

节能型日光温室热环境的动态模拟*

陈青云 汪政富

(中国农业大学农业工程系, 北京 100094)

摘要: 本研究运用传热学和生物环境工程学的理论, 建立了日光温室热环境的动态数学模型。其目的是通过模型求解, 研究不同地区不同结构的日光温室热环境的变化规律, 为温室结构的优化及环境调控技术的改善提供帮助。

关键词: 日光温室; 热环境; 动态模拟

中图分类号: S261

由于三面环墙一面透光的节能型日光温室具有良好的保温性等特点, 适合我国国情, 发展迅速, 其建设面积已超过 1.67 万公顷^[1], 为缓解北方地区冬季蔬菜供应紧张的矛盾发挥着积极作用。但是, 目前此类温室在结构、建造、环境调节及栽培管理上缺乏必要的理论依据, 不少地方出现如墙体厚度过大或过小, 空间结构及采光面形状不尽合理, 从而造成建造费工费时, 保温效果达不到预期目的, 温湿度环境不良, 作物品质欠佳等问题。为了进一步提高此类温室的生产性能, 改善光温环境, 提高栽培作物品质及商品价值, 急需对温室结构和环境间的关系进行理论研究, 使日光温室的生产上一个新的台阶。

由于日光温室主要在中国应用, 所以国外对此的研究极为少见。从国际上来看, 在 60~80 年代温室兴盛发展时期, 国外发表过几例关于双屋面全光型温室环境动态模拟分析的研究成果^[2], 对完善该型温室的结构及环境调控技术和温室产业的发达提供了理论依据。但是这些研究成果只能在我国日光温室的研究中起参考作用, 直接应用是不可能的。因为两种温室在结构上存在着很大的不同, 不透光的墙体和外层保温覆盖物增加了日光温室环境形成的特殊性和复杂性。近年来, 国内在这一方面展开了许多研究, 对日光温室光照环境和结构间的关系作了数值实验及实测分析^[3~4], 也发表了关于日光温室微气候动态模拟分析的报道, 但在数学模型中忽视了室内土壤蒸发所引起的潜热交换^[5]。本研究则在上述研究的基础上, 利用传热学理论, 对日光温室的热环境建立了数学模型, 通过求解该模型, 可定量揭示日光温室热环境的变化规律, 对温室结构的优化设计和栽培的优化管理具有积极作用。

1 数学模型

为了方便计算和突出被研究对象的本质, 在建立数学模型时, 需要对研究对象作一些必要的简化, 本研究所作简化如下:

- ①室内气温分布均匀;
- ②根据传热学可知, 如平板壁的高(长)度和宽度是厚度的 8~10 倍, 按一维导热处理

收稿日期: 1995-03-23

*国家自然科学基金资助项目

时,其计算误差不大于1%^[6],因此,在本研究中忽略墙体沿长度和高度方向的导热,即只考虑沿厚度方向的一维导热;

③在计算土壤传热时,只考虑沿深度方向的一维导热。

日光温室的热量收支模型如图1所示,根据传热学理论,对组成温室系统的各内表面及室内空气建立热平衡方程(各面编号:透光面-1,地面-2,墙面-3,后屋顶-4)。

1.1 透光面热平衡 白昼阳光通过透光面射入室内,一部分直射光和反射光以及室内反射光被该面所吸收,与此同时,透光面与地面、墙体、屋面进行长波辐射换热,与室内和室外空气进行对流换热,还以辐射形式与大气层进行热交换。夜间透光面外面加以保温用的草帘或蒲席,以减少热损失。透光面动态热平衡关系为:

