往下数第 3 片叶的光合作用; 试验 2 分别在处理 7 d 和 14 d 时测定第 1 花序下第 2 片叶的光合作用, 每片叶读取 3 次数值, 每个处理测定 4 株。测定采用往返法, 即从 9:00 至 17:00, 每隔 2 h 整点前后各进行 1 次测定, 两次测定顺序相反, 取平均值以消除时间误差, 作为整点时间的数据。按照梁宇等 (2001) 的方法, 将每天测得的叶片净光合速率和蒸腾速率分别作累积处理, 得到每天 9:00 至 17:00 的净光合累积值和蒸腾累积值。

1.2.2 叶绿素含量和光合产物测定

试验 2 处理 7 d 和 14 d 光合测定结束后, 用打孔器分别在各处理植株测定光合作用的叶片即第 1 花序下第 2 片叶打取叶圆片, 测定叶绿素、可溶性糖和淀粉含量。叶绿素用混合液(丙酮、无水乙醇、蒸馏水的体积比为 4.5:4.5:1)提取法测定(唐延林 等, 2004), 可溶性糖和淀粉含量用蒽酮法测定。

1.2.3 坐果率调查

在试验 2 处理 14 d 后, 将番茄植株搬出控制箱, 于温室中观察第 1 花穗的开花坐果情况, 了解湿度处理 14 d 对番茄坐果率的影响, 每个处理观测 5 株。

2 结果与分析

2.1 试验期间的温度和湿度条件

从图 1 可见, 在试验 1 中的前 3 d, 低、中、高湿度处理 10:00 至 16:00 的平均温度没有差异, 其平均相对湿度分别为 41.2%、52.1%和 70.3%。在试验 2 进行期间, 低、中、高湿度处理除 2 d 为阴雨天外, 其余 12 d 中 10:00 至 16:00 时段的平均温度分别为 33.4、33.1 和 31.3 °C, 平均相对湿度分别为 53.0%、60.5%和 75.4%。试验条件基本达到设定要求。

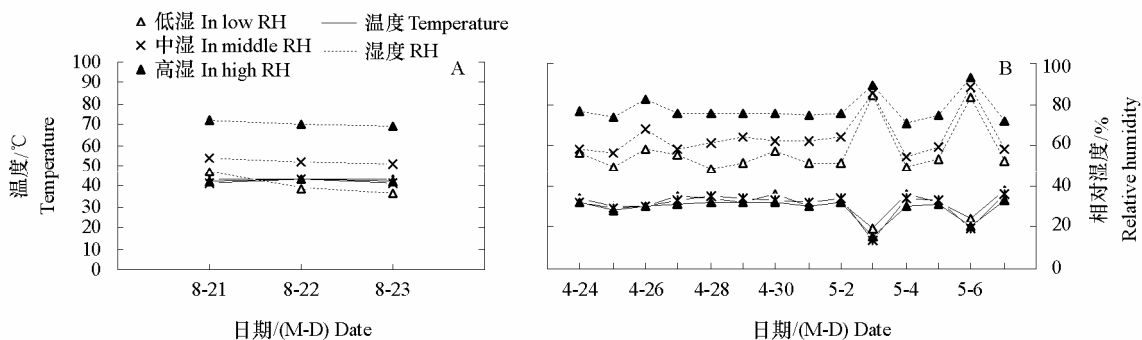


图 1 试验 1 (A) 和试验 2 (B) 期间的温度和湿度条件

图中数据为每天 10:00 至 16:00 每分钟数据的平均值。

Fig. 1 Temperature and relative humidity during the experiment 1(A) and experiment 2(B)

Each value in the panel was the mean of datum at every minute from 10:00 to 16:00.

