

# 日光温室热环境模拟预测软件研究开发

马承伟, 韩静静, 李睿

(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:** 运用工程热物理和温室环境工程等理论, 构建了日光温室热环境的动态模型, 并采用有限差分等数值算法, 编制成日光温室热环境模拟预测的软件。结果表明: 该软件可以对给定的地理位置、室外气象条件下, 采用一定的建筑材料、建筑和构造方案的日光温室, 模拟其室内热环境全天的变化情况, 同时可对日光温室热环境性能进行预测和评价, 比较和确定优化的设计方案。

**关键词:** 日光温室; 热环境; 数学模型; 数值模拟; 软件

**中图分类号:** S 652.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2010)15-0069-07

日光温室具有节能、高效、低成本等突出优点, 但也普遍存在冬季夜晚温度过低等问题, 遇寒潮等不利天气情况, 室内仍难以保证适宜的条件, 致使作物受到冻害, 生产受到损失。如何提高日光温室建设水平和性能, 是设施园艺工程界非常关注的研究课题。

由于日光温室环境与结构相关理论还未形成科学的体系, 在其设计与新材料开发等方面, 还缺乏系统的理论指导和科学的方法。因此目前日光温室的设计和建造还主要是依据有限的经验, 普遍存在设计水平不高、性能潜力还未得到充分发挥的情况。

日光温室作为一种特殊的建筑, 其室内环境取决于复杂多变的外界条件、建筑体型、尺寸、墙体和屋面的材料与形式、地面以及栽培的植物、生产中的管理方式等多方面因素, 如何优化设计, 获得优良的性能, 是涉及材料、建筑、气象、热工以及园艺等多专业领域的复杂问题, 不能用简单的计算和分析准确地加以解决。

因此, 通过科学严密的理论, 采用准确的物理和数学模型, 在模拟的基础上, 结合一定的经验和分析计算的方法, 掌握在各种条件下, 不同日光温室设计方案的保温节能性能, 以指导日光温室的设计, 优化其建设方案, 是一个有效的途径。

从 20 世纪 90 年代开始, 我国研究者在日光温室热环境理论方面开展了较多研究工作, 李元哲、郭慧卿、陈

青云、李小芳、吴春艳、佟国红、孟力力、杨其长等都先后研究和提出过一些日光温室的热环境模型<sup>1-7</sup>。近年来我国日光温室也开始在国外得到设施园艺界的关注, 日本筑波大学山口智治、畔柳武司也研究提出了一个日光温室的热环境模型<sup>8</sup>。

由于日光温室墙体在其环境形成中的重要作用, 关于墙体的传热过程和保温、蓄热性能研究是日光温室热环境模拟研究中的一个重点内容。郭慧卿、李元哲、陈青云、吴春艳、佟国红、李小芳等采用频率响应法或反应系数法<sup>1-5, 9-11</sup>, 孟力力、杨其长等采用离散化的分层计算传热的方法<sup>7</sup>, 山口智治、畔柳武司、马承伟等采用差分的方法<sup>8, 13-14</sup>, 佟国红等采用 CFD 软件 Fluent 模拟等方法<sup>16, 17</sup>, 分别模拟和分析了日光温室墙体的传热, 这些研究为发展日光温室热环境模型和模拟方法做出了有益的探索。

由于日光温室墙体传热问题的复杂性, 根据理论分析计算要准确模拟墙体的传热, 还有大量需要进一步研究解决的问题。首先是选择合理方法的问题。频率响应法或反应系数法、以及一维差分法和分层计算传热的方法, 对于目前较多采用的梯形截面的日光温室墙体, 以及墙体在同一层内的不同部位采用不同材料的情况, 均不能够适用。严格地讲, 以上方法均是建立在墙体为一维传热假定的基础上, 这对于目前大多数高度小于 5 倍厚度的日光温室墙体, 是不太合适的。

