南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾测量与模拟研究

罗卫红 汪小 戴剑峰 丁为民 郭世荣 李式军

(南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室 南京 210095)

摘要 温室作物蒸腾直接影响到温室内空气温湿度,是进行温室温度和湿度优化调控所必需的信息。通过冬季温室小气候和蒸腾速率与气孔阻力的实验观测,分析了冬季南方温室黄瓜(*Cucumis sativus*)蒸腾速率的变化特征及其与温室小气候要素之间的定量关系,确定了南方现代温室冬季黄瓜冠层阻力 r_c 和边界层动力学阻力 r_a 的特征值和作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例,并采用Penman-Monteith方法模拟计算了冬季温室内黄瓜作物蒸腾速率。结果表明,冬季温室内作物蒸腾速率的日变化趋势与净辐射的日变化基本一致,在正午达一天中的最大值。而空气饱和水汽压差(VPD)的日最大值则基本出现在午后1~2 h。在我国南方温室冬季高湿的环境下($VPD < 2$ kPa),作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射日变化。冠层上方的净辐射和 VPD 及作物冠层蒸腾速率日最大值分别在 $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、2.0 kPa和 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。冬季温室作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例为46%。冬季黄瓜作物的 r_c 和 r_a 特征值分别为 $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。采用实际变化的 r_c 与 r_a 值和 r_c 与 r_a 的特征值计算的作物蒸腾速率和累积蒸腾量均与实测值基本一致。作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例及 r_c 和 r_a 特征值的确定为研制基于作物蒸腾模型的温室环境和肥水灌溉的优化控制系统奠定了基础。但研究所确定的这些特征值在其它地区和其它类型温室是否适用,尚需进一步的实验资料来证明。

关键词 温室 黄瓜 蒸腾速率 南方 冬季

MEASUREMENT AND SIMULATION OF CUCUMBER CANOPY TRANSPIRATION IN A SUBTROPICAL MODERN GREENHOUSE UNDER WINTER CLIMATE CONDITIONS

LUO Wei-Hong WANG Xiao-Han DAI Jian-Feng DING Wei-Min GUO Shi-Rong and LI Shi-Jun
(MOA Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Canopy transpiration of crops grown in greenhouses affects greenhouse air temperature and humidity and is therefore important for the optimization of greenhouse climate control. In this study, cucumbers (*Cucumis sativus*) were grown in a subtropical modern greenhouse under winter climate conditions, canopy transpiration was measured every 30 minutes and greenhouse microclimatic factors were sampled with 1 second interval and 30 minutes average values were saved in a datalogger and mean values of canopy resistance r_c and boundary layer resistance r_a were estimated based on experimental measurements made in the greenhouse. The Penman-Monteith equation was used to estimate canopy transpiration rates. The results showed that the diurnal time course of canopy transpiration rates followed that of the net radiation above the canopy with the daily maximum value occurring at 12:00. In contrast, maximum water vapor pressure deficit (VPD) occurred between 13:00 and 14:00. These results indicate that under winter climate conditions of China, subtropical greenhouse microclimate conditions are characterized by low VPD level and that daytime variations of crop canopy transpiration rates depend primarily on net radiation above the canopy. The daily maximum values of net radiation and VPD above the canopy and crop canopy transpiration rates were below $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 2.0 kPa and $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively; the ratio of latent heat caused by crop transpiration to the net radiation above the canopy in winter averaged 46%; and r_c and r_a were $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ and $600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, respectively. The crop canopy transpiration rate and total cumulative crop transpiration calculated by Penman-Monteith equations using both the actual r_c and r_a values and the mean values of r_c and r_a agreed well with the measured results. The determination of the ratio of latent heat to the net radiation above the canopy (46%) and the characteristic values of r_c ($= 100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) and r_a ($600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) facilitates the development of a crop transpiration model to optimize greenhouse climate and irrigation control systems. More experiments are needed to determine if these values are valid for other sites and types of greenhouses.

