

湿帘风机系统温室夏季蒸腾与微气候试验*

赵 云 沈剑英 Meir Teitel

【摘要】 在2种通风率和湿帘开、关状况下对温室内部气候相关参数进行了检测和对比分析,并重点对蒸腾速率进行了模拟计算和测量。试验结果表明:蒸腾速率与通风率、湿帘工作状态相关,在相对干燥的环境下(不开启湿帘),提高通风率可使植物获得更大的蒸腾量,从而可使温室内部温度不超过室外温度。在湿帘不工作的情况下,由于蒸腾的作用植物叶面温度低于周围的环境空气温度;而在湿帘工作情况下,室内湿度较高,蒸腾受到抑制,叶面温度高于周围环境空气温度。

关键词: 温室 微气候 通风 湿帘风机 蒸腾速率

中图分类号: S625.5⁺1

文献标识码: A

Experiment on Microclimate in the Greenhouses by Fan and Pad

Zhao Yun¹ Shen Jianying¹ Meir Teitel²

(1. Jiaxing University, Jiaxing 314001, China

2. Institute of Agricultural Engineering, Bet-Dagan 50250, Israel)

Abstract

For a comprehensive understanding of climate in a greenhouse with fan and pad system, an experiment measuring climate parameters was conducted on with two ventilation rates and with pad on and off. The transpiration rate of the plant inside greenhouse was supposed to be one of the most important factors on climate considerably influences latent heat exchange, and it was calculated and measured mainly in this work. The experimental data show that the transpiration rate has some correlation with ventilation and pad working condition. In the case of no pad working, the higher ventilation which promotes transpiration will induce a lower temperature inside greenhouse to outside and a lower leaf temperature than its ambient temperature. But with the pad working the leaf phenomena is just opposite. The vertical and horizontal distribution of temperature and specific humidity were also measured and analyzed.

Key words Greenhouses, Microclimate, Ventilation, Fan and pad system, Transpiration

引言

湿帘风机系统是大型温室夏季降温的重要设施,如何有效地发挥蒸发降温效果,达到温室气候优化控制和节能的双重目的是值得研究的课题。温室中部分太阳辐射能通过作物蒸腾转化为潜热,使温室内部湿度增加,另一部分太阳辐射能转化为显热,使空气温度升高。因此作物的蒸腾是影响温室气候

的重要因素^[1~2]。文献[3~4]研究了自然通风温室中黄瓜与番茄夏季蒸腾速率。Fuchs、Kittas等在理论分析和试验的基础上提出存在一个能使植物冠层达到最佳蒸发效果的通风率^[5~7]。Willits在不同通风率和温室作物不同生长阶段(叶面积指数 LAI 从 0.05 到 3.13)条件下进行了湿帘风机系统的降温试验,给出了作物冠层的降温效果和温室温度分布梯度^[8]。本文采用 Fuchs^[5]提出的温室蒸腾计算

收稿日期: 2007-07-31

* 高等学校骨干教师资助计划项目和嘉兴学院科研启动基金资助项目

赵 云 嘉兴学院机电工程学院 教授, 314001 浙江省嘉兴市

沈剑英 嘉兴学院机电工程学院 副教授

Meir Teitel Institute of Agricultural Engineering, A. R. O. Senior Scientist, 50250 Bet-Dagan, Israel

模型来模拟湿帘风机系统的温室蒸腾速率,并考察湿帘风机工作状态对温室内植物叶面温度、蒸腾速率以及温室内部气候参数分布的影响。

1 试验

1.1 试验条件

试验在以色列南部某地面积为 528 m² 的连栋塑料温室中进行。温室为圆拱屋面,单跨 7.5 m,天沟离地高度 3.5 m。试验期间温室屋顶覆盖遮阳网。温室内种植的辣椒已处成熟期,叶面积指数为 3。温室南墙安装有 2 台叶轮直径 1 220 mm 的通风风机,其轴心离地面 0.8 m,风机可提供 2 种通风

率,分别为 0.011 m³/(s·m²)(相当于 10 h⁻¹ 的空气交换次数)和 0.025 m³/(s·m²)(相当于 22 h⁻¹ 的空气交换次数)。温室安装有湿帘,布置在与风机相距 24 m 的北墙上,湿帘宽度 1 m,底边离地 0.8 m。试验在夏季进行 8 d,每天的试验选在室外气候条件稳定的中午前后各 1.5 h 完成(天气情况见表 1,表中数据为中午 12 时前后 3 h 的平均值)。试验分 4 d(6月28日、6月29日、7月2日、7月3日)湿帘工作和 4 d(7月4日、7月5日、7月8日、7月9日)湿帘不工作 2 组。每组进行 2 种通风率 0.011 m³/(s·m²)和 0.025 m³/(s·m²)的对比试验。