2.2 空气湿度对高温下番茄光合作用日变化的影响

2.2.1 净光合速率日变化

从图 2 中可以看出, 温度和光合有效辐射 (PAR) 随时间进程逐步加大, 在 13:00 达到最大值, 然后下降。试验 1 处理 3 d 时 (图 2, A) 低、中、高湿度处理的净光合速率 (P_n) 均呈单峰曲线, 峰值出现在 11:00, 分别为 2.8、4.1 和 6.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 11:00 以后 3 个处理都逐渐降低; 净光合累积量分别为 23、60、102 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$, 高湿处理比低湿处理增加了 343%。试验 2 处理 7 d 时 (图 2, B), 低湿处理的 P_n 日变化为双峰曲线, 而高湿处理为单峰曲线, 在一日内在高温处理时段高湿处理的显著大于低湿处理; 中湿处理的变化趋势与低湿处理相同, 但谷值较低湿处理高; 高湿处理的净光合累积量比低湿处理增加了 31%。试验 2 处理 14 d 时 (图 2, C), 10:00—16:00 高温时段内高湿处理有较高的 P_n , 日变化为单峰曲线; 高湿处理的净光合累积量比低湿处理增加了 63%。可见, 在高温干燥时段 (10:00—16:00) 增加空气相对湿度至中湿处理 (RH 55%) 时效果不明显, 只有加湿到高湿处理 (RH 70%) 时才有利于番茄叶片净光合速率的提高, 减轻或消除光合“午休”现象。

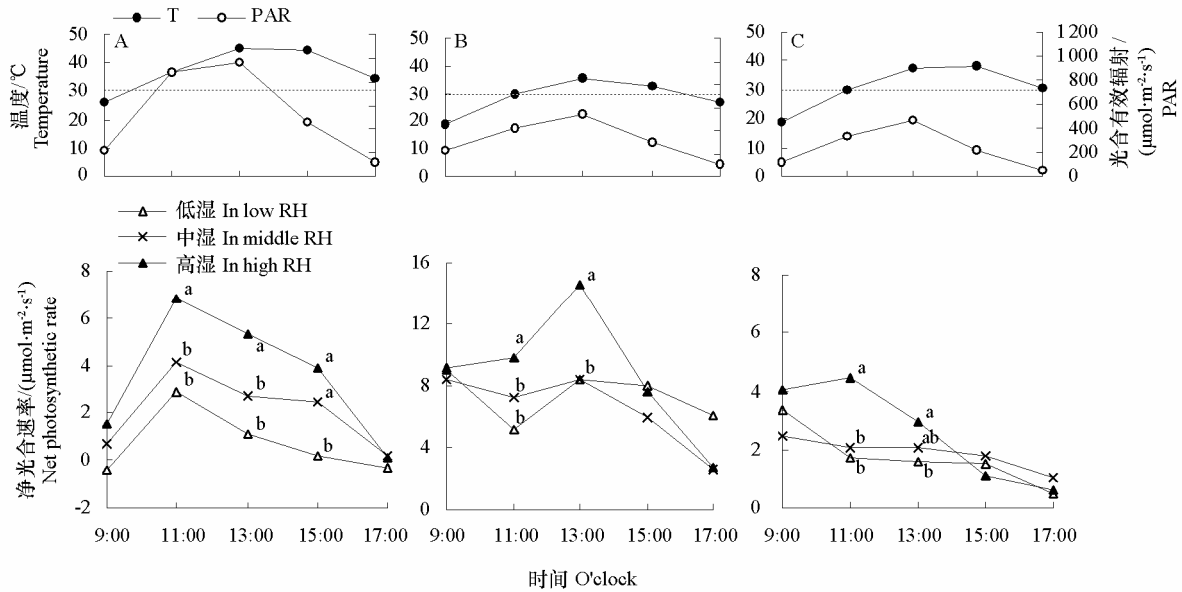


图2 光合测定时的温度(T)和光合有效辐射(PAR)日变化及空气湿度对番茄叶片净光合速率日变化的影响

A 为试验 1 处理 3 d, B 和 C 分别为试验 2 处理 7 d 和 14 d。图中不同的英文字母表示不同处理间 *P* < 0.05 显著差异, 下同。

Fig. 2 Diurnal changes of temperature (T) and PAR during the photosynthesis measurement and the effects of air humidity on the diurnal changes of net photosynthesis rate of tomato leaves

A was the results of the 3rd day in experiment 1, B and C indicated the results of the 7th and 14th day respectively in experiment 2. Different letters indicate significance at *P* < 0.05 among items at different treatments, the same below.