Key words Greenhouse, Cucumber, Transpiration rate, Subtropical area, Winter

温室作物蒸腾不仅直接影响到温室内空气温度和湿度状况,而且是现代温室中确定合理的作物肥水灌溉控制目标的主要依据。作物蒸腾一方面会消耗能量,使温室空气温度的升降变缓慢,另一方面会使空气湿度增大。降低温室空气湿度的办法是温室通风或加温。在冬季外界气温较低的情况下,不论是采用室通风还是加温来降低空气湿度都需要增加能耗。因此,温室环境优化控制系统应充分考虑作物蒸腾对温室环境的影响,才能达到优化和节能的环境控制目标。作物蒸腾与环境因子的定量关系是进行温室环境优化调控所必需的生理生态信息。由于作物蒸腾的测量费时费力,采用能量平衡法对作物蒸腾速率进行模拟计算成为获取作物蒸腾数据的有效手段。Penman-Monteith 方程是最常用的计算植物蒸腾速率和定量描述植物蒸腾与环境因子关系的方程,将它用于模拟计算温室作物蒸腾速率的研究国外已有不少报道(Stanghellini *et al.*, 1992; Bailey *et al.*, 1993; Baille & Baille, 1994; Segineer, 1994; Luo *et al.*, 2002)。在温室环境调控的实际应用中,如果用来模拟蒸腾速率和环境因子之间关系的公式具有较强的鲁棒性,就可以用它们来制订优化温湿度和肥水灌溉的计算机控制系统(Hamer & Munuz-Carpena, 1996)。为此,Morries 等通过试验研究表明,作物的蒸腾主要受温室内的太阳净辐射和空气饱和和水汽压差(VPD)的影响,而受CO₂浓度、加热管的温度和营养液传导率(Nutrient solution conductivity)的影响较小(Morries, 1957; de Graaf & van der Ende, 1981; Okuya & Okuya, 1988; Jolliet & Longuenesse, 1993; Yang *et al.*, 1990)。但这些研究主要限于气候下和(温湿度较为适中)的海洋性气候和地中海气候区(Maria, 1994; Boulard & Baille, 1997; Boulard & Wang, 2000; Leonardi *et al.*, 2000; Montero, 2001),其结果并不一定适用于我国(季风气候区)的温室环境。如Luo等(2002)的研究表明,我国南方现代温室黄瓜夏季蒸腾与温室内作物冠层上方的净辐射及空气饱和和水汽压差呈线性正相关。但由于夏季我国南方温室空气饱和和水汽压差(VPD ≤ 2.5 kPa)低于地中海地区(VPD 为 3.4 kPa),我国南方温室黄瓜夏季蒸腾消耗的潜热占冠层上方净辐射的比例(66%)低于地中海地区(80%) (Montero, 2001)。我国南方地区冬季太阳辐射较弱,为了保温的需要,冬季温室天窗基本处于关闭状态,以致温室内部相对湿度较高。这种弱光和高湿的环境不仅降低作物光合作用速率,而且易诱发病虫害,导致作物产量和品质下降。

而有关我国南方现代温室作物冬季蒸腾及其与环境因子的定量关系尚未见报道。随着无公害作物生产的发展,温室环境调控由以温度调控为核心逐渐向温湿度控制并重的方向发展。目前现代温室冬季环境调控中温度和湿度调控的设置点(Set-point)是相互独立设置的。这种控制方法几乎不可能同时实现温度和湿度的控制目标。因此,温度和湿度的优化耦合调控成为国际上温室冬季环境调控新的研究热点,而冬季作物蒸腾及其对温室环境的影响是必需的信息。

本研究通过南方温室冬季小气候和黄瓜(*Cucumis sativus*)作物蒸腾速率的实验观测,分析作物蒸腾速率的变化特征及其与各温室小气候要素之间的定量关系,并用实验观测资料检验用 Penman-Monteith 方程模拟我国南方地区冬季温室密闭条件下黄瓜作物蒸腾的可行性和鲁棒性,以期为我国南方现代温室冬季环境优化调控和肥水灌溉管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验基本情况