在已有的研究中, 大多数采用 CFD 方法或离散化方法的模型, 对于边界条件和初始条件的处理方法上, 存在较多的问题。最突出的问题是对于初始条件的处理, 几乎都是采用模拟初始时刻的实测数据作为初始条件, 这种方法对于无法进行实际测试的、尚在设计方案阶段或正在开发中的新材料、新构造的日光温室, 是无

第一作者简介: 马承伟(1952-), 男, 博士, 教授, 现从事设施农业环境工程研究工作。E-mail: macwbs@cau.edu.cn.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BADA6B05, 2009BADA4B04); 现代农业(大宗蔬菜)产业技术体系建设专项资金资助项目(Nycytx-35-gw24)。

收稿日期: 2010-04-10

法应用的,这不能不说是一个很大的缺陷。

除上述墙体传热研究方面的问题以外,对地下传热的研究还更不够深入,绝大部分研究是将地下看作半无限大域的一维传热问题处理,不能反映地下向温室周边的横向的传热。此外,在对温室内外空气交换、室内地面和植物的腾发等方面,均还存在反映不够准确的问题。

同时,尽管国内在日光温室环境建模和模拟方面取得了一定的进展,但大部分日光温室模型是针对特定的地域和气候条件、有限的温室类型和特定的问题,引进了若干假设,其系统性、解决问题的完整性和普遍适用性还较差。尤其是,大部分模拟方法均还不够成熟,还不能全面满足通用性要求较高的温室环境综合模拟和优化设计的要求,未开发成为成熟的计算程序和编制成方便使用的模拟计算软件。

在吸收了过去日光温室热环境模型和模拟方法成果的基础上,根据工程热物理和温室环境调控工程等相关科学理论,构建了完整的日光温室热环境的模型,其重点是,对于墙体、后屋面和土壤中的传热过程采用了比一维传热更为准确的二维传热模型并采用有限差分法求解。在模拟程序算法中,创造了“预演法”的方法,成功地解决了模型中初始温度场确定的问题;以及将有限差分方程组变换为“三对角”方程组的方法,有效地提高了模拟运算的速度。在这些工作的基础上,开发了首个采用 VC++ 程序语言编制的日光温室热环境模拟预测软件。

### 1 日光温室热环境模型的总体结构

日光温室热环境模型总体上采用关系明确、便于升级和维护的模块化方案,由决定室内热环境的墙体、地下、覆盖层、通风和蒸发蒸腾五大模块,以及太阳辐射和室外气象条件等模块组成。采用以下微分方程反映各模块以及与室内热环境状况(室内气温等)的总体联系。

$$\rho_a c_p V \frac{dt_i}{d\tau} = Q_w + Q_s - Q_g - Q_e - Q_p \quad (1)$$

式中  $t_i$ —室内气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$ —时间,  $\text{s}$ ;  $V$ —室内容积,  $\text{m}^3$ ;  $\rho_a$ —空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ —空气比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $Q_w$ —墙体与后屋面向室内的散热量,  $\text{W}$ ;  $Q_s$ —地面向室内的散热量,  $\text{W}$ ;  $Q_g$ —前屋面损失热量,  $\text{W}$ ;  $Q_e$ —空气渗透损失热量,  $\text{W}$ ;  $Q_p$ —植物与地面腾发耗热量,  $\text{W}$ 。

### 2 墙体、后屋面与地下传热的模型与求解方法

墙体、后屋面与地下区域采用二维非稳态传热模型,其微分形式的控制方程如下<sup>[7]</sup>。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + S \quad (2)$$