2.2.2 蒸腾速率日变化

试验 1 处理 3 d 时 (图 3, A) 低湿处理的蒸腾速率日变化为双峰曲线, 高湿和中湿处理的为单峰曲线, 峰值出现在 13:00, 分别为 19.3 和 8.0 mmol · m⁻² · s⁻¹; 高湿处理的蒸腾速率在高温时段内显著大于低湿处理。低、中、高湿度处理在一天中的蒸腾累积值分别为 150、167、349 mol · m⁻², 高湿处理比低湿处理增加了 133%。试验 2 处理 7 d (图 3, B) 和 14 d (图 3, C) 的结果与此类似, 一天中的蒸腾累积值高湿处理比低湿处理分别增加了 116%和 117%。表明在高温干燥时段 (10:00—16:00) 增加空气湿度至高湿处理 (RH 70%) 时, 植株不但没有减少蒸腾, 反而保持较高的蒸腾速率。

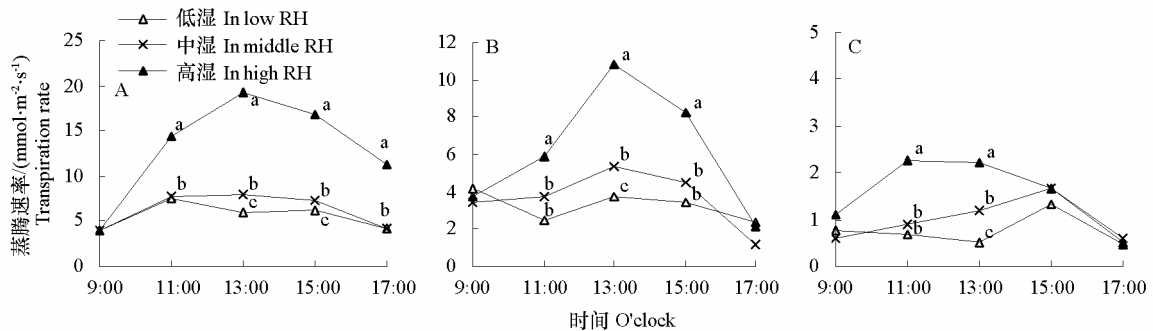


图3 空气湿度对番茄叶片蒸腾速率日变化的影响

Fig. 3 Effects of air humidity on the diurnal changes of transpiration rate of tomato leaves

2.2.3 叶—气温差日变化

在 10:00—16:00 间, 高湿处理的叶—气温差均小于低湿处理, 高湿处理的叶—气温差在 - 1.5 ~ 1.5 °C 范围内, 而低湿处理的叶—气温差为 1.2 ~ 6 °C, 高湿处理使植株叶—气温差变小 (图 4)。

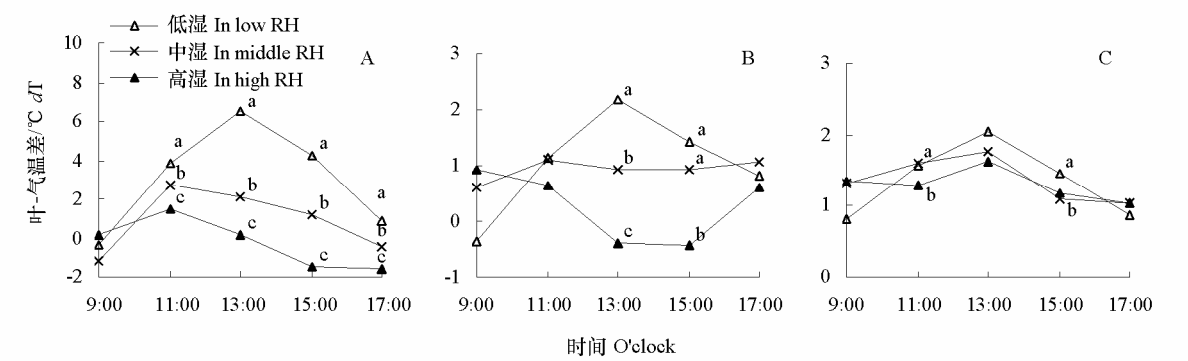


图 4 空气湿度对番茄叶片温度与气温之差日变化的影响
Fig. 4 Effects of air humidity on the diurnal changes of the temperature difference between tomato leaf and air

