

华北地区冬季温室植物冠层温度建模^{*}

何芬 马承伟

(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)

【摘要】 基于温室内植物冠层能量平衡关系,建立了与温室内、外气象条件和温室结构相关的冠层温度模拟机理模型,并在华北地区文洛型温室内对该模型进行了试验验证。结果表明:模型能较好地模拟冬季温室内植物冠层温度,模拟值和实测值之间的相关系数为0.797 5,均方根误差为1.3℃。建立了冠层温度的BP神经网络模型,模型相关系数为0.783 5,均方根误差为0.6℃。在所建神经网络模型基础上,运用敏感性分析法对影响冠层温度的各因素进行重要性分析和排序,得出影响冠层温度的最重要因子是室内温度,其次为蒸腾速率、室外太阳辐射和室内相对湿度。

关键词: 温室 冠层温度 机理模型 神经网络

中图分类号: S625.5⁺1; TP183

文献标识码: A

Modeling Greenhouse Plant Canopy Temperature in North China during Winter

He Fen Ma Chengwei

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

Abstract

According to the balance of plant canopy energy, a mathematical model of simulating greenhouse plant canopy temperature that has relations with greenhouse inside and outside climate and structure was developed. The experiment was carried out to validate the correctness of the model in the Venlo-type greenhouse in North China during winter. The simulated canopy temperature agreed well with the measured data. The determination coefficient and the root mean square error between the measured and simulated canopy temperature were 0.797 5 and 1.3℃, respectively. Then a BP neural network model of canopy temperature was built, the determination coefficient and the root mean square error were 0.783 5 and 0.6℃. Based on the neural network model, the influencing factors sensitivity of canopy temperature was analyzed. The inside temperature is the most important factor, and the next ones are in order of the transpiration rate, solar radiation and inside relative humidity.

Key words Greenhouse, Canopy temperature, Mathematical model, Neural network

引言

植物冠层是植物叶片进行光合作用和蒸腾作用的重要空间,冠层温度是快速、非破坏性监测整株植物是否受到水分胁迫的有效参数,在水分胁迫或者非胁迫条件下,冠层温度值反映了植物体内的水分

状况^[1]。建立植物冠层温度模拟模型并研究冠层温度和环境变量的关系,不仅可以为植物灌溉提供必要参数,还可为温室热湿环境建模提供一定基础。

目前,国内外学者提出了很多植物冠层温度的微气候模拟模型^[2~4],这些模型研究大部分集中在自然环境或大田植被冠层温度与水分状况等的分

收稿日期: 2008-05-29 修回日期: 2008-06-30

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B07-4)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: nicefen@cau.edu.cn

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

析,一些参数取值还需进一步研究和分析。温室环境下植物冠层温度的研究也取得了一定进展^[5~7],但这些分析都存在一定的地域局限性,相关参数可能并不适合我国北方冬季低温、低湿气候;而且植物的种类主要集中在黄瓜、西红柿等温室内常见蔬菜植物。本文以华北地区冬季温室内花卉植物为对象,研究冠层温度建模的方法以及环境因子对冠层温度的影响,以期对植物的灌溉和水分状况分析提供理论依据。

1 冠层温度模拟机理模型

1.1 模型建立及参数分析

温室整个植物冠层可当成一个伸展的叶片来研究,并假设冠层温度以及叶片间的空气温度和水气含量具有均一性,忽略光合作用消耗的能量对冠层温度的影响。温室内植物冠层的热传递如图1所示,列出冠层能量平衡方程式

$$\rho_p c_p dL_{LAI} \frac{dT_p}{dt} = R_s + R_l + R_{conv} + R_{tran} \quad (1)$$

式中 ρ_p ——植物密度, kg/m³
 c_p ——植物比热容, J/(kg·K)
 d ——冠层平均厚度, m
 L_{LAI} ——叶面积指数 T_p ——冠层温度, K
 R_s ——冠层吸收的太阳辐射热流密度, W/m²
 R_l ——冠层吸收的净热辐射热流密度, W/m²
 R_{conv} ——冠层与空气显热交换热流密度, W/m²
 R_{tran} ——冠层蒸腾带走的潜热热流密度, W/m²