表 1 室外环境参数表

Tab.1 Ambient climate condition

室外环境气象参数	试验日期							
	6-28	6-29	7-02	7-03	7-04	7-05	7-08	7-09
室外环境平均辐射/W·m ⁻²	934	938	956	946	924	842	882	940
室外环境平均温度/℃	29.2	29.9	29.6	29.3	28.3	27.8	29	31.5
室外环境平均湿度/%	52.9	47.3	49.7	54.4	56.2	56.2	61.4	47.6

1.2 蒸腾速率和叶面温度测量

蒸腾速率测量采用称量法,将种植植株的穴盘置于电子秤上,穴盘内安装有支架,植株由支架承担,穴盘由塑料薄膜覆盖密封以保证栽培基质的水蒸发不影响测量。穴盘内植株由滴灌头灌溉。温室滴灌系统由控制器自动控制,试验期间定时在午夜定量灌水以确保白天作物不发生水胁迫。电子秤的分辨率为 10 g,输出由数据采集器记录,穴盘质量的连续变化数据经 Matlab 程序计算后可得蒸腾速率。

叶面温度使用线径为 0.02 mm 的热电偶进行测量。试验中分别测量 3 个不同高度的叶面温度和叶面附近的空气温度,以得到其温度差。测量前将热电偶沿叶柄刺入叶面并保持牢固,同时应避免阳光直射到热电偶上。与每个被测叶片相对应,在与其距离 5 mm 范围内布置冠层空气温度热电偶(以最大限度地接近叶面的边界层),确保该传感器与叶片的位置并避免阳光直射。

1.3 蒸腾速率模拟

Fuchs^[5]提出温室蒸腾计算模型基于作物冠层与空气的能量交换、温室内部和外部的能量交换以及温室的能量平衡关系,利用 Penman 一阶方程得到^[5]。该方程特点是以室外 VPD(蒸汽压力差)为输入参数,便于应用。植物叶面蒸发潜热 λE (W/m²) 可以模拟为

$$\lambda E = \frac{s \left(1 + \frac{r_a}{r_x} \right) R_n + \frac{\rho c_p}{r_x} (e(T_o) - e_o)}{\gamma + s \left(1 + \frac{r_a}{r_x} \right) + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \frac{r_a}{r_x}} \quad (1)$$

式中 λ ——水的蒸发潜热, J/g
 E ——蒸腾速率, g/(m²·s)
 R_n ——温室内太阳净辐射, W/m²
 ρ ——空气密度, kg/m³
 c_p ——空气常压下的比热容, J/(kg·K)
 T_o ——室外温度, K
 s ——温湿图上饱和蒸汽压曲线在 T_o 处的斜度, kPa/K
 $e(T_o)$ ——饱和湿气在室外温度时的蒸汽压, kPa
 e_o ——实际外部湿气的蒸汽压, kPa
 γ ——湿气常数, kPa/K
 r_c ——整个作物冠层蒸发过程中潜热传递的热阻, s/m
 r_a ——作物叶面边界层与空气对流换热的热阻, s/m
 r_x ——温室通风形成的温室内外热交换的热阻, s/m

根据 Fuchs 的建议, 3 个阻值为

$$r_a = \frac{305 \sqrt{\frac{D}{X \sqrt{A}}}}{I_{\text{leaf}}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r_c} = \frac{1.8 \times 10^{-2} I_{\text{leaf}}}{1 + \frac{250}{R_n}} \quad (3)$$

$$r_x = \frac{1}{XZ} \quad (4)$$

式中 D ——作物叶面平均直径, m
 X ——通风引起的空气交换次数, s^{-1}
 A ——温室面积, m^2 I_{leaf} ——叶面积指数
 Z ——温室平均高度, m

由于式(1)将植物气孔中的湿汽蒸汽压用饱和湿汽在室外温度时的蒸汽压 $e(T_o)$ 来表达, 因此, 在已知室外温、湿度情况下可以方便地计算不开启湿帘工作条件下的植物蒸腾速率。而在湿帘工作的情况下, 进入温室的气流经过湿帘时, 发生蒸发换热, 温度降低而湿度增加。这时, 公式中的蒸汽压 $e(T_o)$ 和 e_o 可用刚经过湿帘后的空气温度和湿度来计算得到。