2.3 空气湿度对高温下番茄叶片 P_n 及 G_s 、 C_i 、 L_s 的影响

如表 1 所示，测定日 11:00 时高湿处理的 P_n 显著大于低湿处理，中湿处理与低湿处理差异不显著。

试验 1 中在 10:00 至 16:00 平均温度 43 ℃ 下，高湿处理比低湿处理的 G_s 增大， C_i 降低， L_s 增大，说明加湿不仅促进了气孔开放，而且主要从非气孔因素方面促进了光合作用。试验 2 中在 10:00 至 16:00 平均温度为 33 ℃ 下 7 d 时，高湿处理相对于低湿处理， G_s 和 C_i 增大， L_s 降低，说明高湿处理的 P_n 大于低湿处理的主要原因是加湿促进了气孔开放；而处理 14 d 时高湿处理比低湿处理， G_s 增大，但 C_i 降低， L_s 增大，与试验 1 处理 3 d 时情况相同。可见在本试验的高温条件下，加湿处理不仅使气孔导度增大，还增加了叶肉细胞的光合能力，从而促进了光合作用。

表 1 空气湿度对番茄叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 及气孔限制值 (L_s) 的影响
Table 1 Effects of air humidity on P_n , G_s , C_i and L_s of tomato leaves

| 品种 Cultivar | 处理时间/d Treating days | 湿度处理 Humidity treatments | P_n / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | G_s / ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | C_i / ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) | L_s |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--|---|--|-------|
| 特宝 Tebao | 3 | 低 Low | 2.84 ± 3.63 b | 0.42 ± 0.10 | 278 ± 15 | 0.042 |
| | | 中 Middle | 4.12 ± 0.68 b | 0.24 ± 0.10 | 253 ± 14 | 0.117 |
| | | 高 High | 6.82 ± 2.26 a | 1.01 ± 0.26 | 275 ± 5 | 0.049 |
| 260 | 7 | 低 Low | 5.22 ± 1.55 b | 0.21 ± 0.15 | 361 ± 20 | 0.115 |
| | | 中 Middle | 7.27 ± 2.33 b | 0.52 ± 0.29 | 394 ± 16 | 0.063 |
| | | 高 High | 9.76 ± 4.34 a | 0.30 ± 0.15 | 381 ± 5 | 0.072 |
| 260 | 14 | 低 Low | 1.68 ± 0.81 b | 0.07 ± 0.05 | 421 ± 16 | 0.085 |
| | | 中 Middle | 2.07 ± 1.24 b | 0.04 ± 0.01 | 383 ± 32 | 0.167 |
| | | 高 High | 4.43 ± 1.58 a | 0.11 ± 0.05 | 377 ± 13 | 0.154 |

注：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。
Note: In same determination date column, different letters in each line mean significant difference at 5% level. The same below.

2.4 空气湿度对高温下番茄叶片叶绿素含量和光合产物的影响

如表 2 所示，叶绿素含量在 3 个湿度处理间基本没有差异，随着处理时间的延长，叶绿素 (a+b) 含量降低。在处理 7 d 和 14 d 时各处理的可溶性糖含量差异不显著；而处理 14 d 较处理 7 d 时均显著增加。叶片的淀粉含量在处理 7 d 时处理间没有显著差异；处理 14 d 时高湿处理显著小于低湿处理，只有低湿处理的 59%。

2.5 空气湿度对高温下番茄坐果率的影响

现蕾期幼苗处理 14 d（试验 2）后在温室中观测的开花坐果情况见表 3。空气湿度处理对单株番茄的开花数和开花率没有显著影响。高湿处理的单株坐果数达到 3.4 个，坐果率达到 47.7%，显著大于低湿和中湿处理。由此可见，在 30℃ 以上的高温下增加空气相对湿度至 70% 时才能显著提高番茄的坐果率。

表 2 空气湿度对高温下番茄幼苗叶片叶绿素含量、可溶性糖含量和淀粉含量的影响

| Table 2 Effects of air relative humidity on the content of chlorophyll, soluble sugar and starch of tomato leaves under high temperature | | | | | | |
|--|-----------------------------|---|----------------|-----------------|-------|--|
| 处理时间/d Treating days | 湿度处理 Humidity treatments | 叶绿素/ ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) Chlorophyll | | | | 可溶性糖/ ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) Soluble sugar |
| | | a | b | a + b | a/b | |
| 7 | 低 Low | 22.96 ± 2.06 a | 9.98 ± 0.86 a | 32.94 ± 2.85 a | 2.3 a | 207.14 ± 50.79 a |
| | 中 Middle | 18.55 ± 3.18 a | 7.70 ± 1.49 b | 26.25 ± 4.66 b | 2.4 a | 222.81 ± 76.61 a |
| | 高 High | 21.87 ± 0.93 a | 8.98 ± 0.19 ab | 30.85 ± 1.12 ab | 2.4 a | 159.98 ± 44.79 a |
| 14 | 低 Low | 17.62 ± 3.11 a | 11.07 ± 2.38 a | 28.69 ± 5.49 a | 1.6 a | 346.46 ± 14.61 a |
| | 中 Middle | 14.72 ± 1.83 a | 9.21 ± 1.62 a | 23.93 ± 3.44 a | 1.6 a | 348.87 ± 6.24 a |
| | 高 High | 16.44 ± 1.21 a | 11.67 ± 1.01 a | 28.11 ± 2.23 a | 1.4 b | 325.70 ± 37.91 a |

