

温室湿度动态预测模型建立与试验^{*}

何芬¹ 马承伟¹ 张俊雄²

(1. 中国农业大学农业部设施农业工程重点开放实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 根据温室内水气收支平衡关系,建立了与室内外气象参数、温室结构、作物生长状况、土壤潮湿程度等有关条件下的温室湿度动态预测模型。同时定量描述了温室内作物蒸腾、土壤蒸发、壁面凝结、自然通风和机械通风等与湿度变化相关的各种物理过程。基于华北塑料连栋温室对所建模型进行了试验验证。结果表明:模型能较好预测温室内空气相对湿度值,预测值和实测值之间的均方根误差为5.9%。

关键词: 温室 湿度 水气平衡 预测模型

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A

Dynamic Forecasting Model of Humidity in Greenhouse

He Fen¹ Ma Chengwei¹ Zhang Junxiong²

(1. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on the water vapor balance in greenhouse, a dynamic forecasting model of humidity directly as a function of the inside and outside climate, greenhouse structure, crop growth, and soil moisture was presented. Meanwhile, some physical processes correlative with the water vapor change such as crop transpiration, soil evaporation, covering material condensation, and natural and mechanical ventilation were quantitative analyzed. To validate the correctness of the model, an experiment was carried out in the plastic multi-span greenhouse in North China during winter. The inner relative humidity forecasted agreed well with the measured data, with the root mean square error of 5.9%.

Key words Greenhouse, Humidity, Water vapor balance, Forecasting model

引言

温、湿环境一直是温室环境调控中最重要的两个方面,但过去多数研究者主要侧重于温环境,湿环境的研究则较薄弱。目前,国外研究温室湿度模型已有一定进展,但有些模型适用性、准确性还有待提高^[1-3]。近几年,一些物理过程如自然通风、凝结、作物蒸腾等的研究取得了一些研究成果,因此建立一套完整适合我国气候的温室湿度模型是必要的。

本文针对温室环境中的湿环境,建立温室湿环境动态预测模型,在给定作物生长状态、土壤潮湿程

度、室内外温度、相对湿度、太阳辐射照度、风速等参数情况下,通过计算各种温室内水气的源-汇来模拟预测室内的湿度状况和变化趋势,并以塑料连栋温室作为研究对象,对所建模型进行试验验证。

1 模型假设

由于温室内种植作物本身的生理过程如呼吸、光合和蒸腾作用与温室内环境息息相关,因此温室内湿度环境系统是一个十分复杂的系统,特别是它和温度存在一定耦合性。为了尽量准确描述室内环境的变化并且减低模型复杂度,做如下假设:①温室

收稿日期: 2008-10-08 修回日期: 2008-11-19

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAK04A03)和北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目(XK100190650)

作者简介: 何芬, 博士生, 主要从事设施园艺环境科学与工程研究, E-mail: hefen_2005@163.com

通讯作者: 马承伟, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺环境科学与工程研究, E-mail: macwbs@cau.edu.cn

内各部分温度和湿度分布均匀,以平均状态量代替总体状况。②空气比热容和密度不随温度和湿度的变化而改变。③室内种植的作物冠层温度和湿度分布均匀。

2 模型构建

图1是温室内水气收支简图。温室内水气来源主要是作物蒸腾、土壤蒸发以及喷淋系统,又通过壁面凝结(覆盖凝结和叶片凝结)、通风渗透、热泵除湿等过程散失。温室内的湿度昼夜变化情况就是由这些传质过程所决定的。为了较好模拟和预测温室内空气湿度随时间的变化,基于温室内水气收支平衡关系,建立温室湿度的动态模型

$$E_d = E_t + E_s + E_{add} - E_c - E_v \quad (1)$$

式中 E_d ——温室内水气含量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

E_t ——温室内作物蒸腾产生的水气, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

E_s ——温室内土壤蒸发产生的水气, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

E_{add} ——喷淋系统产生的水气($E_{add1} > 0$)和除湿热泵除去的水气($E_{add2} < 0$)之和, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

E_c ——温室内覆盖层、围护层的冷凝量 E_{c1} 和叶面上的冷凝量 E_{c2} 之和, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

E_v ——温室自然通风、渗透的水气 E_{v1} 和强制通风散失的水气 E_{v2} 之和, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

