文章编号:1000-7601(2019)04-0043-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.06

# 北方寒区日光温室冬季基质袋培 番茄蒸腾量模拟

罗新兰1,王 淼1,4,佟国红2,张函奇1,李英歌1,尹佳琪1,杨丽桃3

(1.沈阳农业大学农学院,辽宁沈阳 110866; 2.沈阳农业大学水利学院,辽宁沈阳 110866;3.内蒙古自治区气候中心,内蒙古呼和浩特 010051;4.锦州市气象局,辽宁 锦州 121000)

摘 要:北方寒区日光温室冬季生产基本无通风,为了探寻室内弱光、高湿、低温及低风速环境下的番茄蒸腾量 模拟模型,基于 Penman-Monteith(P-M)方程及适应此特定环境的边界层空气动力学阻力、气孔平均阻力、土壤热通 量等参数模拟了温室长季节栽培番茄(Lycopersicon esculentum Mill)单株的蒸腾速率并进行了试验验证,揭示了蒸腾 速率与净辐射、饱和水汽压差的日变化规律,确定了蒸腾速率与植株上方净辐射的定量关系,检验了土壤热通量取 值对蒸腾速率的影响。结果显示:2017-12-11—2018-01-03 室内太阳总辐射最大值 367 W·m<sup>-2</sup>、夜晚及阴天相对 湿度接近 100%、室内风速接近 0 m·s<sup>-1</sup>的情况下,单株植株边界层空气动力学阻力变化范围晴天为 147~438 s·m<sup>-1</sup>,阴天为 211~365 s·m<sup>-1</sup>;气孔平均阻力晴天 69~1 506 s·m<sup>-1</sup>,阴天 132~1 151 s·m<sup>-1</sup>;P-M 方程模拟的单 株番茄逐时蒸腾速率在晴天、阴天中午的平均值分别为 0.06、0.02 mm·h<sup>-1</sup>,模拟值与实测值比较,平均相对误差约 为 10%。研究还表明,单株番茄上方净辐射量的 43.5%通过蒸腾作用转化为潜热;试验环境下,土壤热通量的取值变 化对蒸腾速率影响不大。研究确定的蒸腾速率估算模型可为北方寒区冬季日光温室基质袋培番茄蒸腾量估算以及 水分管理提供参考。

关键词:北方寒区;日光温室;番茄:基质袋培;蒸腾量:土壤热通量 中图分类号:S641.2 文献标志码:A

## Simulation of tomato transpiration with nutrient substrate bag-cultivation in solar greenhouse during winter in the cold region of Northern China

LUO Xin-lan<sup>1</sup>, WANG Miao<sup>1,4</sup>, TONG Guo-hong<sup>2</sup>, ZHANG Han-qi<sup>1</sup>,

LI Ying-ge<sup>1</sup>, YIN Jia-qi<sup>1</sup>, YANG Li-tao<sup>3</sup>

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China;

2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China;

3. Inner Mongolia Climate Center, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China;

4. Jinzhou Meterological Bureau, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract: Crop production in solar greenhouse (CSG) in the cold region of northern China is usually performed under the environment of no ventilation, low light intensity, high humidity, and low temperature. Thus, the crop transpiration is different from those in other kind of greenhouses and in ventilated CSGs. Tomato is the most common crop grown in greenhouses. In this study, a tomato transpiration model based on the Penman–Monteith (P–M) equation, aerodynamic resistance, average stomatal resistance, soil heat flux, and other parameters for the particular environment was used to estimate the transpiration rate of a tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) and validated by experiments. In this model, aerodynamic resistance model was based on free convection and the stomatal average resistance model was inversed by measured transpiration rate and P-M equation. Heat conduction transfer into soil deep was taken as 0.35 times of net radiation during the daytime and 0.13 times during the nighttime. A

收稿日期:2018-06-26 修回日期:2018-09-10

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD0300401);国家高技术研究发展计划("863"计划)(2013AA102407)

作者简介:罗新兰(1968-),女,黑龙江依兰人,副教授,主要从事应用气象、作物模拟系统及设施环境科学与工程方面的研究。E-mail:luoxinlan@ tom.com

通信作者:佟国红(1966-),女,辽宁北票人,教授,主要从事设施园艺环境与工程研究。E-mail:tongguohong@hotmail.com

sensitivity analysis was conducted for the influence of different soil heat flux on tomato transpiration rates. Based on this model, the study revealed the daily variations of transpiration rate, net radiation, and saturation vapor pressure as well as the quantitative relationship between transpiration rate and net radiation above single plant. The results showed that, during experiment period from December 11, 2017 to January 3, 2018, with a maximum daily solar radiation of 367 W  $\cdot$  m<sup>-2</sup>, near 100% relative humidity at night and during cloudy day, nearly 0 m/s air velocity, for single plant, the aerodynamic resistance changes ranged from 147 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> to 438 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> during clear days and from 211 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> to 365 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> in cloudy days; the average resistance of stomatal was from 69 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> to 1 506 s  $\cdot$ m<sup>-1</sup> during clear days and from 132 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> to 1 151 s  $\cdot$  m<sup>-1</sup> in cloudy days. The average transpiration rate of single tomato simulated by the P–M equation was 0.06 mm  $\cdot$  h<sup>-1</sup> at noon on a sunny day and 0.02 mm  $\cdot$  h<sup>-1</sup> at noon on a cloudy day, with about 10% of the Mean Relative Error of simulated values. The results also showed that 43.5% of the net radiation above plant was transformed into latent heat by transpiration and the changes of soil heat flux had insignificant influence on the transpiration rate under current experiment conditions. Thus, the transpiration rate simulation model could be used to estimate single tomato transpiration in winter in the cold region of northern China and also give indication for water management inside CSG.