试验于 2002 年 1 月 27 日至 2 月 5 日在上海孙桥现代农业开发区内的荷兰 Venlo 型温室中进行(实际有效数据为 8 d)。该温室为南北走向,南北长 55 m,沿东西方向共分为 26 跨,每跨长 3.2 m,温室檐高 4 m,顶高 4.8 m。在每一跨屋脊的东西方向各有 14 扇天窗,天窗长 1 m,宽 0.5 m,全开时的开口高度为 0.4 m,试验期间天窗处于全闭状态。温室内部靠山墙有 2.5 m 的水泥过道,其余部分表面覆盖塑料膜,在膜上采用穴盘栽种黄瓜,穴盘内放置珍珠岩基质,灌溉采用滴灌。温室所有机构(包括灌溉系统)全部由计算机进行控制。至试验时黄瓜生育期为采收期。试验期间,外界气温、太阳辐射、空气相对湿度、风速等天气状况如表 1 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 温室环境参数测量

用数据采集器 Datalogger (Campbell Scientific CR10T)自动采集温室环境参数。数据采集频率为每秒 1 次,存储每 30 min 的平均值。采集的项目包括:①温室内部冠层高处(2.26 m)的空气温度、湿度;温室内部参考高度处(3.11 m)的空气温度、湿度。空气温度、湿度采用自制通风热电偶装置测量。通风热电偶装置由百叶箱、风扇和两只热电偶组成,一只热电偶用于测量干球温度,另一只热电偶用脱

表 1 室外气象要素
Table 1 Outside weather variables

室外气象要素 Outside weather parameters	1 月 27 日 Jan. 27th	1 月 28 日 Jan. 28th	1 月 29 日 Jan. 29th	1 月 31 日 Jan. 31st	2 月 1 日 Feb. 1st	2 月 2 日 Feb. 2nd	2 月 3 日 Feb. 3rd	2 月 5 日 Feb. 5th
最高温度 Maximum air temperature(℃)	8.4	7.1	8.7	9.0	10.9	12.3	12.8	12.7
最低温度 Minimum air temperature(℃)	1.6	0.8	-0.2	-0.4	2	1.4	-0.6	3.5
平均湿度 Average air humidity(%)	69.4	61.5	66.3	61.8	68.0	56.8	68.2	77.8
平均总辐射 Average global radiation(W·m ⁻²)	119	152	132	134	137	152	157	128
平均风速 Average wind speed(m·s ⁻¹)	1.68	1.09	1.08	0.92	0.88	1.03	0.71	0.77

脂棉缠绕(脱脂棉浸于蒸馏水中)用于测量湿球温度,风扇用于百叶箱强制通风(风速 $\geq 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。为了检验通风热电偶装置的可靠性,我们在试验前以经过标定的阿兹曼通风干湿表为标准,将通风热电偶装置测值、Vaisala 的温湿度传感器 HMW40Y 和 HMW70 测值与标准仪器阿兹曼通风干湿表测值进行系统的比较,发现通风热电偶装置温度测值与阿兹曼通风干湿表测值的误差在 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内 $\leq 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,其温湿度测值在温室环境下远比 Vaisala 的温湿度传感器 HMW40Y 和 HMW70 要稳定和可靠。2)进入温室内部的太阳总辐射和净辐射分别用 LI-200 型总辐射仪和 Q7.1-L 净辐射仪测量。

1.2.2 蒸腾速率、冠层消光系数和叶面积指数测量

蒸腾速率测量采用称重法。其方法是将一个穴盘置于支架上(穴盘内有 3 株植物),并将其顶端的悬挂绳也系于支架上,然后将支架整体放在电子秤上,由电子秤称出重量的改变即为蒸腾量。根据我们单独对珍珠岩基质本身蒸发的测量结果,得知试验期间珍珠岩基质本身的日蒸发量占穴盘内植株蒸腾和珍珠岩基质蒸发日总量的比例只有 3.6%,所以可以认为电子秤测得的重量损失即为作物的蒸腾量。蒸腾速率测量每天从 8:00 到 16:00 每 0.5 h 测量 1 次。电子秤的量程为 30 kg,误差 $< 5\text{ g}$ 。