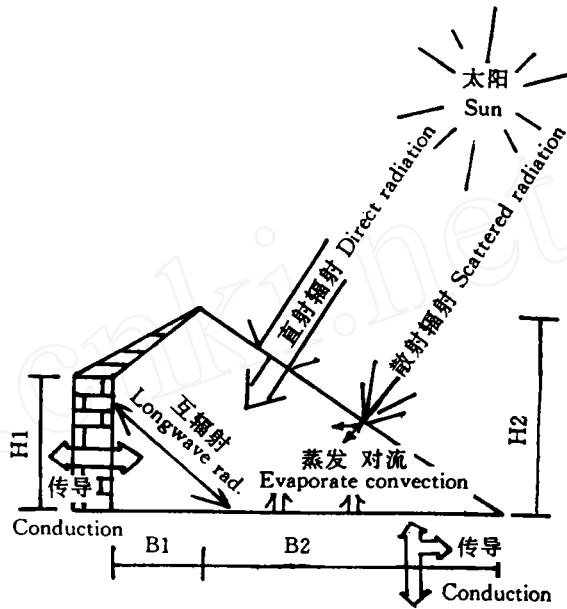


图1 温室热量收支模型

Fig.1 Thermal balance of a sun-light greenhouse(day time)

白昼:

$$h_{o1} A_1 (t_{ou} - t_1) + h_1 A_1 (t_{in} - t_1) + \sigma \epsilon_{21} f_{21} A_2 (T_2^4 - T_1^4) + \sigma \epsilon_{31} f_{31} A_3 (T_3^4 - T_1^4) + \sigma \epsilon_{41} f_{41} A_4 (T_4^4 - T_1^4) + w_1 k_{w1} l [X_m - X_{s1}(t_1)] + Q_1 + R_1 = 0 \quad (1a)$$

夜间:

$$A_1 k_1 h_1 / (h_1 - k_1) (t_{z1} - t_1) + h_1 A_1 (t_{in} - t_1) + \sigma \epsilon_{21} f_{31} A_2 (T_2^4 - T_1^4) + \sigma \epsilon_{31} f_{31} A_3 (T_3^4 - T_1^4) + \sigma \epsilon_{41} f_{41} A_4 (T_4^4 - T_1^4) + w_1 k_{w1} l [X_m - X_{s1}(t_1)] \quad (1b)$$

1.2 地面热平衡 根据上述简化,室内土壤传热为一维导热,所以可利用传热响应系数法计算土壤传热。地面热平衡关系如下:

$$h_2 A_2 (t_{in} - t_2) + w_2 k_{w2} l [X_{s2}(t_2) - X_{in}] + \sigma \epsilon_{12} f_{12} A_1 (T_1^4 - T_2^4) + \sigma \epsilon_{32} f_{32} A_3 (T_3^4 - T_2^4) + \sigma \epsilon_{42} f_{42} A_4 (T_4^4 - T_2^4) + Q_2 + R_2 + Z_2(0) (t_{sc} - t_2) A_2 + A_2 \sum_{j=1}^N Z_2(j) [t_{sc} - t_2(n-j)] = 0 \quad (2)$$

1.3 墙体热平衡 墙体具有蓄热作用,对于外温的波动会产生一定的延迟和衰减作用。同样根据上述简化,可用传热响应系数法计算墙体导热。墙体内表面的热平衡方程为:

$$h_3 A_3 (t_{in} - t_3) + \sigma \epsilon_{13} f_{13} A_1 (T_1^4 - T_3^4) + \sigma \epsilon_{23} f_{23} A_2 (T_2^4 - T_3^4) + \sigma \epsilon_{43} f_{43} A_4 (T_4^4 - T_3^4) + A_3 \{ \sum_{j=1}^N Y_3(j) [t_{z3} - t_3(n-j)] - \sum_{j=1}^N Z_3(j) [t_{z3} - t_3(n-j)] \} + Q_3 + R_3 + A_3 \{ Y_3(0) [t_{z3} - t_3] - Z_3(0) [t_{z3} - t_3] \} = 0 \quad (3)$$

1.4 屋顶热平衡 由于屋面多为轻型结构,热容量低,故可按稳态传热计算。其热平衡关系为:

$$k_4 h_4 A_4 / (h_4 - k_4) (t_{z4} - t_4) + h_4 A_4 (t_{in} - t_4) + \sigma \epsilon_{14} f_{14} A_1 (T_1^4 - T_4^4)$$

$$+\sigma \epsilon_{24} f_{24} A_2 (T_2^4 - T_4^4) + \sigma \epsilon_{34} f_{34} A_3 (T_3^4 - T_4^4) + Q_4 + R_4 = 0 \quad (4)$$