表 3 空气湿度对高温下番茄坐果率的影响

Table 3 Effects of air relative humidity on the fruit-set rate of tomato under high temperature

| 湿度处理 Humidity treatments | 现蕾数 Number of flower buds | 开花数 Number of flower | 坐果数 Number of fruit | 开花率/% Flowering rate | 坐果率/% Fruit-set rate |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 低 Low | 6.8 a | 5.6 a | 1.0 b | 84.0 a | 13.3 b |
| 中 Middle | 6.3 a | 6.2 a | 0.7 b | 97.2 a | 12.2 b |
| 高 High | 7.4 a | 6.6 a | 3.4 a | 89.8 a | 47.7 a |

3 讨论

3.1 高温低湿下增加空气湿度可以提高番茄叶片净光合速率

试验中处理时段幼苗的环境温度都在 30℃ 以上，加湿处理对温度的影响较小，因此可以认为试验中的差异主要是由空气湿度不同造成的。

有研究表明 30℃ 以上的高温使番茄叶片的光合速率降低（丁兆堂 等，2003；Morales et al., 2003），而高温胁迫产生的同时往往伴随大气相对湿度的降低和 VPD 的增大（刘东焕 等，2002）。本研究中，低湿处理生长期内的相对湿度为 40%~50%，加湿使相对湿度达 50%~60%（中湿处理）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 70%（高湿处理）时，则显著提高了番茄叶片的净光合速率以及全天的净光合累积量。

增加空气湿度不仅提高了番茄叶片的净光合速率（ P_n ），还影响 P_n 的日变化。晴天中午的高温低湿是造成光合“午休”的主要原因，其中较低的空气湿度被认为是引起光合“午休”的重要生态因子（许大全，2002）。本试验中在 10:00—16:00 的温度为 33~43℃ 的高温条件下，高湿处理（RH 70%）下光合“午休”减轻或消除的结果（图 2）也证明了这一观点。

对于高温引起光合速率降低的原因是属于气孔限制还是非气孔限制有许多不同的结论（Berry & Bjorkman, 1980；刘东焕 等，2002；丁兆堂 等，2003；张洁 等，2005）。对于番茄在 35℃ 的高温条件下的研究表明，每日 2 h 和 4 h 短期高温胁迫造成净光合速率下降主要是由气孔限制因素引起的，而 6 h 和 8 h 较长期高温胁迫，造成叶绿体超微结构的破坏，对光合作用的抑制为非气孔限制（张洁 等，2005；赵博 等，2008）。对水分胁迫（曹慧 等，2004）、NaCl 胁迫（王素平 等，2006）

和低温胁迫(胡美君等, 2006)的研究也表明, 随胁迫程度加剧和持续时间延长, 光合速率下降有一个从气孔限制向叶肉细胞活性限制的转变过程(姚庆群和谢贵水, 2005)。

本试验中低湿处理番茄叶片的气孔导度小, 蒸腾速率低, 散失热量少, 叶片温度高于气温 1.2 ~ 6 °C; 而叶温的增加, 可能造成对光合结构的直接伤害(王冬梅等, 2004), 影响叶肉内部的光合机能, 从而影响光合作用的进行。当增加空气湿度至高湿处理(RH 70%)时促进了气孔开放, 蒸腾速率显著增加(图 3), 叶片散失更多热量, 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。说明在本试验的高温条件下, 增加空气湿度从气孔因素和非气孔因素两方面促进了光合作用, 而翁晓燕和蒋德安(2002)的研究也认为空气湿度对光合速率影响的本质不仅是影响气孔开度, 还直接影响叶肉细胞内光合关键酶的活力。