Keywords: the northern cold region; solar greenhouse; tomato; nutrient substrate bag-cultivation; transpiration; soil heat flux

冬季日光温室是个相对封闭的生产环境,室外 温度很低,室内很少通风,作物蒸腾是作物冠层与 室内空气之间进行水汽、能量交换的主要途径,会 直接影响室内温湿度和能量平衡,作物蒸腾消耗热 能降低室内空气温度,释放水汽增加室内湿度,室 内湿度的改变又会影响作物蒸腾及病虫害的发生。 人工测量作物蒸腾费时费力,利用彭曼公式计算作 物需水量是联合国世界粮农组织推荐的一种计算 方法<sup>[1]</sup>,Monteith 在 1963 年对 Penman 方程进行改 进,提出 Penman-Monteith(P-M)方程,其以能量平 衡为依据,加之水汽扩散为基础,适用于任何作物 蒸腾量的直接计算<sup>[2-3]</sup>。Moritlle 等<sup>[4]</sup>验证了温室 条件下采用 P-M 方程计算作物蒸腾量的可行性。

Boulard 等<sup>[5]</sup>及 Demrati 等<sup>[6]</sup>提出基于 P-M 方 程,综合了室内能量平衡和室外气象数据建立了温 室作物蒸腾模型,结果显示当温室处于通风状态 时,蒸腾模型模拟结果良好。罗卫红等<sup>[7]</sup>,汪小旵 等<sup>[8]</sup>应用 P-M 方程分别模拟南方冬季和夏季现代 化温室黄瓜蒸腾情况,结合室内净辐射及饱和水汽 压差(VPD)分析蒸腾速率的日变化,在冬季,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;在夏季,作物蒸腾速率 对太阳辐射和 VPD 的变化敏感性相同。番茄是温 室内的主要作物,专家学者为探寻温室条件下番茄 的蒸腾规律及影响因素,在塑料大棚<sup>[5]</sup>、玻璃温 室<sup>[9]</sup>、防虫遮阳网温室<sup>[10]</sup>、日光温室<sup>[11-16]</sup>环境下, 开展了深入研究。由于影响蒸腾的因素较多且很 多参数很难精确测定,目前还缺乏通用的、精准的、 用于温室不同条件下的番茄蒸腾模型。

温室中基质袋培可避免土壤的连作障碍和土 传性病虫害的蔓延,具有管理方便、原料资源丰富、 经济环保等特点。北方寒区日光温室冬季生产基 本无通风,室内弱光、高湿、低温及低风速,为确定 该环境下单株番茄蒸腾量模拟模型,本研究以 P-M 方程为基础,采用室内单株尺度下气象环境特征对 应的边界层空气动力学阻力、气孔平均阻力反演模 型并引入土壤热通量参数,得到一个基于温室内气 象数据(温度、相对湿度、太阳辐射等)和植株生长 指标(茎粗、单株叶面积指数等)计算地面覆盖塑料 薄膜的北方寒区日光温室冬季基质袋培单株番茄 蒸腾量的方程。根据伍德林等[17]研究显示作物吸 收水分的近99.8%用于植株蒸腾作用,因此可用插 针式茎流计测定植株茎流量作为实测值对单株植 株蒸腾模拟结果进行验证。单株番茄蒸腾量的模 拟可为北方寒区冬季番茄滴灌的灌溉量确定提供 参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 试验概况

试验于 2017-12-11—2018-01-03 在沈阳农业 大学北山科研基地日光温室(123°5′E,41°8′N)内进 行。温室方位南偏西 7°,东西长度 60 m,跨度 7.5 m,脊高 3.5 m,北墙高 2.3 m,墙体厚 45 cm,北墙外 侧设有冷棚,试验期间揭帘时间 8 : 30,盖帘时 间14 : 30。

供试番茄品种为适于北方日光温室长季节栽

培的圣罗兰。植株采用南北成行基质袋培,每行铺 有一条滴灌管,各滴头与各植株相对应,滴头出水 口插于栽培袋中间位置(晴天时于9:00、12:00、 14:00分别灌溉100 ml·株<sup>-1</sup>·次<sup>-1</sup>),基质水分控 制在田间持水量 80%以上,地面覆盖塑料薄膜(无 裸露土壤),行距1 m,株距20 cm,共定植 920 株,定 植密度为 3.38 株·m<sup>-2</sup>。选择长势良好的3 株番茄 作为测试样本。温室顶部通风口可人工开启,晴天 中午室内温度超过 30℃时通风口打开 10 cm 进行 通风,平均通风时间为 15 min。其余时间处于密闭 状态,试验期间植株处于成熟采摘期,茎粗 1.41~ 1.48 cm、株高 188.3~193.6 cm。