(1) 冠层吸收的太阳辐射热流密度为

$$R_s = (1 - \tau_s - \rho_s)(1 + \tau_s \rho_g) \tau_t R_o \quad (2)$$

其中

$$\tau_s = e^{-k_s L_{LAI}} \quad k_s = 0.74 k_1$$

$$\rho_s = (1 - \tau_1) \rho_\infty \quad \tau_1 = e^{-k_1 L_{LAI}}$$

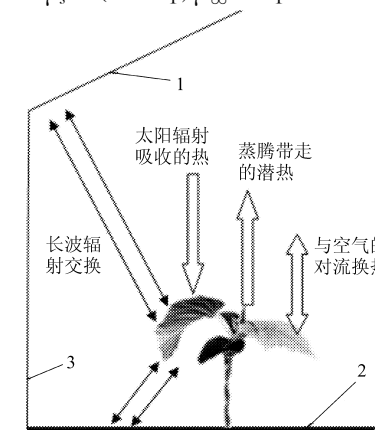


图1 温室内植物冠层热传递简图

Fig.1 Sketch of energy transfer processes

in a canopy of greenhouse

1,3. 覆盖层 2. 土壤

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
 k_1 ——冠层对于长波辐射的消光系数,与叶片状态有关
 ρ_s ——冠层对于短波辐射的反射率
 ρ_∞ ——密集冠层的反射率,取0.12
 τ_1 ——冠层对于长波辐射的透射率
 ρ_g ——土壤反射率,根据土壤类型进行取值
 τ_t ——温室覆盖材料的透射率
 R_o ——室外太阳辐射热流密度, W/m²

(2) 冠层吸收的净热辐射流为^[8]

$$R_l = (1 - \tau_1) \sigma (T_u^4 + T_d^4 - 2T_p^4) \quad (3)$$

式中 T_u 、 T_d ——到达冠层上、下表面辐射的表现温度, K

σ ——黑体辐射常数,取 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)

(3) 冠层与空气的显热交换热流密度为

$$R_{conv} = -2L_{LAI} \frac{\rho_a C_{pa}}{r_a} (T_p - T_i) \quad (4)$$

式中 ρ_a ——空气密度, 1.2 kg/m³
 C_{pa} ——空气定压比热容, 1 012 J/(kg·K)
 r_a ——边界层空气动力学阻力, s/m
 T_i ——室内空气温度, K

(4) 冠层蒸腾潜热热流密度的计算采用 Penman - Monteith 方程

$$R_{tran} = -\lambda E_t = -\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} R'_n + \frac{\rho_a C_{pa}/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} (1 - R_{RH}) e_s(T_i) \right] \quad (5)$$

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

$$\Delta = \frac{2504000}{(T_i - 35.86)^2} e^{17.27(T_i - 273.13)/(T_i - 35.86)}$$

$$e_s(T_i) =$$

$$610.78 e^{[17.2694(T_i - 273.13)]/[237.3 + (273.13 - T_i)]}$$

式中 λ ——水的汽化潜热放热系数, J/kg

E_t ——植物蒸腾产生的水气量, kg/(m²·s)

Δ ——饱和水气压-温度曲线上的斜率, Pa/K

$e_s(T_i)$ ——室内空气温下的饱和水气压, Pa

γ ——湿度计算常数, 66 Pa/K

R'_n ——冠层所得的净辐射热流密度, W/m²

r_c ——冠层气孔阻力, s/m

R_{RH} ——室内空气相对湿度, %

根据 Boulard^[9], 得

$$r_a = 220 \frac{l^{0.2}}{u^{0.8}} \quad (6)$$

$$r_c = 200 \left(1 + \frac{1}{\exp(0.05(\tau_t R_o - 50))} \right) \quad (7)$$

其中

式中

- l ——叶片特征长度, m
- u ——通风引起的室内空气平均流速, m/s
- L ——温室内自然通风率, m³/s
- A_c ——垂直平均风向的温室横截面积, m²