1.4 温室内外气候参数测量

在温室一跨的纵向中轴线上各布置 5 个温度、湿度传感器。温度传感器采用热电偶, 湿度传感器为配对的干、湿球热电偶, 两者被放置在装有风扇并贴有反光膜的盒内。室内太阳净辐射由具有向上和向下 2 个测量面的 LI-COR 型辐射仪测出(安装高度离地 3.5 m)。室外安装了一个小型气象站以记录环境气候变化, 测量数据包括: 太阳总辐射、温度、湿度, 所有数据以 1 min 的间隔将平均值自动记录在 21X COMPBELL 型数据记录仪中。

2 试验结果与讨论

2.1 蒸发蒸腾量

在温室中部分太阳净辐射能转化为显热, 使温室空气温度升高, 另一部分通过作物蒸腾转化为潜热, 由风机驱动排出室外。相关研究表明, 作物自然蒸腾对温室微气候影响很大, 作物蒸腾速率是温室显热、潜热交换和肥水灌溉最主要的影响因子。表 2 给出了 8 个试验日的蒸腾速率测量值与模拟值(蒸腾速率用计算后与太阳辐射相同量纲的能量密度来表示)。蒸腾速率测量值与模拟值平均差分别为 -16、21、17、13 W/m^2 , 其差值均在各自测量值与模拟值 10% 的范围之内, 该方程可以较好地模拟蒸腾速率。在湿帘工作时, 2 种通风率的蒸腾速率分别是 188 W/m^2 和 234 W/m^2 ; 湿帘不工作状况下, 2 种通风率的蒸腾速率分别是 270 W/m^2 和 339 W/m^2 。说明提高通风率, 蒸腾速率有提高的趋势。同时可以明显地看出: 在湿帘不工作时, 由于温室内部环境空气相对干燥, 更有利于作物蒸腾, 可获得比湿帘工作时更大的蒸腾速率。

图 1 为湿帘不工作 4 d 中室内净辐射与蒸腾速率之间的关系, 图中直线代表温室内净辐射与蒸腾速率的平衡点(净辐射完全由植物蒸腾转化)。可以看到, 在通风率为 0.025 $m^3/(s \cdot m^2)$ 时, 蒸腾速率都

在平衡点以上, 也就说明在当前通风条件下, 室内温度应该不高于室外温度, 甚至会低于室外温度。试验中最高通风率仅为 0.025 $m^3/(s \cdot m^2)$, 低于一般温室的设计通风率。

表 2 蒸腾速率测量值与模拟值

Tab. 2 Comparison of transpiration rate between the measured and calculated values W/m^2

试验日期	通风率/ $m^3 \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$			
	0.011		0.025	
	测量值	理论值	测量值	理论值
6-28	179	204	217	207
6-29	177	202	250	206
7-02	220	205	223	221
7-03	177	206	247	220
平均值	188	204	234	213
试验日期	通风率/ $m^3 \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$			
	0.011		0.025	
	测量值	理论值	测量值	理论值
7-04	247	242	334	347
7-05	308	272		
7-08	226	220	300	294
7-09	301	277	382	337
平均值	270	253	339	326

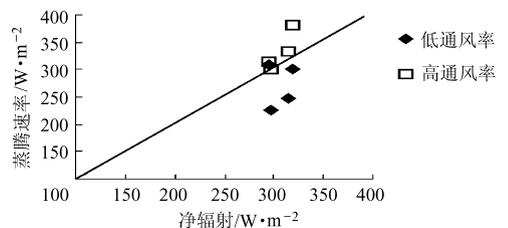


图 1 湿帘不工作时温室内净辐射与蒸腾速率关系曲线

Fig. 1 Net radiation and transpiration rate inside greenhouse without pad working

2.2 叶面温度

图 2 为空气温度与叶面温度之差 ($T_a - T_l$) 变化曲线。试验时中午 12 时以前湿帘不工作, 12 时开启湿帘水路。可以看到: 在湿帘不工作时, 叶面温度低于周围空气温度 0.5℃ 左右; 当开启湿帘后, 空气温度与叶面温度之间的关系发生变化, 叶面温度高于周围空气温度 1℃ 左右。该现象说明: 在相对干燥的环境下, 温室中的叶面温度低于空气温度, 因而热能是从空气向叶面传递, 植物冠层与周围空气的热交换中是吸收能量, 即空气从进风口到风机排出的运动过程中是被降温的过程; 而在湿帘工作的环境中, 温室中的叶面温度高于空气温度, 植物冠层与周围空气的热交换中是输出能量, 热能是从叶面向空气传输, 即空气从进风口到风机排出的运动过程中是被加热的过程。