3.2 空气湿度处理与番茄的坐果率

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, 本试验中现蕾幼苗在处理 14 d 后, 高湿处理的单株幼苗干物质积累量达到 7.3 g, 比低湿处理高 38%。而番茄的光合产物主要以蔗糖的形式通过韧皮部向库器官运输, 同时有一部分同化产物以淀粉的形式在体内积累。随着高温处理时间的延长, 植物韧皮部内可能造成胼胝体增多, 堵塞维管束, 影响同化产物在韧皮部的运输, 导致叶绿体内淀粉的积累(张洁和李天来, 2005)。本试验的高温低湿处理条件下, 淀粉积累较多(表 2), 推测可能是同化产物的运输受到了影响, 而高湿处理的淀粉积累量在处理期间一直低于低湿处理, 表明增加空气相对湿度至 70%时, 可能促进了同化产物向花穗等库器官的运输。可溶性糖既是光合产物, 又作为渗透调节物质而存在, 高湿处理下可溶性糖含量较少, 说明更多的可溶性糖运输至花穗等库器官, 叶片中较少的可溶性糖即可维持渗透调节作用。

因此, 在本试验的高温条件下, 通过喷雾增加空气相对湿度至 70%, 提高了番茄叶片的净光合速率, 减轻了光合“午休”, 同时促进了干物质的积累, 以及物质向花穗等库器官的运输, 最终提高了番茄的坐果率。

References

- Berry J, Bjorkman Q. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annu Rev Plant Physiol*, 31: 491 - 543.
- Bertin N, Guichard S, Leonardi C, Longuenesse J, Langlois D, Navez B. 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.
- Cao Hui, Xu Xue-feng, Han Zhen-hai, Wang Xiao-wei, Guo Tu-qiang. 2004. Changes of physiological characteristic on photosynthesis in *Malus* seedling leaves during water stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (3): 285 - 290. (in Chinese)
- 曹慧, 许雪峰, 韩振海, 王孝威, 郭图强. 2004. 水分胁迫下抗旱性不同的两种苹果属植物光合特性的变化. *园艺学报*, 31 (3): 285 - 290.
- Ding Zhao-tang, Lu Yu-hua, Xu Kun. 2003. Effects of environmental factors on the photosynthetic characteristics of tomatoes. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 34 (3): 356 - 360. (in Chinese)
- 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.
- Hu Mei-jun, Guo Yan-ping, Shen Yun-gang, Zhang Liang-cheng. 2006. Environmental regulation of *Citrus* photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (3): 535 - 540. (in Chinese)
- 胡美君, 郭延平, 沈允刚, 张良诚. 2006. 柑橘属光合作用的环境调节. *应用生态学报*, 17 (3): 535 - 540.
- Liang Yu, Gao Yu-bao, Chen Shi-ping, Ren An-zhi. 2001. Effects of endophyte infection on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Lolium Perenne* L. under drought stress. *Acta Phytocologica Sinica*, 25 (5): 537 - 543. (in Chinese)
- 梁宇, 高玉葆, 陈世苹, 任安芝. 2001. 干旱胁迫下内生真菌感染对黑麦草实验种群光合、蒸腾和水分利用的影响. *植物生态学报*, 25 (5): 537 - 543.
- Liu Dong-huan, Zhao Shi-wei, Gao Rong-fu, Zhang Zuo-shuang, Jiang Chuang-dao, Liu Yu-jun. 2002. Response of plants photosynthesis to higher