#### 1.2 观测方案及布置

室内中部安装 HOBO 自动气象站以获取试验 所需基本气象数据(辐射、温度、相对湿度、土壤含 水量等);番茄群体中间安装北京雨根公司的环境 及茎流监测仪,测定项目包括:植株上方的太阳净 辐射、植株的茎流值、空气温湿度、叶温(用与叶片 相同颜色的绿色别针将热电偶与叶片固定);采用 热球风速仪测量植株上方微风速。试验期间 24 h 连续测试,取样间隔为10 min,蒸腾速率估算中用到 的相关气象要素观测项目及仪器位置见表1。

#### 表1 日光温室内气象要素观测项目及仪器位置

## Table 1 Meteorological parameters tested and

| •          | •.•      | •  | CCC |
|------------|----------|----|-----|
| instrument | position | ın | 626 |

| 观测项目<br>Measured items   | 距室内地面位置/m<br>Position above ground |
|--------------------------|------------------------------------|
| 总辐射 Global radiation     | 2                                  |
| 净辐射 Net radiation        | 2                                  |
| 茎流 TDP flow              | 0.5                                |
| 空气温度 Air temperature     | 2                                  |
| 空气相对湿度 Relative humidity | 2                                  |
| 叶片温度 Leaf temperature    | 0.5,1,1.5                          |
| 风速 Air velocity          | 2                                  |
| 基质含水量                    | 栽培袋中间                              |
| Water content of N-S     | Middle of cultivation bag          |

本试验采用插针式茎流计测量番茄蒸腾速率 作为实测值。用公式(1) 对每株实测数据  $\Delta T$  做统 计学分析,修正不合理的  $\Delta T$  值

$$\Delta T' = \begin{cases} \overline{\Delta T_5} - 1.96SE & \Delta T \leq \overline{\Delta T_5} - 1.96SE \\ \Delta T & \overline{\Delta T_5} - 1.96SE < \Delta T < \overline{\Delta T_5} + 1.96SE \\ \overline{\Delta T_5} + 1.96SE & \Delta T \geq \overline{\Delta T_5} + 1.96SE \end{cases}$$

(1)

式中, $\Delta T'$ 为两探针之间温差修正值; $\Delta T$ 为实测两 探针之间温差; $\Delta T_5$ 为与 $\Delta T$ 相对应滑动长度为5的  $\Delta T$ 原序列的滑动平均值,SE为相应滑动标准差。

将修正后的数据采用以下计算式得出茎流

速率。

之间温差。

根据 Granier 提出的基本计算方法<sup>[18]</sup>,其计算 植株茎流速率的公式如下:

$$F_d = 118.99 \times 10 - 6K^{1.231} \tag{2}$$

式中, $F_d$ 为茎秆液流速率( $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ );K为系数。

 $K = (\Delta T'_m - \Delta T') / \Delta T'$  (3) 式中, $\Delta T'_m \Delta T'$ 为液流速率为零和不为零时两探针

将上述液流速率转换为质量形式,即[19]:

$$F_s = 3600 \times F_d \rho A_s \tag{4}$$

式中, $F_s$ 为质量形式茎秆液流速率( $g \cdot h^{-1}$ ); $F_d$ 为茎 秆液流速率( $m \cdot s^{-1}$ ); $\rho$  为水密度( $g \cdot m^{-3}$ ); $A_s$ 为茎 秆横截面积( $m^2$ )。

将 F<sub>s</sub>带入下式可计算出单株植株实测蒸腾速率值<sup>[20-21]</sup>:

$$T_f = \frac{F_s LAI}{1000La} \tag{5}$$

式中, $T_f$ 为单株植株蒸腾速率(mm·h<sup>-1</sup>);La为植株 监测探针上方的叶面积(m<sup>2</sup>);LAI为单株叶面积指数(某株植株叶面积/某株植株占地面积)。

#### 1.3 分析方法

1.3.1 单株叶面积指数(LAI) 叶面积采用主干上 主叶长宽系数法计算,测量主叶的叶长(包括叶柄 长度)和最大叶宽,计算公式如下<sup>[22]</sup>:

$$LA = \begin{cases} 0.3782ab & 0 \text{ cm} < a \le 20 \text{ cm} \\ 0.3184ab & a > 20 \text{ cm} \end{cases}$$
(6)

式中,LA为叶面积(cm<sup>2</sup>);a为叶片长度(cm);b为 叶片宽度(cm)。LAI = LA/单株植株占地面积。

1.3.2 消光系数(K) 根据比尔 – 朗伯特(Beer – Lambert) 定律得到:

$$K = -\frac{1}{LAI} \ln \frac{I}{I_0} \tag{7}$$

式中,*LAI*为单株叶面积指数;*I*,*I*<sub>0</sub>分别为单株尺度的地面和植株上方的总辐射(W·m<sup>-2</sup>)。计算每日9:00—14:00内每10min的消光系数,根据冯新灵等<sup>[23]</sup>研究建议剔除不合理的消光系数数据(即K > 1的数据),再以日为单位将合理数据均值后作为每日的消光系数。