冠层消光系数采用冠层分析仪 AccuPAR 测量。根据我们在温室甜瓜和黄瓜上的试验结果(资料待发表),采用冠层分析仪 AccuPAR 测量的叶面积指数与传统的取样称重法测得的数据基本一致。故本研究采用冠层分析仪 AccuPAR 测量叶面积指数。每天用冠层分析仪 AccuPAR 于 9:00、12:00、15:00 测量 3 次,每次测 5 个点,用平均值作为实际的叶面积指数。

1.2.3 气孔阻力、叶片温度和内部空气流速的测量

使用 LI-1600 稳态气孔计、505 MINOLTA 红外测温仪和热线式风速仪每天从 8:00 到 16:00 每 0.5 h 分别测量 1 次上中下 3 个不同高度上的叶片气孔阻力、叶片温度和温室内部的气流速度。并用不同高

度上的叶片气孔阻力平均值作为冠层的气孔阻力。

1.2.4 温室外部的气象参数以及温室的控制参数测量

温室外部的气象参数以及温室的控制参数由温室计算机控制系统采集。测量项目包括室外的温度、湿度、风速、风向、太阳总辐射以及温室天窗的开度。

1.3 蒸腾的模拟

由 Penman-Monteith 方程计算蒸腾(Monteith & Unsworth,1990),即:

$$\lambda E = \frac{R'_n \Delta + (\rho c_p / r_a) (e_a^* - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)}$$

(1)

式中 λ 为水的蒸发潜热($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$), E 为蒸发率($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), γ 为湿度计常数($= 0.064\text{ 6 kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), Δ 为饱和水汽压随温度变化曲线的斜率($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), R'_n 为冠层所得的净辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), ρc_p 为空气的定容比热($1\text{ 200 J}\cdot\text{m}^{-3}$), e_a^* 、 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa), r_c 为冠层对水汽的阻力(=气孔平均阻力)($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), r_a 为边界层空气动力学阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)。

$$R'_n = R_n (1 - e^{-k_s LAI})$$

(2)

式中 R_n 为冠层上方的净辐射, LAI 为叶面积指数, k_s 表示作物冠层消光系数。

$$r_a = 220 \frac{d^{0.2}}{V_i^{0.8}}$$

(3)

式中 d 为叶片的特征长度(黄瓜叶片为 0.25 m), V_i 为内部空气流速,可以通过室外的风速和通风窗的开度来计算(Maria,1994)。

2 结果与讨论

2.1 蒸腾速率、净辐射、空气饱和水汽压差(VPD)的日变化特征

辐射是温室的外部输入能量,也是作物进行光合作用和蒸腾的能量来源。而 VPD 的大小则决定了空气接受水汽的能力。在冬季温室天窗都关闭的情况下,太阳辐射和空气饱和水汽压差是决定作物蒸腾的主要环境因子。试验期间温室内作物冠层上

方的净辐射、参考高度上的 VPD 以及测量的黄瓜作物冠层蒸腾速率的变化如图 1 所示。从图 1 中可以看出,冬季室内作物蒸腾速率的日变化趋势与净辐射的日变化基本一致。作物蒸腾速率和净辐射在正午前后达一天中的最大值。除 1 月 29 日外,观测期间 VPD 的日最大值均出现在午后 1~2 h。1 月 29 日这一天午后 13:00 温室内 VPD 迅速降低,但作物蒸腾速率并没有随 VPD 的降低而下降,而是与净辐射的变化趋势保持一致。这是由于一方面冬季温室内 VPD 全天均处于较低水平($VPD < 2.0$ kPa),空气干燥力对作物蒸腾的直接贡献小;另一方面,在较低的 VPD 条件下,作物气孔阻力在上午 9:00 以后