1.5 室内空气显热平衡 室内空气主要与地面、屋面、墙面和透光面进行对流换热, 并通过通风换气和外界空气进行热交换, 同时室内空气温度随着能量的转移而变化, 其动态热平衡关系为:

$$V \rho_{in} C_{in} [t_{in}(n) - t_{in}(n-1)] / (3.6 \Delta\tau) = h_1 A_1 (t_1 - t_{in}) + h_2 A_2 (t_2 - t_{in}) + h_3 A_3 (t_3 - t_{in}) + h_4 A_4 (t_4 - t_{in}) + L_a C_{ou} \rho_{ou} (t_{ou} - t_{in}) / 3.6 \quad (5)$$

1.6 室内空气水蒸汽量平衡 室内地面蒸发所产生的水蒸汽量, 一部分通过通风口排出室外, 一部分使室内空气的含湿量增加, 其动态热平衡关系式为:

$$\rho_{in} V [X_{in}(n) - X_{in}(n-1)] / \Delta\tau = w_2 k_{w2} A_2 [X_{s2}(t_2) - X_{in}] + L_a \rho_{ou} (X_{ou} - X_{in}) - w_1 k_{w1} A_1 [X_{in} - X_{s1}(t_1)] \quad (6)$$

记号:

h_{o1} ——室外空气和透光面间的对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;

$h_1 \cdots h_4$ ——1~4面和室内空气的对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;

$A_1 \cdots A_4$ ——1~4面的面积, m^2 ;

V ——温室容积, m^3 ;

t_{in} ——室内空气温度, $^\circ C$;

t_{ou} ——室外空气温度, $^\circ C$;

$t_1(n-j) \cdots t_4(n-j)$ ——某时刻1~4面的内表面温度, $^\circ C$;

$T_1 \cdots T_4$ ——1~4面的内表面绝对温度, K ;

$t_{s1} \cdots t_{s4}$ ——1~4面的外面综合空气温度, $^\circ C$;

t_{sc} ——土壤深度100 cm处的地温, $^\circ C$;

σ ——Stephen-Boltzmann常数, $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$;

ϵ_{ij} —— i 表面和 j 表面的系统黑度, $i=1 \cdots 4, j=1 \cdots 4, i \neq j$;

f_{ij} —— i 表面对 j 表面的辐射角系数, $i=1 \cdots 4, j=1 \cdots 4, i \neq j$;

k_i —— i 面物体的导热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;

$Q_1 \cdots Q_4$ ——1~4面吸收的直, 散射光, W ;

$R_1 \cdots R_4$ ——1~4面吸收的反射光, W ;

w_1, w_2 ——1面和2面的湿润经验数;

k_{w1}, k_{w2} ——1面和2面的水蒸气传递系数, $kg(m^{-2} \cdot h^{-1})$;

X_{in}, X_{ou} ——室内外空气的含湿量, $kg \cdot kg^{-1}$ 干空气;

$X_{s1}(t_1)$ ——在 t_1 下的饱和含湿量, $kg \cdot kg^{-1}$ 干空气;

Y_i, Z_i —— i 面物体的传热, 吸热响应系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;

ρ_{in}, ρ_{ou} ——室内, 外空气密度, $kg \cdot m^{-3}$;

C_{in}, C_{ou} ——室内, 外空气比热, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$;

L_a ——通风量, $m^3 \cdot h^{-1}$;

l ——水的蒸发潜热, $kJ \cdot kg^{-1}$;

τ ——时间, h

上述方程式构成描述日光温室热环境的数学模型, 其中包括微分方程和非线性方程, 难

以获得解析解,需要借助计算机求解。用 QUICK-BASIC 编制了求解软件。输入温室结构参数、物性参数和逐时室外气象参数,即可求出各内表面温度、室内空气温度和湿度。

2 结果与讨论

2.1 数学模型的验证 为了检验数学模型的精确度,在如图 1 所示的温室中进行了 2 个月(1993 年 12 月 1 日~1994 年 2 月 1 日)的实测,测量项目如下:室内外气温、湿度;各围护结构内表面温度;室内地表温度;地表以下 5,10,20,50,100 cm 深度的室内土壤温度;室外高度 1 m 处的风速。温度传感器为直径 0.3 mm 的 T 型热电偶,用自记多点测温仪以 1 小时为间隔自动记录,湿度测量仪为通风干湿计,其值由人工定时记录,风速测量仪为热线风速仪,其读数亦为人工定时记录。该温室的结构尺寸及主要模拟计算用参数取值如表-1 所示。