1.3.3 采用 Penman - Monteith 方程模拟日光温室 基质袋培单株植株蒸腾量 在考虑土壤热通量、并 结合密闭环境下的边界层空气动力学阻力计算式 及气孔平均阻力反演式, Penman - Monteith 方程计 算温室内单株植株蒸腾量的基本式可转换为<sup>[24-26]</sup>:

$$\lambda E = \frac{(R'_n - G)\Delta + (\rho c_p / r_a)(e_a^* - e_a)}{[\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)]} \quad (8)$$

式中, $\lambda$  为水的蒸发潜热,2.45×10<sup>6</sup> J·kg<sup>-1</sup>;*E* 为蒸 发率(kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>);*R*'<sub>a</sub> 为单株植株所得净辐射(W ·m<sup>-2</sup>);*G* 为土壤热通量(W·m<sup>-2</sup>); $\Delta$  为饱和水汽压 随温度变化曲线斜率(kPa·℃<sup>-1</sup>); $\rho$  为空气密度, 1.205 kg·m<sup>-3</sup>;*C*<sub>p</sub> 为空气定压比热,1005 J·kg<sup>-1</sup>· ℃<sup>-1</sup>;*r*<sub>a</sub> 为单株植株的边界层空气动力学阻力(s· m<sup>-1</sup>);*e*<sup>\*</sup><sub>a</sub> 为饱和水汽压(kPa);*e*<sub>a</sub> 为实际水汽压 (kPa); $\gamma$  为湿度计常数,0.0646 kPa·℃<sup>-1</sup>;*r*<sub>c</sub> 为单 株植株对水汽的阻力(气孔平均阻力,s·m<sup>-1</sup>)。

$$R'_{n} = R_{n}(1 - e^{-K \cdot LAI})$$
(9)

式中, $R_n$  为单株植株上方净辐射( $W \cdot m^{-2}$ );K 为消 光系数;LAI 为单株叶面积指数。

根据 Goudriaan 和 Van<sup>[27]</sup>:

$$\Delta = 4158.6 e_{a(t_a)}^* / (t_a + 239)^2$$
(10)

式中, $t_a$  为室内空气温度( $\mathbb{C}$ ); $\Delta$  为饱和水汽压随温 度变化曲线斜率( $kPa \cdot \mathbb{C}^{-1}$ )。

$$e_a^* = 0.6107 e^{[17.74t_a/(t_a+239)]}$$
 (11)

式中, $e_a^*$ 为 $t_a$ 下的饱和水汽压(kPa)。

联合国粮食及农业组织(简称 FAO)推荐土壤 热通量 G白天采用  $0.5R_n$ ,夜间采用  $0.1R_n^{[3]}$ ,本文根 据北方寒区日光温室揭、盖帘时间对应的温室内日 照时数对 G进行修正,白天采用  $0.35R_n$ ,夜间采用  $0.13R_n$ ,后文对此取值进行敏感性检验。

1.3.4 边界层空气动力学阻力(r<sub>a</sub>) 叶片与周围 环境热交换形式与r<sub>a</sub>大小密切相关<sup>[28]</sup>,风是作物与 周围环境进行物质和能量交换的动力来源,其大小 决定热交换速率,Stanghellini<sup>[29]</sup>研究表明在任何温 室中均会发生以混合对流形式存在的对流热交换, 即自由对流与强迫对流的混合,当室内风速低于0.2 m·s<sup>-1</sup>时,强迫对流对r<sub>a</sub>影响很小,可忽略。

根据 Campbell<sup>[30]</sup> 研究结果,北方寒区冬季日 光温室密闭条件下由叶温与周围空气温度差值引 起的自由对流对 r<sub>a</sub> 起决定作用,计算公式如下:

$$r_{a1} = 840 \left( \frac{d}{|T_l - T_a|} \right)^{1/4}$$
(12)



式中, $r_{a1}$ 为单一叶片边界层空气动力学阻力(s・m<sup>-1</sup>);d为叶片特征长度(m)(本试验取值0.15 m);  $T_l$ 为叶片温度( $\mathbb{C}$ ); $T_a$ 为周围空气温度( $\mathbb{C}$ ); $r_a$ 为 单株植株边界层空气动力学阻力(s·m<sup>-1</sup>);LAI为单 株叶面积指数。

1.3.5 单株植株对水汽的阻力(气孔平均阻力, r<sub>c</sub>) 作物通过叶片气孔与周围环境进行显热交换 和水分传输,交换和传输过程中受气孔阻力控制, 由于影响温室内气孔平均阻力的主要因素包括室 内总辐射、温度、饱和水汽压差等气象因子,因此可 以通过反演的方式计算出植株样本 a 的 r<sub>c</sub> 值。r<sub>c</sub> 计 算表达式如下所示:

$$r_{c} = r_{a} \left[ \frac{(R'_{n} - G)\Delta + (\rho C_{p} / r_{a})(e_{a}^{*} - e_{a}) - \Delta \lambda E}{\gamma \lambda E} - 1 \right]$$
(14)