二维模型与过去较多研究采用的一维模型相比,更

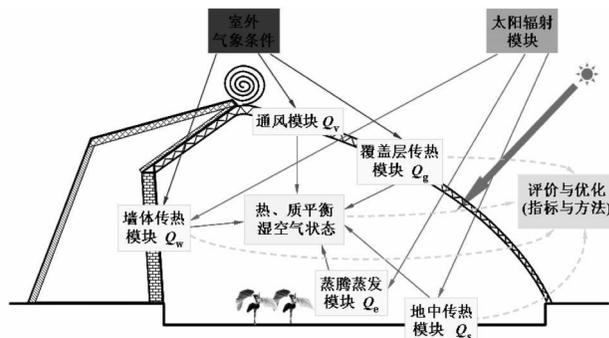


图1 日光温室热环境模型的模块化总体方案

Fig. 1 The overall plan of modularization of the thermal environmental model in solar greenhouse

加能够准确真实地反映日光温室墙体与地下传热过程同时又避免三维模型过于复杂,运算量过大的困难。二维模型可以较好地反映梯形等多种形状截面和不同部位采用不同材料的墙体,以及地下下沉的地下区域中的传热过程。

通过对时间与空间的离散化以及适当的变换处理上述求解日光温室传热的微分方程问题,可化为求解如下差分线性方程组的问题。

$$\begin{cases} P_{j,0} t_{j,0} - A_{j,0} t_{j,1} = K_{j,0} t_{j,0,0} + SS_{j,0} & (3), \\ -A_{j,j-1} t_{j,i-1} + P_{j,i} t_{j,i} - A_{j,i} t_{j,i+1} = K_{j,i} t_{j,i,0} + SS_{j,i} & (4), \\ -A_{j,n} t_{j,n} + P_{j,n+1} t_{j,n+1} = K_{j,n+1} t_{j,n+1,0} + SS_{j,n+1} & (5), \end{cases}$$

其中

$$SS_{j,i} = B_{j,i} (t_{j+1,i,0} - t_{j,i,0}) - B_{j-1,i} (t_{j,i,0} - t_{j-1,i,0}) + S_{j,i} (\Delta x)_{j,i} (\Delta y)_j \quad (6)$$

$$A_{j,i} = \frac{\lambda_{j,i} (\Delta y)_j}{(\Delta x)_{j,i}} \quad (7)$$

$$B_{j,i} = \frac{\lambda_{j,i} (\Delta x)_{j,i}}{(\hat{\varphi})_j} \quad (8)$$

$$K_{j,i} = \frac{\rho_{j,i} c_{j,i} (\Delta x)_{j,x} (\Delta y)_j}{\Delta \tau} \quad (9)$$

$$P_{j,i} = A_{j,i-1} + K_{j,i} + A_{j,i} \quad (10)$$

以上式中  $t_{j,i}$ ,  $t_{j,i,0}$ —节点  $(j, i)$  在计算时刻和及上一时刻的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta \tau$ —时间步长,  $\text{s}$ ;  $(\Delta y)_j$ — $j$  分段的高(宽)度,  $\text{m}$ ;  $(\Delta x)_{j,x}$ —节点  $(j, i)$  的控制宽度,  $\text{m}$ ;  $(\hat{\varphi})_j$ — $j$  分段与  $j+1$  分段中心距,  $\text{m}$ ;  $(\hat{\alpha})_{j,i}$ —节点  $(j, i)$  与节点  $(j, i+1)$  的间距,  $\text{m}$ ;  $\lambda_{j,i}$ —节点  $(j, i)$  处材料的导热系数,  $\text{J}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho_{j,i}$ —节点  $(j, i)$  处材料的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{j,i}$ —节点  $(j, i)$  处材料的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $S_{j,i}$ —节点  $(j, i)$  处内热源,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

$A_{j,i}$  与  $B_{j,i}$  的物理意义是节点  $(j, i)$  在 2 个方向的热阻的倒数,  $K_{j,i}$  的物理意义是节点  $(j, i)$  的热容量, 单位均为  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