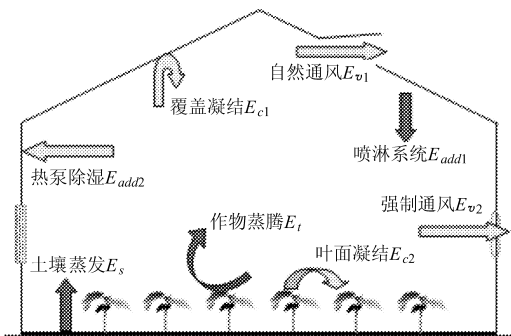


图1 温室内水气收支简图

Fig. 1 Sketch of water vapor transfer in greenhouse

2.1 温室内水气含量

t 和 $t + \Delta t$ 时刻之间温室内水气含量变化可定义为

$$E_d = \frac{\left(\frac{V}{\nu_{i2}} d_{i2} - \frac{V}{\nu_{i1}} d_{i1}\right)}{A_g \Delta t} \quad (2)$$

式中 V ——温室体积, m^3

ν_{i1} 、 ν_{i2} —— t 和 $t + \Delta t$ 时刻的空气比体积, m^3/kg

d_{i1} 、 d_{i2} —— t 和 $t + \Delta t$ 时刻的空气含湿量, g/kg

A_g ——温室地面面积, m^2

假设 Δt 时段的温室内空气温度变化不明显,将空气比容和含湿量定义式代入式(2),可得

$$E_d = \frac{e_i(t + \Delta t) - e_i(t)}{\Delta t} \frac{V}{T_i R_{g,v} A_g} \quad (3)$$

式中 $e_i(t)$ 、 $e_i(t + \Delta t)$ —— t 和 $t + \Delta t$ 时刻的水气压, Pa

T_i ——室内空气温度, K

$R_{g,v}$ ——水蒸气的气体常数,取 $461.97 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

2.2 作物蒸腾

目前,对温室作物蒸腾散发水气量的计算, Penman-Monteith 公式是最常见且较为合理的方法^[4~6]

$$E_t = \frac{\Delta R'_n + (\rho_a C_{pa} / r_a) [e_s(T_i) - e_i(t)]}{\lambda [\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)]} \quad (4)$$

其中

$$\Delta = \frac{2504000}{(T_i - 35.86)^2} e^{17.27(T_i - 273.16)/(T_i - 35.86)}$$

$$\lambda = 1000 [2500.8 - 2.3668(T_i - 273.13)]$$

$$e_s(T_i) = 610.78 e^{17.2694(T_i - 273.13)/(237.3 + (273.13 - T_i))}$$

式中 Δ ——饱和水气压-温度曲线上的斜率, Pa/K

λ ——水的气化潜热放热系数, J/kg

$e_s(T_i)$ ——室内温度下的饱和水气压, Pa

γ ——湿度计算常数,取 $66 \text{ Pa}/\text{K}$

ρ_a ——空气密度,取 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$

C_{pa} ——空气定压比热容,取 $1012 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

R'_n ——作物冠层所得净辐射热流密度, W/m^2

r_a ——边界层空气动力学阻力, s/m

r_c ——作物冠层气孔阻力, s/m

作物冠层所得净辐射热流密度为

$$R'_n = (1 - \tau_s - \rho_s)(1 + \tau_s \rho_g) Q_s \quad (5)$$

其中

$$\tau_s = e^{-k_s L_{LAI}} \quad k_s = 0.74 k_l$$

$$\rho_s = (1 - \tau_l) \rho_\infty \quad \tau_l = e^{-k_l L_{LAI}}$$

式中 τ_s ——冠层对于短波辐射的透射率

k_s ——冠层对于短波辐射的消光系数

L_{LAI} ——叶面积指数

k_l ——冠层对于长波辐射的消光系数,与叶片分布状态有关^[7]

ρ_s ——冠层对于短波辐射的反射率

τ_l ——冠层对于长波辐射的透射率

ρ_g ——土壤反射率,根据土壤类型取值

ρ_∞ ——密集冠层的反射率,取 0.12

Q_s ——到达冠层上方的太阳辐射热流密度, W/m^2

对于温室内作物叶片,边界层空气动力学阻力

r_a 与叶面和空气之间的对流换热系数 $h_{p,a}$ 的关系有多种定义方式, 采用 Bailey 的定义关系式^[8]