综合考虑风压和热压作用, 则温室内自然通风率的计算方程为^[10]

$$L = A_v \sin(\alpha/2) C_d [2g(H/2)(T_i - T_o) / (T_o + C_w u_o^2)]^{0.5} \quad (8)$$

式中

- A_v ——温室通风窗的总面积, m²
- α ——通风窗开窗角度, (°)
- C_d ——流量系数
- C_w ——综合风压系数
- g ——重力加速度, 9.8 m²/s
- H ——进风口和排风口中心的高度差, m
- u_o ——室外风速, m/s

1.2 模型求解

联立式(1)~(5), 冠层温度 T_p 的模拟模型可简化为

$$A \frac{dT_p}{dt} = -BT_p + C \quad (9)$$

其中

$$A = \rho_p c_p dL_{LAI} \quad (10)$$

$$B = 2L_{LAI} \frac{\rho_a C_{pa}}{r_a} \quad (11)$$

$$C = R_s + 2L_{LAI} \frac{\rho_a C_{pa}}{r_a} T_i - \lambda E_t \quad (12)$$

求解常微分式(9), 得出 T_p^j 的下一步迭代值

$$T_p^{j+1} = \frac{C}{B} + \left(T_p^j - \frac{C}{B} \right) \exp\left(-\frac{B}{A} \Delta t\right) \quad (13)$$

式中 Δt ——模拟计算时间步长, 取 0.5 h

1.3 模型验证及结果分析

模型验证试验于 2007 年 2 月 8 日~12 日在北京市通州区示范园区的文洛型温室进行。供试植物为丽格海棠, 栽植密度为 49 株/m²。试验期间气候条件为北方冬季典型低温、低湿天气。测量项目包括室内空气温度、相对湿度、室外空气温度、太阳辐射、风速以及天窗开度。采用红外测温仪每 30 min 测量 10 株不同植株叶片温度, 取平均值作为冠层实测温度。

图 2 和图 3 显示了冠层温度模拟结果。从图中可看出冠层温度的模拟值和测量值曲线比较吻合, 变化趋势一致。模拟值和测量值之间的相关系数 R^2 达到了 0.797 5, 均方根误差为 1.3℃。

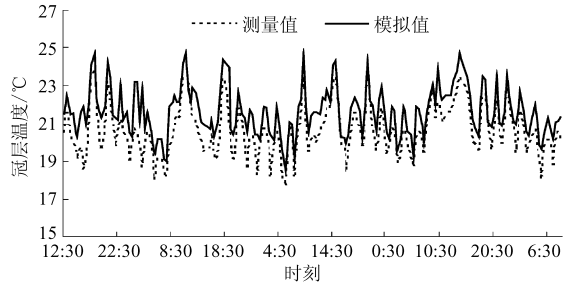


图 2 冠层温度测量值与模拟值的变化曲线

Fig. 2 Curves of measured and simulated canopy temperature

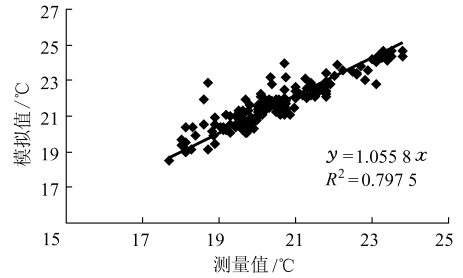


图 3 冠层温度测量值与模拟值之间的回归直线

Fig. 3 Regression line between measured and simulated canopy temperature

2 冠层温度 BP 神经网络模型

采用 3 层 BP 神经网络对华北地区冬季温室内植物冠层温度建模。根据对冠层温度模拟机理模型的分析, 确定 BP 神经网络输入节点数为 4, 分别为室内温度、相对湿度、室外太阳辐射、叶片蒸腾速率; 输出节点数为 1, 为冠层温度。对网络输入数据进行归一化, 选取 tansig 和 logsig 函数分别作为隐含层和输出层激活函数, Levenberg Marquardt 算法作为网络训练算法。归一化方程为