- temperature. *Bulletin of Botanical Research*, 22 (2): 205 - 212. (in Chinese)
- 刘东焕, 赵世伟, 高荣孚, 张佐双, 姜闯道, 刘玉军. 2002. 植物光合作用对高温的响应. *植物研究*, 22 (2): 205 - 212.
- Liu Xian-zhao, Kang Shao-zhong. 2002. Effects of shading on photosynthesis and yield of tomato plants at different growth stages. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (5): 427 - 432. (in Chinese)
- 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.
- Mao Sheng-li, Du Yong-chen, Wang Xiao-xuan. 2001. The advance in tomato breeding of heat-tolerance. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (supplement): 655 - 660. (in Chinese)
- 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.
- Mao Sheng-li, Du Yong-chen, Wang Xiao-xuan, Zhu De-wei, Gao Jian-chang, Dai Shan-shu. 2005. Changes of endogenous abscisic acid and the effect of exogenous ABA on pollen germination under heat stress tomato. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (2): 336 - 339. (in Chinese)
- 毛胜利, 杜永臣, 王孝宣, 朱德蔚, 高建昌, 戴善书. 2005. 高温胁迫下番茄体内 ABA 水平的变化及其对花粉萌发的影响. *园艺学报*, 32 (2): 336 - 339.
- Morales D, Rodricuez P, Dell Amico J, Nicolas E, Torrecilla A, Sanchez-Blanco M J. 2003. High-temperature preconditioning and thermal shock imposition affects water relations, gas exchange and root hydraulic conductivity in tomato. *Biologia Plantarum*, 27 (2): 203 - 208.
- Peet M M, Sato S, Clemente C, Pressman E. 2003. Heat stress increases sensitivity of pollen, fruit and seed production in tomatoes to non-optimal vapor pressure deficits. *Acta Horticulturae*, 618: 209 - 215.
- Tang Yan-lin, Huang Jing-feng, Wang Ren-chao. 2004. Change law of hyperspectral data with chlorophyll and carotenoid for rice at different developmental stages. *Chinese J Rice Sci*, 18 (1): 59 - 66. (in Chinese)
- 唐延林, 黄敬峰, 王人潮. 2004. 水稻不同发育时期高光谱与叶绿素和类胡萝卜素的变化规律. *中国水稻科学*, 18 (1): 59 - 66.
- Wang Dong-mei, Xu Xiang-yang, Li Jing-fu, Cui Lin. 2004. Effect of heat stress on chloroplast ultrastructure changes in mesophyll cell of tomato. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (6): 1032 - 1036. (in Chinese)
- 王冬梅, 许向阳, 李景富, 崔琳. 2004. 热胁迫对番茄叶肉细胞叶绿体超微结构的影响. *园艺学报*, 31 (6): 1032 - 1036.
- Wang Su-ping, Li Juan, Guo Shi-rong, Hu Xiao-hui, Li Jing, Wang Tian. 2006. Effects of NaCl stress on growth and photosynthesis characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 26 (3): 455 - 461. (in Chinese)
- 王素平, 李娟, 郭世荣, 胡晓辉, 李璟, 汪天. 2006. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗植株生长和光合特性的影响. *西北植物学报*, 26 (3): 455 - 461.
- Weng Xiao-yan, Jiang De-an. 2002. Regulation of Rubisco activity and diurnal changes of photosynthetic rate in rice by ecology factors. *Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci*, 28 (4): 387 - 391. (in Chinese)
- 翁晓燕, 蒋德安. 2002. 生态因子对水稻 Rubisco 和光合日变化的调节. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 28 (4): 387 - 391.
- Xu Da-quan. 2002. Photosynthetic efficiency. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press: 73, 86. (in Chinese)
- 许大全. 2002. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社: 73, 86.
- Yan Jie, Luo Qing-xi, Chen Bi-hua. 2004. Control of humidity environment under horticultural greenhouse. *Journal of Chang Jiang Vegetables*, 9: 36 - 39. (in Chinese)
- 闫杰, 罗庆熙, 陈碧华. 2004. 园艺设施内湿度环境的调控. *长江蔬菜*, 9: 36 - 39.
- Yao Qing-qun, Xie Gui-shui. 2005. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation under drought stress. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 25 (4): 80 - 85. (in Chinese)
- 姚庆群, 谢贵水. 2005. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制. *热带农业科学*, 25 (4): 80 - 85.
- Zhang Jie, Li Tian-lai. 2005. Effects of daytime sub-high temperature on photosynthesis and chloroplast ultra structure of tomato leaves in greenhouse. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (4): 614 - 619. (in Chinese)
- 张洁, 李天来. 2005. 日光温室亚高温对番茄光合作用及叶绿体超微结构的影响. *园艺学报*, 32 (4): 614 - 619.
- Zhang Jie, Li Tian-lai, Xu Jing. 2005. Effect of daytime sub-high temperature on photosynthesis and dry matter accumulation of tomato in greenhouse. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (2): 228 - 233. (in Chinese)
- 张洁, 李天来, 徐晶. 2005. 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.
- Zhao Bo, Li Long-quan, Li Tian-lai. 2008. Effect of short time sub-high temperature at daytime on photosynthesis of tomato leaves. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 1: 3 - 6. (in Chinese)
- 赵博, 李龙泉, 李天来. 2008. 昼间短时间亚高温对番茄叶片光合作用的影响. *农业科技装备*, 1: 3 - 6.