以上(3)、(4)与(5)构成“三对角”形式的线性方程组,可采用高效率的“追赶法”求解。

墙体、后屋面与室内地下温度场求得后,采用以下计算式求得墙体与后屋、地面传向室内的热量  $Q_z$  与  $Q_s$  (W):

$$Q_w = \sum \alpha_i (\Delta y)_i L_{gh} (t_{wsj} - t) \quad (11),$$

$$Q_s = \sum \alpha_i (\Delta y)_i L_{gh} (t_{ssj} - t) \quad (12),$$

式中  $t_{wsj} - j$  分段墙体、后屋面内表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{ssj} - j$  分段地面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $L_{gh}$ —温室长度, m;  $\alpha_i$ —室内空气与墙体、后屋面和地面表面的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

### 3 前屋面、空气渗透以及植物与地面腾发耗热量

前屋面失热量  $Q_g$ , 空气渗透失热量  $Q_v$  和植物与地面腾发耗热量  $Q_e$  (W)由以下公式计算:

$$Q_g = K F_g (t_i - t_o) \quad (13),$$

$$Q_v = L \rho_a c_p (t_i - t_o) \quad (14),$$

$$Q_e = r K_v F_s (p_{ws} - p_w) \quad (15)。$$

式中  $t_o$ —室外气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F_g$ —前屋面面积,  $\text{m}^2$ ;  $K$ —前屋面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 白昼和夜间根据保温被或草帘的揭、盖状态, 分别取不同数值;  $L$ —空气渗透量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $p_w$ —温室内空气水蒸汽压, Pa;  $p_{ws}$ —室温下的空气饱和水蒸汽压, Pa;  $K_v$ —蒸腾蒸发综合系数,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ;  $F_s$ —温室地面面积,  $\text{m}^2$ ;  $r$ —水的蒸发潜热, 为  $2\,442\,000 \text{ J}/\text{kg}$ 。

## 4 室外气象条件

### 4.1 室外气象模式

为了反映不同气象条件下,日光温室的热环境性能,模拟程序可由用户选择采用不同模式确定气象条件。其中最基本的是采用6日的模拟周期,其中包括连续3个晴天(云量1成以下)和连续3个阴天(云量9成以上)。室外太阳辐射由软件内置程序,根据温室建设地区的地理纬度、经度和天气阴晴的设定、计算时刻等数据,自动计算得出。但用户需根据当地的气象情况,给出晴天的最高、最低气温,阴天的最高、最低气温4个数据。软件中对于任意时刻的室外气温,由内置的程序,根据用户给出的晴天最高、最低气温,阴天最高、最低气温,自动计算得出。

### 4.2 室外气温 $t_o$

设已知室外日最高气温  $t_{o, \max}$ , 日最低气温  $t_{o, \min}$ , 采用室外温度逐时变化系数<sup>[15]</sup>, 可以确定室外逐时气温。为便于在数值模拟求解中,确定任意时刻的室外气温,将室外逐时气温按付立叶级数展开的方法进行整理,得到任意时刻  $\tau(\text{h})$  的室外气温  $t_o$  的计算式如下:

$$t_o = \frac{t_{o, \max} - t_{o, \min}}{2} + (t_{o, \max} - t_{o, \min}) \times [t_p + a_1 \cos(\frac{\pi \tau}{12} - \varphi_1) + a_2 \cos(\frac{\pi \tau}{6} - \varphi_2)] \quad (16),$$

其中各系数的取值为:  $t_p = -0.0663$ ,  $a_1 = 0.462$ ,  $a_2 = 0.127$ ,  $\varphi_1 = 3.8$ ,  $\varphi_2 = 0.5$ 。

### 4.3 太阳辐射

太阳辐射是日光温室的主要热源,白昼,当太阳辐射照射到墙体、后屋面与地面时,各表面在吸收太阳辐射热量后,温度升高,一方面,将热量向墙体、后屋面与地面深层传递,另一方面,通过对流将热量传给室内空气。

晴天室外任意方位表面的太阳直接辐射照度  $I_D$  和散射辐射照度  $I_s$  计算如下<sup>[16]</sup>:

$$I_D = I_0 p^m \cos \beta \sin W / m^2 \quad (17),$$

$$I_s = \frac{(1-p^m) I_0}{2(1-1.4hp)} \frac{\sin h \cos^2 \theta}{2} \sin W / m^2 \quad (18)。$$