表 1 模拟温室尺寸及主要参数取值

Table 1 Variable data for simulating calculation

参数名 Variable name	取 值 Readings
温室结构尺寸 Size of greenhouse	$B_1=1.1\text{ m}$, $B_2=4.8\text{ m}$, $H_1=1.8\text{ m}$, $H_2=2.3\text{ m}$
墙体结构及材料的物性参数 ^[6] Physical properties of wall	水泥砂浆普通砖砌体(32 cm 厚);导热系数(Conductivity) $=0.56\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{C}^{-1}$, Brick wall(Thick=32 cm); 容重(Unit weight) $=1\ 800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比热(Specific heat) $=0.88\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ 保温覆盖用蒲席(Rush mat for cover);导热系数(Conductivity) $=0.07\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{C}^{-1}$,
主要表面的对流换热系数 ^[7] Convectivity of main surfaces	覆盖外表面(Outside of cover); $h_o=5+1.2V$, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{C}^{-1}$ 覆盖内表面(Inside of cover); $h_i=5\text{ W}\cdot\text{m}^2\text{h}^{-1}\text{C}^{-1}$ 室内地表面(Soil surface inside); $h_s=3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{C}^{-1}$ V: 风速(Wind speed), $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 2 是温室内气温计算值和实测值的比较,两者的平均相对误差为 3.8%。由图看出,两者的各时刻相对误差不尽一致,这主要是围护结构外表面和室外空气的对流换热系数是室外风速的函数,风速值是以 1 h 为间隔输入模型的,而实际上风速是瞬间变化的,在本研究中的土壤传热为一维导热的简化与实际情况也有较大差距。这些假设综合构成了模拟计算的误差,但相对误差仅为 3.8%,所以该数学模型的模拟结果是充分可信的,数学模型是可用来模拟温室热环境变化规律的。

2.2 数学模型应用举例 利用经过验证的数学模型,可以获得许多关于日光温室热环境的有用信息,例如:不同温室结构(墙体厚度、墙体材料、保温覆盖材料等)对室内空气温度的影响程度;温室采暖负荷等等。本文侧重分析了墙体材料和墙体厚度对室内气温的影响,其他应用拟在另文发表。

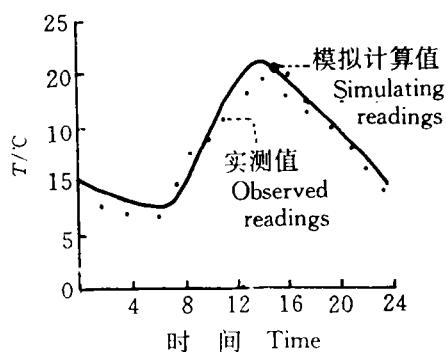


图 2 温室气温模拟计算值和实测值的比较
Fig. 2 Comparison between simulating readings and observed ones of air temperature inside the sun-light greenhouse

目前许多日光温室的墙体都是用泥土垒成,在同一气候环境条件下,墙体厚度对室内气温变化的影响程度,只有通过动态模拟才能较为精确计算。图 3 所示为 3 种墙体厚度(其他结构与表 1 所示相同)下的室内气温的变化,由图可知,墙体厚度为 2 m 的室内气温均较其他两种较薄墙体温室的室温为高,并且夜间的这种保温效果明显高于白昼,这一结果说明在日光温室中,墙体在白昼作为吸热体,而在夜间作为放热体发挥作用。从该图还可看出,墙体厚度从 50 cm 增至 100 cm,室内气温白昼提高 1.5℃,夜间提高 2.0℃,但墙体厚度从 100 cm 增至 200 cm 后,白昼和夜间的室内气温仅分别提高了 0.5℃和 0.7℃,这说明过分增加墙体厚度,并不能明显提高温室保温效果。该结果与亢树华等人^[8]的实测结果也是一致的。图 4 则是同样墙体厚度(50 cm),但墙体材料分别为红砖(导热系数=0.56 W·m⁻¹·℃⁻¹)、泥土(导热系数=1.20 W·m⁻¹·℃⁻¹)、加气混凝土(导热系数=0.2 W·m⁻¹·℃⁻¹)的三种温室的室内气温日变化。显然,其温度变化趋势与这三种材料的导热系数的大小相适应。