$$r_a = \frac{\rho_a C_{pa}}{2L_{LAI} h_{p,a}} \quad (6)$$

各种对流方式下, $h_{p,a}$ 的计算为

$$h_{p,a} = \begin{cases} 0.40 \frac{k_c}{l} (GrPr)^{1/4} & \text{(自然对流)} \\ 0.66 \frac{k_c}{l} Re^{1/2} Pr^{1/3} & \text{(受迫对流)} \\ 0.37 \frac{k_c}{l} (Gr + 6.92Re^2)^{1/4} & \text{(混合对流)} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$Gr = \frac{\beta g l^3 |T_p - T_i|}{\nu^2} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (9)$$

$$Re = \frac{ul}{\nu} \quad (10)$$

式中 k_c ——空气的热导率, 取 $0.0267 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 Gr ——格拉晓夫数 Pr ——普朗特数
 β ——空气的热膨胀系数, 取 0.00375 K^{-1}
 g ——重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$
 T_p ——叶面温度, K Re ——雷诺数
 ν ——空气运动粘性系数, 取 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
 a ——空气热扩散率, 取 $2.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
 u ——室内空气流速, m/s
 l ——作物叶片特征长度, m

作物气孔的生化过程和生理过程十分复杂, 目前没有理论模型预测气孔开闭过程或气孔阻力大小, 只能依据气孔阻力与环境关系建立一些现象模型。影响冠层气孔阻力的最主要的因素包括太阳辐射热流密度、叶面温度以及叶面和室内蒸汽密度差 ($\chi_p - \chi_i$) 3 个因素, 因此可将模型表示成^[9]

$$r_c = (r_c)_{\min} f_1(R_s) f_2(T_p) f_3(\chi_p - \chi_i) \quad (11)$$

式中 $(r_c)_{\min}$ ——作物冠层最小气孔阻力, $82 \text{ s}/\text{m}$

其中后 3 项分别表示各因素对气孔阻力影响的函数^[10~11]

$$\begin{cases} f_1(R_s) = \frac{4.3 + \bar{R}_s}{0.54 + \bar{R}_s} & \left(\bar{R} = \frac{Q_s}{2L_{LAI}} \right) \\ f_2(T_p) = 1 + \frac{231}{\exp(0.3T_p) + 27} \\ f_3(\chi_p - \chi_i) = [0.004 + \exp(-0.73(\chi_p - \chi_i))]^{-0.25} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 土壤蒸发

温室相对封闭, 影响温室内土壤表面蒸发的因

素相对自然条件下裸面土壤蒸发较少。由于温室土壤表面种植大量作物, 土壤表面风速较小, 可不考虑它对土壤蒸发的影响。温室内土壤蒸发的水气量

$$E_s = \beta \frac{\rho_a C_{pa} [e_s(T_s) - e_i(t)]}{\lambda \gamma r_{as}} \quad (13)$$

其中 $r_{as} = \frac{\rho_a C_{pa}}{h_{s,a}}$
 式中 β ——表征地面潮湿程度的量, 其值如表 1 所示^[12]

T_s ——土壤表面温度, 采用温室内地下土壤二维传热模型模拟, K

$e_s(T_s)$ ——土壤表面温度下的饱和水气压, Pa

r_{as} ——土壤-空气水蒸气传输阻力, s/m

$h_{s,a}$ ——土壤表面与空气对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

表 1 作物覆盖情况下土壤潮湿程度取值

Tab.1 Values of soil moisture with crop cover

土壤潮湿程度描述	β
非常潮湿, 能看见水流, 接近自由水面蒸发	0.7
潮湿, 无明显水流	0.42~0.56
干燥	0.27~0.35
极度干燥, 接近水泥地面	0.07~0.14

2.4 壁面凝结

当覆盖层内表面的温度 T_c 或叶面温度 T_p 低于室内空气的露点温度 T_d 时, 水气才会在覆盖层内表面或叶片表面凝结。计算式为

$$T_d = \frac{237.3}{\frac{17.2694}{\ln e_i(t) - \ln 610.78} - 1} \quad (14)$$

覆盖层、围护层内表面凝结水量 E_{c1} 的计算公式为

$$E_{c1} = \frac{h_{c1}}{\lambda \gamma} [e_i(t) - e_s(T_c)] \quad (15)$$

式中 h_{c1} ——覆盖层内表面凝结传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

$e_s(T_c)$ ——覆盖层内表面温度下的饱和水气压, Pa

将努塞尔理论^[13]分析得出的壁面平均凝结传热系数计算式简化, 得到

$$h_{c1} = \xi_{lm} \left[\frac{\sin \alpha}{H(t_i - t_c)} \right]^{1/4} \quad (16)$$