式中, $\lambda E$ 为植株 a 的实测蒸腾潜热值( $W \cdot m^{-2}$ ); $r_a$ 为植株 a 的边界层空气动力学阻力( $s \cdot m^{-1}$ );其余物理量为植株 a 单株尺度对应的数值且意义同前。

## 2 结果与分析

将公式(14) 计算的  $r_e$  值、植株 b、c 相对应的  $r_a$ 值及生理指标(*LAI*) 值代入公式(8),计算 b、c 株蒸 腾速率模拟值,并与其相应的实测值比较分析,检 验 P - M 方程模拟效果。由 1.3.1 计算的试验期间 *LAIa* = 1.18,*LAIb* = 1.05,*LAIc* = 1.08。

## 2.1 日光温室内单株植株边界层空气动力学阻力 与气孔平均阻力的变化规律

选取试验期间有典型天气的 2017 年 12 月 13—25 日(其中13 日与17 日为雾霾天、14 日与24 日 为阴天,其余时间为晴天) 连续13 d 的测试值计算植 株 a 的边界层空气动力学阻力(*r<sub>a</sub>*) 值、气孔平均阻力 (*r<sub>e</sub>*) 值,*r<sub>a</sub>* 与 *r<sub>e</sub>* 在不同天气变化情况如图 1 所示。



图 1 冬季日光温室内单株番茄边界层空气动力学阻力(a) 与气孔平均阻力(b) 变化规律(2017 年 12 月 13—25 日) Fig.1 Variation of aerodynamic resistance and leaf stomatal resistance of single tomato plant in CSG during winter (Dec.13 – 25, 2017)

由图 1(a) 可见, $r_a$  晴天白天的波峰在 10:00, 变化范围为 259 ~ 438 s·m<sup>-1</sup>;波谷在 15:00,变化 范围为 147 ~ 198 s·m<sup>-1</sup>。阴天白天波峰在 11:00, 变化范围为 297 ~ 365 s·m<sup>-1</sup>,波谷在 13:00,变化 范围为 211 ~ 243 s·m<sup>-1</sup>。这是由于 10:00 时 |  $T_l$  –  $T_a$  | 最小,放帘后半小时左右 |  $T_l - T_a$  | 达最大值, 在中午 |  $T_l - T_a$  | ≈ 5°С, $r_a \approx$  180 s·m<sup>-1</sup>,阴天时太 阳辐射弱,室内温度变化慢,在 11:00 左右 |  $T_l - T_a$ | 达最小值,13:00 左右 |  $T_l - T_a$  | 即达最大值。

由图 1(b) 可见,*r*。晴天、阴天白天的波峰在 7:00,变化范围分别为820~1506、749~1151s・ m<sup>-1</sup>,波谷在11:00—13:00,变化范围分别为69~ 205、132 ~ 208 s · m<sup>-1</sup>。这是因为  $r_e$  主要取决于室 内总辐射的变化,总辐射越高,  $r_e$  越小,冬季 8 : 30 – 14 : 30 为揭帘时间室内总辐射为正值,其余时间室 内总辐射为 0,日出后室内总辐射迅速上升,  $r_e$  随即 下降, 11 : 00 – 13 : 00 单株植株分得的总辐射在一 天中最大值约为 100 W · m<sup>-2</sup>,  $r_e$  达到最低值,约为 158 s · m<sup>-1</sup>。

## 2.2 日光温室内单株植株蒸腾速率模拟值与实测 值比较

将室内单株尺度的气象要素及相关公式带入公式(8)计算植株 b、c 的模拟值并与其相对应的茎流计 实测值进行逐时蒸腾速率对比,结果如图 2 所示。





由图 2 可知,逐时蒸腾速率模拟值的最大值在 晴天约为0.06 mm · h<sup>-1</sup>,阴天约为0.02 mm · h<sup>-1</sup>,晴 天、阴天均与实测值相当,而雾霾天实测值超过模 拟值约为0.015 mm · h<sup>-1</sup>,误差较大。这是因为在晴 天、阴天室内各气象数据均是较规律的变化,而雾 霾天随大气透明度的变化,室内气象数据发生不规 律变化。由于北方冬季夜间或早晚室外温度低时 温室覆保温被以保证室内温度满足植株生理活动 的最低要求,早、晚覆保温被期间室内总辐射为0, 蒸腾速率很小甚至为0,因此,为进一步说明模型拟 合精度,计算整个试验期间所有晴天与阴天(除去 所有雾霾天)植株 b、c 的模拟值与实测值 24 h 的累 计蒸腾量,结果如图 3 所示