式中  $I_0$ —太阳常数, 取为  $1\,353 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $p$ —大气透明度, 根据地理位置和天气条件确定, 一般取为  $0.6 \sim 0.76$ ;  $m$ —大气质量;  $h$ —太阳高度角;  $\beta$ —太阳光线与墙面法线的夹角;  $\theta$ —墙面与水平面的夹角。

墙体外表面(北面)接受的太阳辐射热按室外散射辐射计算,墙体内表面(南面)接受的太阳辐射热为温室内的直接与散射辐射之和,是在以上计算的室外直接与散射辐射基础上,再根据温室屋面的透光率进行折算。阴天则按云遮系数法,对以上计算的室外直接与散射辐射进行折算。具体计算方法以及各种参数的计算或取值方法参见文献[16]。

## 5 模拟程序

以上数学模型编制成为计算机程序,计算框图如图2所示。

程序中,温室内温度的初始分布,包括空气温度、墙体和地下区初始温度场采用了“预演法”确定。即初始时刻采用一定的人为假定的温度分布,让程序按模拟时间段的外界条件模式周期地反复运行,使温室内各点的温度分布的周期变化逐渐趋于稳定一致,再以消除了最初人为设定的温度分布情况影响后的温度分布,作为温室热环境模拟的初始条件。最初人为设定的温度分布的影响是否已经消除,则根据监视点的周期温度变化规律是否确定一致来进行判断,即监测点在相隔一周期的某时刻的温度不再发生变化。