一直维持在较低值($100 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$) (图 2),中午的 VPD 值($VPD < 2.0$ kPa)也不甚高,因而其降低气孔开度从而抑制蒸腾的影响也不明显。上述结果表明,在我国南方温室冬季高湿的环境下,作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射的日变化,而与 VPD 的日变化关系不大。

2.2 蒸腾速率和蒸腾量的模拟结果

根据公式(1)~(3)对试验期间的蒸腾速率和累积蒸腾量进行了模拟计算。Penman-Monteith 方法在温室环境调控的实际应用中的主要限制是冠层阻力 r_c 和边界层空气动力学阻力 r_a 的在线测量和计算都较为困难。但在现代温室环境下,作物往往得到

图 1 净辐射、VPD 与蒸腾速率的日变化
Fig.1 Time course of net radiation , VPD and transpiration rate

图 2 冠层气孔阻力的日变化
Fig.2 Diurnal time course of canopy stomatal resistance

良好的灌溉并且温室内气流速度比较稳定,使 r_c 和 r_a 的值均较为稳定。根据 Goudriaan(1977),对于一个得到良好灌溉的作物冠层,其冠层阻力 r_c 值为 $100 \sim 200 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。 r_c 值与太阳辐射有关。我们的观测结果也表明,只要太阳总辐射 $> 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,气孔阻力基本在 $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右(图 3)。根据观测资料,试验期间温室内白天平均风速为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由公式(3)计算得边界层空气动力学阻力 r_a 的值为 $600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。采用实际变化的 r_c 和 r_a 值和固定的 $r_c (= 100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $r_a (= 600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1})$ 值模拟的植物冠层蒸腾速率和累积蒸腾量与实测结果的比较如图 4 所示。从图 4 可以看出,无论是采用实际变化的 r_c 和 r_a 值还是采用固定的 r_c 和 r_a 值,模拟的蒸腾速率和累积蒸腾量与实测值的一致性均较好。采用实际变化的 r_c 和 r_a 值和采用固定的 r_c 和 r_a 值,模拟蒸腾速率与

实测值之间相关系数均为 $R^2 = 0.74$,标准差 $SE = 27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。采用实际变化的 r_c 和 r_a 值,模拟的累积蒸腾量与实测结果之间相关系数 $R^2 = 0.99$,标准差 $SE = 0.17 \text{ mm}$ 。采用固定的 r_c 和 r_a 值,模拟的累积蒸腾量与实测结果之间相关系数 $R^2 = 0.99$,标准差 $SE = 0.23 \text{ mm}$ 。这些结果表明,采用 Penman-Monteith 方法模拟我国南方冬季温室黄瓜蒸腾速率和蒸腾量较为可靠。Luo 等(2002)对同一温室夏季黄瓜蒸腾的研究结果也表明, Penman-Monteith 方法模拟我国南方夏季温室黄瓜蒸腾速率和蒸腾量也较为可靠。因此, Penman-Monteith 方程在计算南方温室作物蒸腾方面表现出一定的鲁棒性。

2.3 蒸腾速率与净辐射之间的定量关系

净辐射是蒸腾的能量驱动力。根据试验观测资料分析发现,蒸腾速率与冠层上方净辐射呈线性相关(图 5)。从图 5 可以看出,到达作物冠层上方的净辐射平均只有 46% 通过作物的蒸腾转化为潜热。而根据 Luo 等(2002)对同一温室夏季黄瓜蒸腾的研究结果,夏季到达作物冠层上方的净辐射平均有 66% 通过作物的蒸腾转化为潜热。冬季作物蒸腾占到达作物冠层上方的净辐射的比例比夏季低 20%。这是由于冬季太阳辐射较弱(冬季试验期间白天平均室内总辐射为 $187 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,夏季试验期间白天平均室内总辐射为 $238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),室内温度较低(冬季试验期间白天平均温室气温为 $26.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季试验期间白天平均气温为 $31.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$),使温室内空气饱和水汽压差维持较低水平(冬季试验期间白天平均 VPD

图 3 冠层气孔阻力与总辐射之间的关系
Fig.3 The relationship between canopy stomatal resistance and global radiation