由图 3 可以看出植株 b、c 的 24 h 累计蒸腾量 模拟值与实测值一致性较好,植株 b 的  $R^2$  = 0.9228、 截距为 0.0046 mm · d<sup>-1</sup>;植株 c 的  $R^2$  = 0.9594、截距 为0.0115 mm · d<sup>-1</sup>。单株日累计蒸腾量晴天变化范 围为 0.22~0.36 mm · d<sup>-1</sup>,阴天为 0.08~0.15 mm · d<sup>-1</sup>,用 1 : 1 检验法对植株 b、c 累计蒸腾量模拟值 与实测值对比分析结果表明:24 h 日累计蒸腾量均 匀分布于 y=x 直线两侧,为进一步说明误差大小,



### 图 3 冬季日光温室内单株番茄晴天与阴天 24 h 累计蒸腾量 模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and measured accumulated transpiration values of single tomato plant in CSG during winter 分别计算两株植株整个试验阶段 24 h 累计蒸腾量 模拟值与实测值的平均相对误差(MRE)和平均绝 对误差(MAE),计算表达式为:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right| \right)$$
(15)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (|y_i - x_i|)$$
(16)

式中,n为测试蒸腾量天数;y<sub>i</sub>为第*i*天蒸腾量模拟 值;x<sub>i</sub>为第*i*天蒸腾量实测值。结果如表2所示。

由表 2 可知整个试验阶段植株 b、c 24 h 累计蒸 腾量的 *MRE* 和 *MAE* 分别为 9.46%、10.98%和 0.02 mm · d<sup>-1</sup>、0.02 mm · d<sup>-1</sup>。晴天、阴天约占总试验天

表 2 冬季日光温室内番茄植株累计蒸腾量误差分析

Table 2 Accumulated transpiration value's errors analysis

of single tomato plant in CSG during winter

|  | MRE                |                    | MAE                                       |   |
|--|--------------------|--------------------|---|---|
| 时间<br>Time                                   | b株<br>Plantb<br>/% | c株<br>Plantc<br>/% | b株<br>Plant b<br>∕(mm ⋅ d <sup>-1</sup> ) | c株<br>Plant c<br>∕(mm・d <sup>-1</sup> ) |
| 24 h 累计值<br>Accumulated value<br>for one day | 9.46               | 10.98              | 0.02                                      | 0.02                                    |

数的 9/10,说明使用 P-M 方程模拟北方寒区冬季 日光温室基质袋培单株番茄蒸腾量(即需水量)是 可行的。

## 2.3 日光温室内单株植株上方净辐射、空气饱和水 汽压差、蒸腾速率的日变化规律

净辐射的大小直接关系到蒸腾作用的强度,温 室内饱和水汽压差(以下简称 VPD)直接影响植物 气孔闭合程度,从而控制作物蒸腾过程和水分利用 效率,两者作为温室作物蒸腾的主要影响因子,共 同决定温室番茄植株的蒸腾速率。选取试验期间 每天9:00-15:00 植株 b 上方净辐射、距地面 2 m 处的参考高度 VPD 及其蒸腾速率的关系如图 4 所示。



Note: Plant transpiration rate (mm  $\cdot$  h<sup>-1</sup>) was converted to heat carried by transpiration (W  $\cdot$  m<sup>-2</sup>).

图 4 冬季日光温室内单株番茄上方净辐射、空气饱和水汽压差(VPD)与蒸腾速率的日变化规律

Fig.4 Variation of net radiation, vapor pressure difference (VPD), and transpiration rate of single tomato plant in CSG during winter

由图4可看出,冬季日光温室单株番茄蒸腾速 率与其上方净辐射保持很好的一致性,日最大值均 出现在12:00左右且几乎保持同步,而VPD日最 大值出现时间滞后于前两者1h左右。例如12月 23日,净辐射突然下降时,蒸腾速率随即下降,而 VPD在1h后明显降低。由图1b可看出9:00— 15:00气孔阻力维持在较低值,由此可得出在冬季,日光温室单株番茄蒸腾速率的大小主要取决于 其上方净辐射的日变化规律和大小,而室内VPD的 变化和大小对其起次要作用,这与罗卫红等<sup>[7]</sup>关于 南方冬季现代化温室内净辐射、VPD与黄瓜蒸腾速 率的日变化规律的研究趋势相同。

## 2.4 日光温室内单株植株上方净辐射与蒸腾速率 的关系

净辐射是温室作物蒸腾的源动力,根据 2.3 中 分析可知冬季日光温室单株番茄蒸腾速率变化规 律与其上方净辐射变化规律一致,为探明室内植株 上方净辐射对蒸腾速率的影响,根据试验数据得出 植株 b 上方净辐射与蒸腾速率关系如图 5 所示。

由图 5 可知两者呈线性关系,约有 43.5%的植 株上方净辐射通过植株蒸腾作用转化为潜热,而根 据罗卫红等<sup>[7]</sup>对南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾的 研究结果,平均有 46%作物冠层上方净辐射通过作 物蒸腾作用转化为潜热,本文试验结果比其低,这 是因为测试期间晴天中午平均室内总辐射为 165.6 W・m<sup>-2</sup>,室内平均温度为 21.6℃(南方现代化温室 黄瓜冬季蒸腾试验期间相应值为 187 W・m<sup>-2</sup>, 26.2℃),室内总辐射与温度均较低使室内 VPD 维 持较低水平,冬季室内无通风,风速极低甚至为 0, 导致蒸腾作用较弱,且番茄叶片蒸腾强度低于黄瓜 叶片,进而使植株上方净辐射通过蒸腾作用转化为 潜热的比例明显降低。



 $(W \cdot m^{-2})_{\circ}$ 

Note: Plant transpiration rate ( mm  $\cdot$   $h^{-1}$  ) was converted to heat carried by transpiration (  $W \cdot m^{-2}$  ).