## 6 软件的方案

### 6.1 软件的界面

软件采用方便用户使用的对话框界面,完成数据输入、输出和存取等操作。

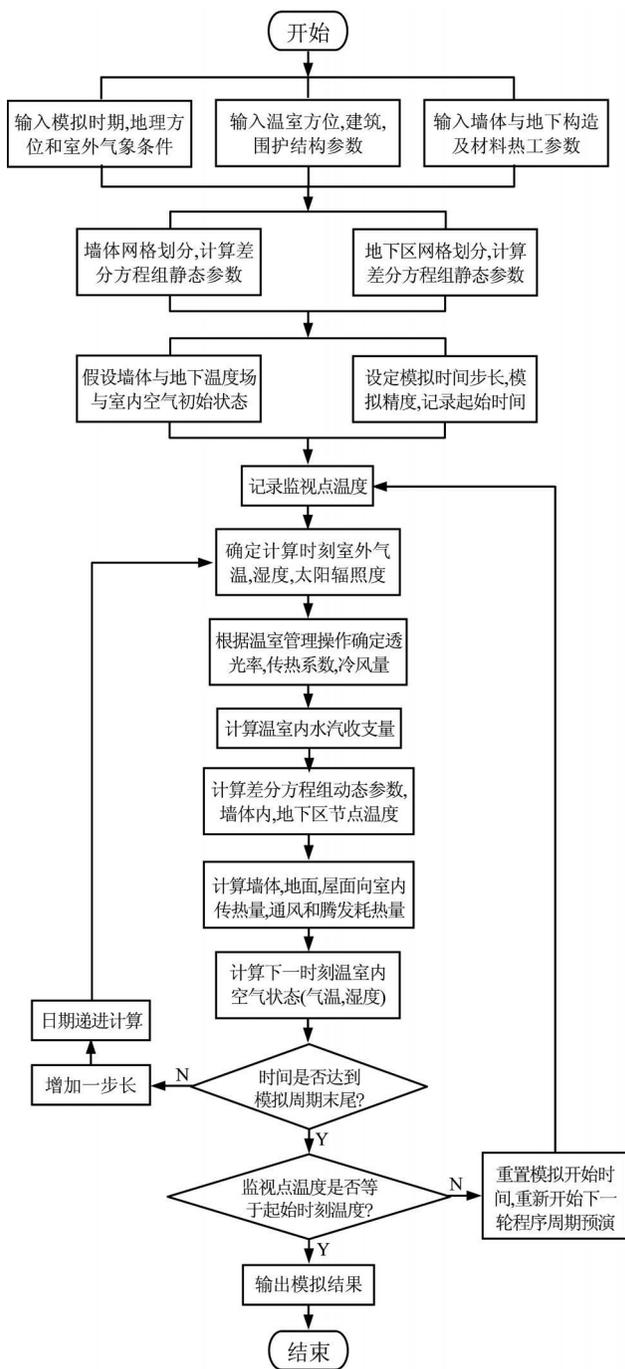


图 2 日光温室热环境模拟程序框图

Fig.2 The flow chart of thermal environmental simulation program in solar greenhouse

在主对话框(图 3)中, 点击“输入温室数据”与“输入气象数据”按钮, 即进入下一级子对话框, 进行温室数据和气象数据输入的操作。“保存模拟条件数据到文件”按钮, 将用户输入的所有(包括以下各级对话框输入的)模拟计算条件数据, 保存到指定的文件。而“从文件调入模拟条件数据”按钮则可调入以前用户保存的未完成输入的数据文件, 或以前模拟过的类似问题的文件, 在其基础上修改, 可以减少数据输入的工作量。“模拟方

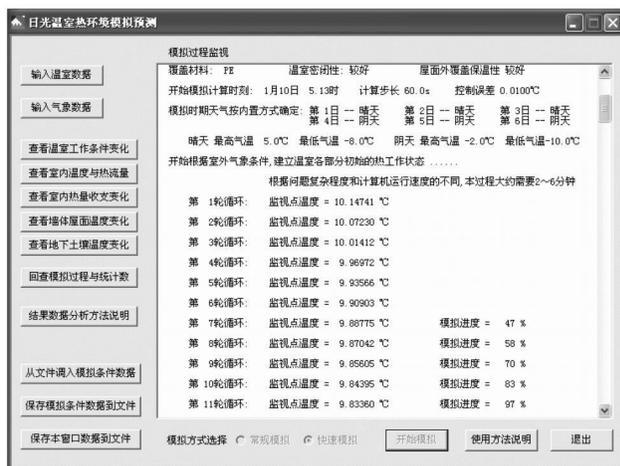


图 3 日光温室热环境模拟预测软件的主对话框

Fig.3 The main dialog box of forecast software of thermal environmental simulation in solar greenhouse

式选择”单选按钮, 有“常规模拟”和“快速模拟”2种选择。用户可根据计算准确性和计算速度方面的不同要求进行选择。“开始模拟”按钮, 开始模拟过程, 程序首先会检查输入数据的完整性和有无错误。如输入数据不完整, 或有明显错误, 将提示进行修改。

模拟过程监视窗口可显示模拟过程中的各种信息, 包括输入数据汇总的情况, 以使用户核对; 模拟过程的进度; 模拟过程中的各种日光温室室内环境和热工等参数的逐时变化, 以及统计数据 and 性能评价指标等模拟结果数据等等。由于结果数据很多, 可用对话框左侧中部的几个按钮, 选择输出不同类型的模拟结果的数据。“保存本窗口数据到文件”按钮, 可将窗口中显示的数据保存为文本格式的文件。

## 6.2 墙体、后屋面以及地下区域数据的输入方式

温室数据输入的方法, 较为困难和复杂的问题是如何将不同形状、构造和尺寸的墙体、后屋面和地下区域的尺寸和材料等参数, 采用便于理解的方式, 让用户方便地输入, 且数据表达方式, 需便于在程序中进行网格的自动划分。该软件对于不同形式构造和尺寸的墙体、后屋面与地下区间的情况, 进行了归纳整理, 形成了统一的截面信息表达和输入方式。