图 4 蒸腾速率(a)和累积蒸腾量(b)模拟值与实测值的比较

Fig.4 Comparison between simulated and measured transpiration rate(a) and accumulated transpiration(b)
——1:1 直线 The 1:1 line ◆用实际变化的 r_c 和 r_a 值的模拟结果 The simulated value using actual varying r_c and r_a values ○用固定的 $r_c = 100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $r_a = 600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 值的模拟结果 The simulated value using fixed $r_c = 100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ and $r_a = 600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ values

图5 实测蒸腾速率与冠层上方净辐射之间的关系
Fig.5 Relationship between measured transpiration rate and net radiation above canopy
■观测值 Measured data ———回归关系线 $Y = 0.459\ 5x$, $R^2 = 0.606\ 1$ The regression line with $Y = 0.459\ 5x$, $R^2 = 0.606\ 1$

为 0.92 kPa,夏季试验期间白天平均 VPD 为 1.68 kPa),加上温室密闭不通风(冬季试验期间白天平均室内空气流速为 $0.2\ m\cdot s^{-1}$,夏季试验期间白天平均室内空气流速为 $0.5\ m\cdot s^{-1}$),导致作物蒸腾减弱,使辐射能通过作物蒸腾作用而转化成潜热的比例较低。根据 2.1 节的分析结果,在我国南方温室冬季高湿的环境下,作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射的日变化。因此,利用所确定的作物蒸腾消耗潜热占冠层上方净辐射的比例和太阳辐射的测值,就可以确定出作物的蒸腾耗水量,从而为温室作物灌溉管理提供依据。

3 结 论

作物蒸腾一方面会消耗能量,使温室空气温度的升降变缓慢,另一方面会使空气湿度增大。降低温室空气湿度的办法是温室通风或加温。在冬季外界气温较低的情况下,不论是采用室通风还是加温来降低空气湿度都需要增加能耗。因此,温室环境优化控制系统应充分考虑作物蒸腾对温室环境的影响,才能达到优化和节能的环境控制目标。采用能量平衡法模拟计算作物蒸腾速率是获取作物蒸腾数据的有效手段。基于能量平衡的作物蒸腾模拟模型机理性较强,但模型中冠层阻力(r_c)和边界层空气动力学阻力(r_a)两参数的测量装置较环境因子的复杂,且其测量费时费力,一般只是在试验研究中进行,因而限制了能量平衡模型在温室环境调控中的实际应用。 r_c 和 r_a 两参数因环境因子(r_c 受太阳辐射、 VPD 和作物水分供应状况影响, r_a 受室内空气流速)不同而差异很大。但在现代温室环境下,由于作物得到良好的灌溉,温室内气流速度比较稳定,