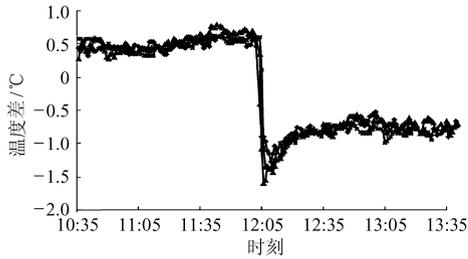


图2 空气温度与叶面温度差变化曲线

Fig.2 Temperature difference between bulk air and leaf

2.3 温、湿度分布

试验中检测了不同条件下温室室内温度与湿度,以考察温室内部小气候的情况。各试验12时以前通风率为 $0.011 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 12时以后为 $0.025 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。测量数据均为所有试验日的平均

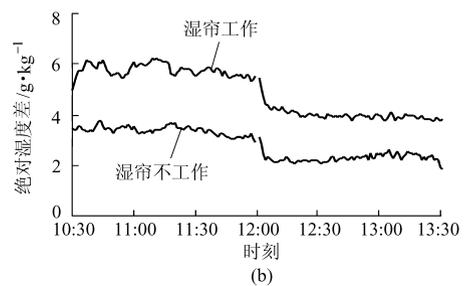
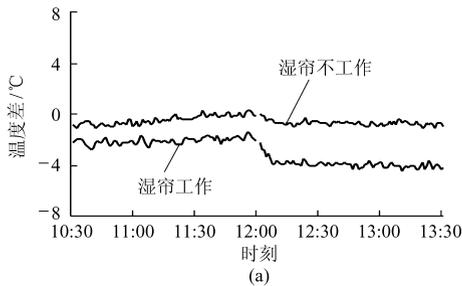


图3 室内外温度差、湿度差变化曲线

Fig.3 Air temperature and specific humidity difference between average greenhouse condition and ambient

(a) 温度差 (b) 绝对湿度差

侧的温度差 ($T_f - T_p$) 的变化曲线。可以看出湿帘不工作时温度差低于 0°C 。通风率提高后,该温度差绝对值略有增加。这说明风机一侧的空气温度低于进风口一侧的空气温度,即进入温室的空气沿温室内作物间运动时逐渐降温。空气在植物冠层中运动时,与植物叶面发生热交换,叶面气孔中的水得到热蒸发而将空气的部分热量转换成潜热,从而使空气温度变低。而在湿帘工作的情况下,与前述情况不同,温度差总在正值区域,这说明进入温室的空气在沿温室运动时逐渐被加热,然后由风机排到温室外,因而靠近风机一侧的温度总是高于进风口一侧,在水平方向形成较大的温度梯度。上述现象与图2

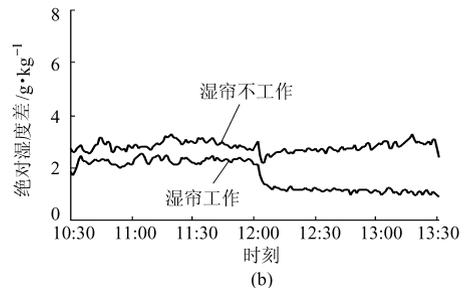
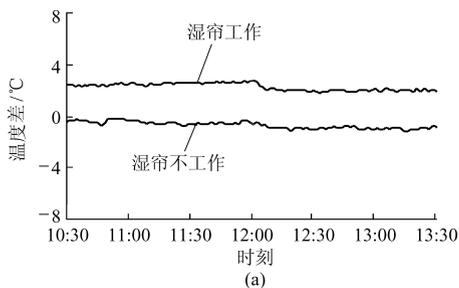


图4 室内水平通风方向温度差、湿度差变化曲线

Fig.4 Air temperature and specific humidity difference between the fan and pad

(a) 温度差 (b) 绝对湿度差

值。图3为温室内平均温度(所有测点值的平均)与室外温度之差 ($T_i - T_o$) 和温室内平均湿度(所有测点值的平均)与室外湿度之差 ($W_i - W_o$) 的变化曲线。湿帘不工作时,低通风速率时间内温度差在 0°C 附近,表明温室的平均温度接近室外温度;提高通风率时,温度差将进一步向负值发展,这是由于提高通风速率加强了作物蒸腾从而有更多的能量转化成潜热。该现象符合图1说明的情况。使用湿帘,室内温度可保证低于室外温度;进一步增加通风率,室温会进一步降低到与室外温度相差 4°C 左右。图3b说明在使用湿帘的情况下,温室湿度明显提高,进一步提高通风率可降低室内外湿度差。

图4a为靠近风机一侧的温度和靠近进风口一

侧的湿度和靠近进风口一侧的湿度差 ($W_f - W_p$) 的变化曲线,测量数据显示湿帘不工作时的湿度差比湿帘工作时大。提高通风率时,使用湿帘的湿度差明显降低,而湿帘不工作时的湿度差无明显变化。