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (14)$$

式中 X^* ——归一化后的数据, 其值在 0~1 之间
 X ——网络输入数据的实际值

X_{\max} 、 X_{\min} ——输入数据最大值和最小值

冠层温度 BP 神经网络模型样本总数 187 组, 按 2:1:1 的比例随机抽取训练集 95 组、验证和测试集各 46 组。经多次试算, 确定网络隐含层节点数为 10, 则网络拓扑结构为 4-10-1。将训练样本输入所建的 BP 网络, 如图 4 所示, 网络经过 12 次的训练和学习后, 误差就达到了所设置的 0.01。

图 5 和图 6 分别为验证样本、测试样本的网络输出(模拟值)和网络目标(测量值)之间的回归直线。冠层温度模拟值和测量值之间的相关系数 R^2 分别为 0.757 7 和 0.783 5, 均方根误差分别为 0.7℃和 0.6℃。

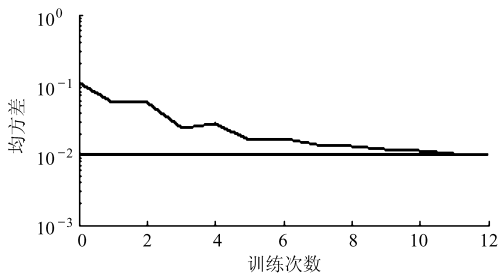


图4 网络训练误差曲线

Fig.4 Error curve of network training

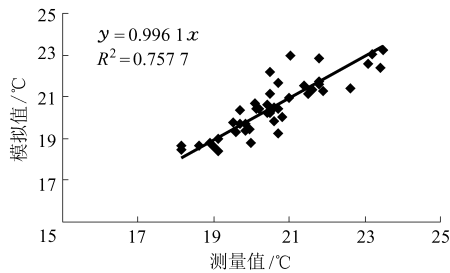


图5 验证样本网络输出回归直线

Fig.5 Regression line of network output for validating samples

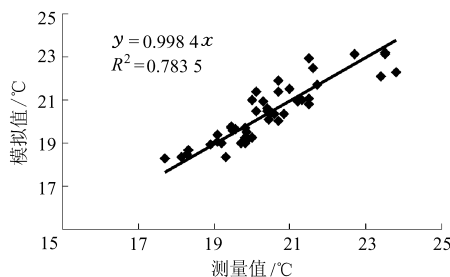


图6 测试样本网络输出回归直线

Fig.6 Regression line of network output for testing samples

3 冠层温度影响因素敏感性分析

在所建BP神经网络模型基础上,运用敏感性分析法对冠层温度的影响因素重要性进行分析排序。敏感性分析法是以最优神经网络模型得到的均

方误差与分别独立去掉其中任意一个影响因素建立的网络模型得到的均方误差的比值来判定其敏感性,比值越大,说明该因素越重要。冠层温度的敏感性分析所得结果如表1所示。从表中均方差的比值可见,在4个影响因素中,室内温度对冠层温度影响程度最大,其次为叶片蒸腾速率和室外太阳辐射,影响程度最小的为室内相对湿度。

表1 冠层温度影响因素敏感性分析

Tab.1 Sensitivity analysis of canopy temperature

项目	室内温度	室内相对湿度	室外太阳辐射	叶片蒸腾速率
均方差比值	1.083 8	1.056 9	1.060 0	1.073 9
重要性排序	I	IV	III	II