图 5 冬季日光温室内单株番茄上方净辐射与蒸腾速率的关系 Fig.5 Relationship between the net radiation above plant and the measured transpiration rate of single tomato plant in CSG during winter

#### 2.5 日光温室内土壤热通量的敏感性检验

温室地面在白天、夜间与温室内部进行能量交换,为了检验土壤热通量的变化对蒸腾速率的影响,以12月20日9:00—22:00、12月21日0:00—7:00(本研究土壤热通量白天采用0.35*R*<sub>n</sub>,夜间采用0.13*R*<sub>n</sub>)的植株b逐时蒸腾速率模拟值为例,分别计算白天采用0.25~0.5*R*<sub>n</sub>、步长为0.05*R*<sub>n</sub>,夜间采用0.1~0.15*R*<sub>n</sub>、步长为0.01*R*<sub>n</sub>进行敏感性检验,计算结果如图6所示。

由图 6 分析可知,尽管 18:00 植株 b 的模拟值 对 *G* 变化敏感性较强,但由于此时蒸腾速率较低, 因此变化值的大小对日累计蒸腾量的影响效果不 大,白天 *C*/*R*<sub>n</sub> 每增加 0.05 时,对单株植株蒸腾速率 影响最大时间段为 10:00—11:00,蒸腾速率平均 减少了 5.46%,影响最小时间段为 14:00—15:00, 蒸腾速率平均减少了 1.55%;夜间 *G*/*R*<sub>n</sub> 每增加0.01





Fig.6 Sensitivity analysis of soil heat flux in CSG during winter

时,仅在18:00时蒸腾速率增加了4.75%,其余时间均增加2.25%。土壤热通量变化对逐时蒸腾速率影响仅在白天一段时间略超过5%,其余时间均低于5%,由此可见在本试验条件下土壤热通量对逐时蒸腾速率的影响不明显。

## 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1)北方日光温室冬季密闭环境中晴天、阴天 单株番茄边界层空气动力学阻力 r<sub>a</sub> 的平均变化范 围分别为147~438、211~365 s·m<sup>-1</sup>;气孔阻力 r<sub>c</sub> 平 均变化范围分别为 69~1 506、132~1 151 s·m<sup>-1</sup>。

(2)北方日光温室冬季密闭环境中基于 P-M 方程模拟单株番茄逐时蒸腾速率是可行的:检验模型的 b、c 植株日累计模拟值与茎流计实测值间的 R<sup>2</sup>>0.9,标准差 SE ≈ 0.01 mm · d<sup>-1</sup>, b、c 株模拟值与 实测值的平均相对误差分别为 9.46%、10.98%; 晴 天、阴天中午的平均值分别为 0.06、0.02 mm・h<sup>-1</sup>, 日蒸腾总量平均值分别为 0.29、0.12 mm・d<sup>-1</sup>。

(3)在北方冬季低温高湿的环境下,作物蒸腾 速率主要取决于植株上方净辐射的变化,植株上方 净辐射与蒸腾速率的最大值均出现在12:00左右, 距离地面2m处参考高度VPD最大值出现时间约 13:00。植株上方净辐射量的43.5%可通过蒸腾作 用转化为潜热。

(4) P-M 方程估算单株植株逐时蒸腾速率时考虑了土壤热通量一项,研究发现晴天白天 *G/R<sub>n</sub>*每增加 0.05 对蒸腾速率影响最大时间段为 10 :00—11 :00,蒸腾速率减少 5.46%,影响最小时间段为 14 :00—15 :00,蒸腾速率减少 1.55%;夜间 *G/R<sub>n</sub>*每增加 0.01,蒸腾速率增加 2.25%~4.75%。本试验条件下,土壤热通量对蒸腾速率影响不明显。

#### 3.2 讨 论

温室作物蒸腾作用受诸如植株自身条件、人为

因素(环境控制)、室内气象要素等条件的共同影 响,本研究基于冬季温室很少通风,室内风速很低 甚至为0的特定环境下,采用了根据叶温与周围空 气温度差值计算单株植株边界层空气动力学阻力 与气孔平均阻力反演模型,并运用了日光温室冬季 番茄蒸腾量估算模型。