VPD 维持较低水平,因此 r_c 和 r_a 的值在同一季节里均较为稳定。而且现代温室一般配有环境因子(光、温、湿、风等)数据自动采集器。如果 r_c 和 r_a 在各个季节的特征值可以根据作物特点和各个季节温室环境数据计算和确定(如用公式(3)和图3),则有助于将能量平衡模型结合到温室环境控制系统中,实现温室环境和肥水灌溉的优化调控。该研究通过温室小气候和作物蒸腾与气孔阻力的实验观测,分析了作物蒸腾速率与温室小气候因子的定量关系,确定了南方现代温室冬季黄瓜作物冠层的 r_c 和 r_a 的特征值和作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例,并采用 Penman-Monteith 方法模拟计算了冬季温室内黄瓜作物蒸腾速率。结果表明,冬季温室内作物蒸腾速率的日变化趋势与净辐射的日变化基本一致,正午前后达一天中的最大值。冠层上方的净辐射和 VPD 及作物冠层蒸腾速率日最大值分别在 $350\ W\cdot m^{-2}$ 、2.0 kPa 和 $200\ W\cdot m^{-2}$ 以下。冬季温室作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例为 46%。采用实际 r_c (测量的)与 r_a (根据测量的风速用公式(3)计算的)值和 r_c 与 r_a 的特征值计算的作物蒸腾速率和累积蒸腾量均与实测值基本一致。Luo 等(2002)对同一温室黄瓜作物夏季的研究也得到同样的结果。这表明用 Penman-Monteith 方法计算南方温室作物蒸腾速率和累积蒸腾量具有一定的鲁棒性。但该研究采用的 r_c 和 r_a 特征值在其它地区和其它类型温室是否适用,尚需进一步的实验资料来证明。综合该研究的结果可以得出以下结论:1)在我国南方温室冬季高湿的环境下,作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射日变化。冬季温室作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例为 46%。2)在现代温室环境中, r_c 和 r_a 的值均较为稳定。用 Penman-Monteith 方法模拟我国南方现代温室黄瓜作物冬季蒸腾速率,无论是采用实际变化的 r_c 和 r_a 值还是采用 r_c 和 r_a 的特征值,模拟的蒸腾速率和累积蒸腾量与实测值的一致性均较好。因此可以采用 r_c 和 r_a 的特征值模拟计算作物蒸腾速率。该研究所确定的 r_c 和 r_a 特征值分别为 $100\ s\cdot m^{-1}$ 和 $600\ s\cdot m^{-1}$ 。3)作物蒸腾消耗的潜热占到达冠层上方的净辐射的比例及 r_c 和 r_a 特征值的确定为研制基于作物蒸腾模型的温室环境和肥水灌溉的优化控制系统奠定了基础。但该研究所确定的这些特征值是否适合其它地区和其它类型温室,尚需进一步的实验资料来证明。

参 考 文 献

- Bailey, B., J. Montero, C. Biel, D. Wilkinson, A. Anton & O. Jolliet. 1993. Transpiration of *Ficus benjamina*. *Agricultural and Forest Meteorology*, **65**:229 ~ 243.
- Baille, M. & A. Baille. 1994. Delmon-D, microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, **71**:83 ~ 97.
- Boulard, T. & A. Baille. 1997. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, **88**:111 ~ 119.
- Boulard, T. & S. Wang. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**:25 ~ 34.
- de Graaf, R. & J. van der Ende. 1981. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops. *Acta Horticulturae*, **119**:147 ~ 158.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Simulation monographs. Wageningen: Pudoc. 73 ~ 86.
- Hamer, P.J.C. & R. Munuz-Carpena. 1996. Validation of a model used for irrigation control of a greenhouse crop. *Acta Horticulturae*, **458**:75 ~ 81.
- Jolliet, O. & J.J. Longuenesse. 1993. Modelling of water uptake, transpiration and humidity in greenhouse and of their effects on crops. *Acta Horticulturae*, **328**:69 ~ 78.
- Leonardi, C., A. Baille & S. Guichard. 2000. Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments. *Scientia Horticulturae*, **84**:297 ~ 307.
- Luo, W. H., X. H. Wang, W. M. Ding, Y. Q. Chen & J. F. Dai. 2002. Subtropical modern greenhouse cucumber canopy transpiration under summer climate condition. *Agricultural Sciences in China (中国农业科学)*, **1**:1260 ~ 1265.
- Maria, B. 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, **71**:83 ~ 97.
- Monteith, J. L. & M. H. Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. 2nd ed. London: Edward Arnold. 168 ~ 189.
- Montero, J. 2001. Transpiration from geranium growth under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**:323 ~ 332.
- Morries, L. G. 1957. The transpiration of glasshouse crops and its relationship to the incoming solar radiation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **2**:111 ~ 122.
- Okuya, A. & T. Okuya. 1988. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Horticulturae*, **230**:307 ~ 311.
- Segineer, I. 1994. Transpiration cooling of a greenhouse crop with partial ground cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, **71**:265 ~ 281.
- Stanghellini, C., W. Meurs & W. van Meurs. 1992. The environmental control of crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **51**:297 ~ 311.
- Yang, X., T. Short & R. Fox. 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, **51**:197 ~ 209.

责任编辑 : 王天铎 责任编辑 : 周玉荣