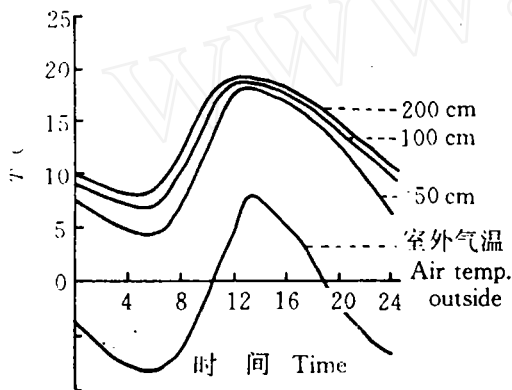


图 3 三种厚度土墙温室气温模拟值比较

Fig. 3 Differences between the simulating air temperatures in three wall thickness of sun-light greenouse

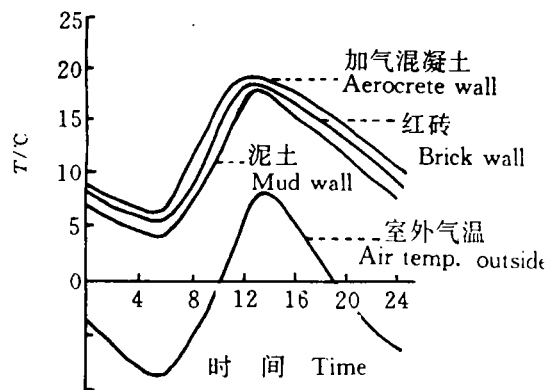


图 4 三种不同材料墙体(厚度 50 cm)的温室气温模拟值比较

Fig. 4 Differences between the simulating air temperatures in the three type walls of sun-light greenhouse (thickness=50 cm)

4 结束语

本研究利用传热学和生物环境工程学原理,对日光温室热环境建立动态数学模型,编制计算机程序对其求解,关于 1 日(24 小时)逐时室内气温的模拟结果和实测值比较,两者的平均相对误差仅为 3.8%,证明本数学模型可用来模拟研究日光温室的室内空气温湿度、墙体及地中传热量的变化规律。拟在今后的研究中,将土壤传热作为三维传热处理,建立更为精确的数学模型,以期获得更加精确的模拟结果。

参 考 文 献

- 1 陈端生. 中国节能型日光温室建筑与环境研究进展. 农业工程学报, 1994, 10(1): 123~129
- 2 Kimball B. Simulation of the energy balance of a geenhouse. J Agri Met, 1973, 11: 243~260

- 3 曹永华等. 温室采光设计软件的研制. 农业工程学报, 1992, 8(2): 64~71
- 4 陈青云. 单屋面温室光照环境的数值实验. 农业工程学报, 1993, 9(3): 96~101
- 5 李元哲等. 日光温室微气候的模拟与实验研究. 农业工程学报, 1994, 10(1): 130~136
- 6 彦启森, 赵庆珠合编. 建筑热过程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986, 187
- 7 三原义秋编著. 温室设计的基础与实际(日文). 东京: 养贤堂出版, 1983, 273
- 8 亢树华等. 节能型日光温室墙体材料及结构的研究. 中国蔬菜, 1992, (6): 1~5

Dynamic Simulation of Sun-Light Greenhouse Thermal Environment

Chen Qingyun Wang Zhengfu

(Dept. of Agricultural Engineering, CAU, Beijing 100094)

Abstract: A dynamic simulation of sun-light greenhouse thermal environment was made by using the heat transfer and bio-environmental engineering theory. The simulation results can be used to evaluate the greenhouse thermal environment and optimize the greenhouse structure.

Key words: sun-light greenhouse; thermal environment; dynamic simulation