4 结束语

针对华北地区冬季低温、低湿的大陆性气候条件,以文洛型温室内海棠为研究对象,分析了温室植物冠层由辐射、对流、蒸腾作用引起的各种热量交换,建立了以温室内、外气象条件和温室结构为参数的冠层温度模拟机理模型,并通过实测数据对该模型进行了试验验证。结果表明该模型能较好预测华北地区冬季温室内植物冠层温度,为温室内制定作物灌溉决策和进度安排提供了一定信息基础。将所建机理模型和冠层温度BP神经网络模型进行比较,机理模型的模拟精度较高,但建模时所需参数多;人工神经网络建模不必了解模型内在机理和建模过程,参数需求少。通过运用敏感性因素法对影响冠层温度的各因素进行重要性分析和排序,温室内温度是影响作物冠层温度的最重要因子,其次为作物蒸腾速率、室外太阳辐射以及室内相对湿度。

参 考 文 献

- Alderfasia A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1): 69~75.
- Bristow K L. On solving the surface energy balance equation for surface temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 39(1): 49~54.
- 卫林, 江爱良, 蒋世逵. 农田叶面温度计算方法的研究[J]. 农业气象, 1981, 31(4): 37~42.
- 张克映, 马友鑫, 李佑荣, 等. 植物冠面温度气候学模拟模型的初步研究[J]. 气象学报, 1999, 57(4): 473~481.
Zhang Keying, Ma Youxin, Li Yourong, et al. A preliminary study on climatologically simulating model of plant canopy temperature[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(4): 473~481. (in Chinese)
- Kittas C, Katsoulas N, Baille A. Influence of an aluminized thermal screen on greenhouse microclimate and canopy energy balance[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(6): 1 653~1 663.
- Zhan Y, Jewett T J, Shipp J L. A dynamic model to estimate in-canopy and leaf-surface microclimate of greenhouse cucumber crops[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 179~192.

3 结论

(1) 切削液渗透能力的好坏直接影响 MQL 切削效果,切削液的渗透性好,能及时渗入到切削区形成润滑膜,降低切削阻力和摩擦因数,MQL 切削效

果好,切削力小,表面质量好。

(2) MQL 切削中影响切削液渗透的因素很多,主要有供液方位、供液距离、供液量等。理论和试验结果表明:喷嘴处于主后刀面且距刀尖 20 mm 处供应较大量的切削液能达到良好的切削效果。

参 考 文 献

- 1 Klocke F, Eisenblatter G. Dry cutting[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(2): 519~526.
- 2 Wakabayashi Toshiaki, Inasaki Ichiro, Suda Satoshi. Tribological action and optimal performance: research activities regarding MQL machining fluids[J]. Machining Science and Technology, 2006, 10(1): 59~85.
- 3 Weinert K, Inasaki I, Sutherland J W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 511~537.
- 4 Lopez De Lacalle L N, Angulo C, Lamikiz A, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(1): 11~15.
- 5 刘力强,刘俊岩.切削液形成边界润滑层动力学模型的建立[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2005,23(3):473~478. Liu Liqiang, Liu Junyan. A kinetics model of boundary lubrication layer formation during cutting [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2005, 23(3): 473~478. (in Chinese)
- 6 陈日曜.金属切削原理[M].2版.北京:机械工业出版社,1994.
- 7 罗惕乾.流体力学[M].2版.北京:机械工业出版社,1998.
- 8 樱井俊男.切削液与磨削液[M].刘镇昌,译.北京:机械工业出版社,1987.
- 9 Amsedn A A, Rouke P J, Butler T D, et al. A computer program for chemically reactive flows with sprays[R]. Los Alamos National Laboratory Report, LA-11560-Ms, 1989.
- 10 Bei Chengxin, Gosman A D. Development of methodology for spray impingement simulation[C]. SAE Paper 950283, 1995.
- 11 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process [J]. Int. Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2): 151~173.
- 12 张幼桢.金属切削理论[M].北京:航空工业出版社,1988.

(上接第 172 页)

- 7 Wang S, Deltour J. Leaf temperature modeling of greenhouse grown tomato[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2004, 13(1): 64~70.
- 8 Stanghellini Cecilia, Tacke de Jong. A model of humidity and its applications in greenhouse[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(2): 129~148.
- 9 Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1): 25~34.
- 10 Boulard T, Baile A. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61: 37~48.