基于模型模拟蒸腾速率的准确程度与边界层 空气动力学阻力、气孔平均阻力的取值有直接关 系<sup>[2]</sup>,而二者数值的精确获得很难。风速及温度的 变化会产生不同的气流模式类型,若采用"大叶子" 假设则与实际作物生产情况存在差异<sup>[31]</sup>;气孔平均 阻力的取值不仅与太阳辐射、VPD、空气温度、作物 水分等有关<sup>[7]</sup>,且还受植株结构、植株上方气流及 土壤条件等影响<sup>[14]</sup>。本研究采用了与室内气象要 素相符合的单株植株边界层空气动力学阻力及反 演的气孔平均阻力模型,经检验单株蒸腾速率模拟 结果较好。

太阳辐射是作物蒸腾的驱动力, R. de. Graaf 等<sup>[32]</sup>研究表明对于有夜间加温的玻璃温室冬季番 茄幼苗, 5%的外部太阳总辐射通过作物蒸腾作用转 化为潜热, 对于生长茂盛的番茄, 转化率为 37%; 汪 小旵等<sup>[8]</sup>、罗卫红等<sup>[7]</sup>通过对南方现代化温室黄瓜 夏季及冬季蒸腾研究表明, 到达作物冠层上方的净 辐射转化为潜热的比率分别为 66% 和 46%; Meir Teitel<sup>[10]</sup>研究防虫遮阳网温室内番茄蒸腾发现 9:00—14:00大约 70%~80%的净辐射通过作物 蒸腾作用转化为潜热; 本研究中, 单株植株上方净 辐射量的 43.5%通过植株蒸腾作用转化为潜热, 太 阳能转化率介于上述研究结果之间, 这也是基质袋 培条件下北方寒区冬季日光温室特定气象条件所 产生的结果。

本试验中番茄为基质袋培,地面覆盖塑料薄膜,无裸露土壤。土壤热通量变化对逐时蒸腾速率 影响仅在白天一段时间略超过5%,其余时间均低 于5%,由此可见在本试验条件下土壤热通量对逐 时蒸腾速率的影响不明显,此结论可为相似栽培方 式提供参考。

由于番茄植株营养生长和生殖生长可同时进行,番茄植株定植后15d左右第一穗果开花随即结果,此后可通过测量各时期植株叶面积指数和温室 内气象要素计算植株蒸腾量,以此为北方寒区日光 温室冬季基质袋培番茄全生育期滴灌灌溉量提供 参考。

与大型玻璃、塑料温室相比,日光温室内光照、温 度、湿度具有空间分布不均匀的特征。本研究选取温 室内中间部位的植株进行测量,可能会高估整体蒸腾量。日光温室冬季生产时光照、温度、湿度的管理是非常重要的,其中湿度的管理要由灌溉量决定,灌溉量少会干旱,灌溉量多会使室内湿度上升进而增加植物病虫害发生频率,因此基于 P-M 方程估算单株番茄蒸腾量可对番茄的水分管理提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 董仁,隋福祥,张树辉.应用彭曼公式计算作物需水量[J].黑龙江水利学报,2006,33(2):100-101.
- [2] 董斌,孙宁宁,罗金耀.基于棚内气象数据的冬季大棚番茄蒸腾计 算[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(5):601-604.
- [3] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirement [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [4] Morille B, Migeon C, Bournet P E. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop [J]. Scientia Horticulture, 2013, (152):80-91.
- [5] Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1):25-34.
- [6] Demrati H, Boulard T, Fatnassi H, et al. Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1):66-78.
- [7] 罗卫红, 汪小旵, 戴剑锋, 等. 南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾量与 模拟研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 59-65.
- [8] 汪小旵, 罗卫红, 丁卫民, 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): 1390-1395.
- [9] Thierry Boulard, Jean-Claude Roy, Jean-Baptiste Pouillard, et al. Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics [J]. Biosystems Engineering, 2017, 158:110-133.
- [10] Meir Teitel. Diurnal energy-partitioning and transpiration modeling in an insect-proof screenhouse with a tomato crop [J]. Biosystems Engineering, 2017, 160:170-178.
- [11] 彭致功,杨培岭,段爱旺,等.日光温室条件下番茄植株蒸腾规 律研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):62-65.
- [12] 王健, 蔡焕杰, 李红星, 等. 日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方 法研究及其评价[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 11-14.
- [13] 李霞,王国栋,薛绪掌,等.遮光、密闭环境对番茄植株蒸腾的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(1):60-64.
- [14] 刘浩,段爱旺,孙景生,等.基于 Penman-Monteith 方程的日光温 室番茄蒸腾量估算模型[J].农业工程学报,2011,27(9):208-213.
- [15] 吕薇薇,罗新兰,李霞,等.日光温室番茄不同生育期的蒸腾作 用及模拟研究[J].东北农业大学学报,2011,42(10):57-61.
- [16] 龚雪文,刘浩,孙景生,等.日光温室番茄不同空间尺度蒸散量 变化及主控因子分析[J].农业工程学报,2017,33(8):166-175.
- [17] 伍德林,毛罕平.温室滴灌黄瓜茎流变化规律的试验研究[J].安 徽农业科学,2007,35(12):3455-3456,3477.
- [18] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, (3):309-320.
   (下转第 65 页)