式中 ξ_{lm} ——液膜平均温度 $t_m = \frac{1}{2}(t_i + t_c)$ 下各种物性值的综合参数, 其值如表 2 所示

H ——壁面高度, m

α ——壁面与水平面的夹角, ($^{\circ}$)

表 2 液膜平均温度下 ξ_{tm} 取值

Tab.2 Values of ξ_{tm} at the average temperature of condensation water

液膜平均 温度 t_m/K	$\xi_{tm}/$ $W \cdot (m^{7/4} \cdot K^{3/4})^{-1}$	液膜平均 温度 t_m/K	$\xi_{tm}/$ $W \cdot (m^{7/4} \cdot K^{3/4})^{-1}$
273	7.770	298	9.925
278	7.815	303	10.300
283	8.670	308	10.690
288	9.110	313	11.080
293	9.550		

作物叶面凝结量的计算方程为

$$E_{c2} = \frac{h_{c2}}{\lambda\gamma} [e_i(t) - e_s(T_p)] \quad (17)$$

式中 h_{c2} ——作物叶面的凝结传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 $e_s(T_p)$ ——叶面温度下的饱和水气压, Pa

2.5 通风

由通风和冷风渗透作用引起的温室内外水气变化可定义为

$$E_v = \frac{L\rho_a(d_i - d_o)}{A_g} \quad (18)$$

式中 L ——通风量, m^3/s
 d_i, d_o ——温室内外空气含湿量, g/kg
 将含湿量定义式代入式(18), 可得

$$E_v = 0.622 \frac{L\rho_a}{A_g} \frac{e[e_i(t) - e_o(t)]}{[e - e_i(t)][e - e_o(t)]} \quad (19)$$

式中 e ——大气压, 取 1.01×10^5 Pa
 $e_o(t)$ —— t 时刻室外空气水气压, Pa

2.5.1 自然通风

综合考虑风压和热压的作用, 温室自然通风量的计算式为

$$L = \sqrt{L_w^2 + L_t^2} \quad (20)$$

式中 L_w, L_t ——按风压和热压单独作用情况下的通风量^[14]

$$L_w = kv_o \sqrt{C_a - C_b} \quad (21)$$

$$L_t = k \sqrt{\frac{2(T_i - T_o)gh}{T_i}} \quad (22)$$

其中 $k = 1 / \sqrt{\frac{1}{\mu_a^2 F_a^2} + \frac{1}{\mu_b^2 F_b^2}}$

式中 k ——由进、排风口面积 F_a, F_b 与流量系数 u_a, u_b 确定的系数
 v_o ——室外风速, m/s

C_a, C_b ——温室进、排风口的流量系数

T_o ——室外空气温度, K

h ——温室进、排风口之间的高度差, m

当所有通风口关闭且没有机械通风时, 在室内外压差和室外风速的作用下, 通过温室围护结构的缝隙仍有一部分通风量, 称为冷风渗透。其计算主要是根据温室的换气次数 n 来计算

$$L = nV \quad (23)$$

2.5.2 机械通风

机械通风情况下的通风量可根据风机的排风量等于通过湿垫和通风口的进风量的平衡关系来计算^[15], 则

$$\sum_{i=1}^m \psi_i(\Delta p) = A_{\text{curtain}} \Phi(\Delta p) + \sum_{j=1}^n \mu_j F_j \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{ao}}} \quad (24)$$

式中 $\psi_i(\Delta p)$ ——台风机风量和静压关系
 A_{curtain} ——湿垫面积, m^2
 $\Phi(\Delta p)$ ——风速和过帘阻力的函数关系
 μ_j, F_j ——温室 n 个通风口的流量系数和面积
 ρ_{ao} ——室外空气密度, kg/m^3

3 试验

3.1 试验条件和方法

试验在北京市通州区试验示范园区的连栋塑料温室内进行。温室南北走向, 南北长 48 m, 东西方向共 17 跨, 每跨宽 8 m; 温室檐高 4 m, 脊高 4.8 m。温室屋顶为双坡屋面, 覆盖材料均为 PC 板。屋脊东西方向开有 11 扇天窗, 天窗长 2 m, 宽 1 m, 全开时开口高度为 0.5 m。温室包含自然通风、内遮阳、湿帘降温、热水加热系统等。试验期间, 湿帘降温系统未开启, 其他系统均启用。