图5为在湿帘工作和不工作时温室内部高点(距地 2.3 m)与低点(距地 0.3 m)温度差 $T_t - T_l$ 与湿度差 ($W_t - W_l$) 的变化曲线。使用湿帘时的垂直温度差和湿度差明显大于不使用湿帘时的值。在2种情况下提高通风率都可以显著减小垂直方向的温度和湿度梯度,湿帘不工作时, $0.025 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 的通风率就可以使温度差接近 0°C 。

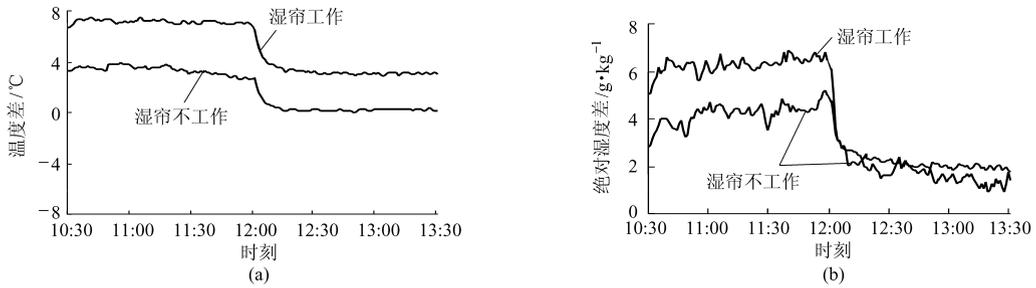


图5 室内垂直方向温度差、湿度差变化曲线

Fig. 5 Air temperature and specific humidity difference between the top and low points

(a) 温度差 (b) 绝对湿度差

3 结论

(1) 基于能量平衡方程的温室作物蒸腾速率模拟计算在湿帘风机系统温室中有使用价值,试验数据与模拟数据有较好的一致性。该方程直接以温室外部气候条件为主要输入参数,在实际应用中可减少温室内气候参数的测量而具有更好的操作性。温室内气候是室内各物质能量交换、变化的结果。夏季降温时,室内作物的蒸腾作用对气候变化具有重要的影响。

(2) 湿帘工作情况下的蒸腾速率明显低于湿帘不工作状态,如以试验测量数据为准,前者为后者的70%。提高通风率可以不同程度地提高蒸腾速率。而在湿帘不工作时,0.025 m³/(s·m²)的通风率就可

以获得不低于当前温室内部净辐射的蒸腾速率。

(3) 测量数据表明:湿帘不工作时,由于作物的蒸腾换热,温室平均温度也可接近室外温度(较低通风率)或低于室外温度(较高通风率)。这个现象可进一步支持结论(2)。

(4) 叶面温度与冠层内空气温度有差别。湿帘不工作时,植物叶面温度低于空气温度;湿帘工作时,植物叶面温度高于空气温度。

(5) 温室内部温、湿度基本特征为:湿帘工作时,室内温度低而湿度高,水平温度梯度大而湿度梯度小、垂直温度梯度与湿度梯度均高于湿帘不工作时,提高通风率可以显著降低温室内垂直方向的温、湿度梯度。

参 考 文 献

- 1 Fuchs M. Transpiration and foliage temperature in a greenhouse[C]//Proceedings of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses, Tel-Aviv, 1993.
- 2 Fuchs M. Enhancing latent heat dissipation[R]. BARD Project No. IS-1816-90R, 1995.
- 3 汪小■,罗卫红,丁为民,等. 南方现代化温室黄瓜夏季蒸腾研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1 390~1 395.
Wang Xiaochan, Luo Weihong, Ding Weimin, et al. Cucumber canopy transpiration in subtropical modern greenhouse under summer climate condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1 390~1 395. (in Chinese)
- 4 戴剑锋,金亮,罗卫红,等. 长江中下游 Venlo 型温室番茄蒸腾模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 99~103.
Dai Jianfeng, Jin Liang, Luo Weihong, et al. Simulation of greenhouse tomato canopy transpiration in Yangtze River Delta [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 99~103. (in Chinese)
- 5 Fuchs M. Transpiration and foliage temperature in a greenhouse[R]. BARD Project No. IS-1816-90R, 1995.
- 6 Kittas C, Katsoulas N, Baille A. Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer condition[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(3): 349~360.
- 7 Seginer I. Alternative design formulae for the ventilation rate of greenhouses[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(4): 355~365.
- 8 Willits D H. Cooling fan-ventilated greenhouses: a modelling study[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3): 315~329.