试验时间为 2007 年 2 月 8 日至 12 日, 室内种植丽格海棠。温室内外气象因子(室内外温度、相对湿度、室外风速、太阳辐射)分别由温湿度自动记录仪(RS-11 型)、辐射采集仪、风速仪每隔 5 min 采集, 同时记录温室内土壤潮湿程度、作物生长情况、以及温室自然通风开窗角度等相关参数。

3.2 结果分析

模型动态变量包括室内外温度、室外湿度、太阳辐射、风速等参数。这些参数作为每个时间步长模型的输入, 随时间变化。模型中涉及的相关参数见表 3。

运用 Visual C++ 编制程序求解模型, 图 2 显示了温室内相对湿度的模拟结果, 从中可看出模拟预测的相对湿度和实测相对湿度曲线较吻合, 变化

表3 模型参数取值

Tab.3 Values of model simulation parameters

参数	数值
温室体积 V/m^3	28 723.2
温室地面面积 A_g/m^2	6 528
叶面积指数 L_{LAI}	0.86
冠层对于长波辐射消光系数 k_l	1
土壤反射率 ρ_g	0.2
作物叶片特征长度 l/m	0.064 6

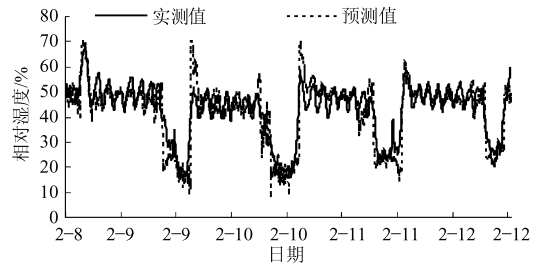


图2 温室内实测和预测相对湿度变化曲线

Fig.2 Measured and forecasted relative humidity in greenhouse

趋势一致,两者之间的均方根误差为5.9%。

4 结束语

通过分析温室内水气动态平衡过程,建立了温室湿度动态预测模型。同时定量描述了温室内作物

蒸腾、土壤蒸发、壁面凝结、自然通风和机械通风等与水气含量变化相关的各种物理过程。基于华北塑料连栋温室对所建模型进行了试验验证,结果表明该模型能较好地预测温室内空气相对湿度,预测值和实测值之间的均方根误差为5.9%,小于6%。

参 考 文 献

- Silveston P L, Costigane W D, Tiessen H, et al. Energy conservation through control of greenhouse humidity, I. condensation heat losses[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1980, 22: 125~132.
- Seginer I D, Kantz. In-situ determination of transfer coefficients for heat and water vapour in a small greenhouse[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 35: 39~54.
- Boulard T. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1989, 44: 191~204.
- Montero J I, Anton A, Munoz P, et al. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 323~332.
- Youssef Roupheal, Giuseppe Colla. Modelling the transpiration of a greenhouse zucchini crop grown under a Mediterranean climate using the Penman-Monteith equation and its simplified version[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2004, 55(9): 931~937.
- 汪小■, 丁为民, 罗卫红, 等. 温室小气候测量实验设计及其夏季蒸腾研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 86~89. Wang Xiaochan, Ding Weimin, Luo Weihong, et al. Design experiment to measure microclimate and study transpiration in summer in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 86~89. (in Chinese)
- Goudriaan J. Crop micrometeorology: a simulation study [D]. Wageningen, Netherlands: Agricultural University, 1977.
- Bailey B, Montero J, Biel C, et al. Transpiration of Ficus benjamina; comparison of measurements with predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 65(3~4): 229~243.
- Jarvis P J. The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, 1976, 273: 593~610.
- Stanghellini Cecilia, Taeke de Jong. A model of humidity and its applications in greenhouse[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(2): 129~148.
- Elena Palomo Del Barrio. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings[J]. Energy and Buildings, 1998, 27(2): 179~193.
- Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[C]//Proceedings of the Royal Society of London. 1948, A Series 193:120~145.
- 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 169~171.
- 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 94~100.
- 李树海. 华北型连栋温室热环境模型[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- 何芬, 马承伟. 华北地区冬季温室植物冠层温度建模[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 169~172. He Fen, Ma Chengwei. Modeling greenhouse plant canopy temperature in North China during winter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 169~172. (in Chinese)