6.2.1 分区与大分段 墙体、后屋面与地下区间共分为 5 个分区, 即墙体、后屋面、墙下区、室内地下区、室外地下区(图 4)。每个分区中划分为若干大分段, 每个大分段中划分各材料分层。截面尺寸和材料参数等信息的输入, 是各分区逐个大分段依次分层输入。后屋面分区: 用垂直于后屋面内表面、并平行于墙体与后屋面内表面交线的平面, 从下至上划分为若干大分段  $h_{gsj}$ 。墙体分区: 用平行于地面的平面, 从下至上划分为若干大

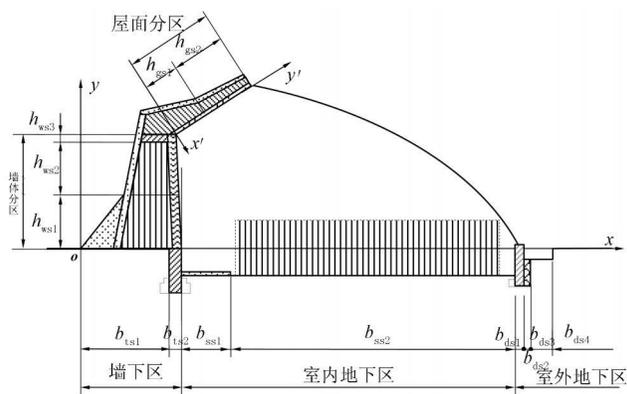


图4 墙体、后屋面与地下区间的分区与大分段

Fig.4 The subarea and primary subsection of wall, hinder roof and underground area

分段  $h_{wsj}$ 。墙体截面的数据输入又分为矩形截面和梯形截面 2 种情况, 用户根据温室的情况, 选择一种方式输入即可。地下各分区: 即墙下区、室内地下区和室外地下区, 分别用垂直于地面、并平行于温室长度方向的平面, 从北至南划分为若干大分段  $b_{sj}$ ,  $b_{ssj}$  或  $b_{dsj}$ 。

6.2.2 大分段的划分方法 从日光温室的截面上看, 大分段的界限为若干线段, 该线段, 对于后屋面是垂直于后屋面内侧的线段, 对于墙体为水平线, 对于地下各区为垂直线。分段界限的位置, 按同一大分段内的表面与材料的分层界线均不出现折线为原则确定。即在材料发生变化, 以及表面和材料界面发生转折处, 均应作为大分段的界面。

按上述方法划分大分段, 则各大分段内材料的分层情况均为较为简单的图形(图 5.6)。在一个大分段图形中, 材料分层尺寸可以用统一且简单的方式描述。对于后屋面, 各层材料的尺寸为上部厚度  $d_{gu}$  和下部厚度  $d_{gd}$ , 梯形截面墙体各层材料的尺寸为上部厚度  $d_{wu}$  和下部厚度  $d_{wd}$ , 矩形截面墙体各层材料的尺寸为厚度  $d_{wi}$ 。对于地下各分区的大分段, 各层材料的尺寸为深度  $d_{si}$ 。

### 6.3 模拟结果输出及分析

该软件可以计算输出大量结果数据, 包括温室内的气温、墙体、屋面和地下的温度, 各部位的热流量等等, 其中既有逐时变化的数据, 也有模拟时期中各种统计数据, 可以提供给用户对日光温室热环境进行全面的分析。

6.3.1 关于统计数据输出 其中的时间, 如未特别标明为北京时间者, 均为当地真太阳时。一般逐时变化数据按北京时间给出, 而统计数据按当地真太阳时计算。当地真太阳时与北京时间的关系如下: 当地真太阳时 = 北京时间 - (120 - 当地北纬度数) / 15 (19)。式中“夜间”是指当地真太阳时 9:00 时 ~ 次日 7:00 时, 共计 12 h。

“白天”是指当地真太阳时 9:00 ~ 15:00 时, 共计 6 h。某全天的统计数据, 是按当地真太阳时 5:00 时至次日 5:00 时, 共计 24 h 的数据统计。对于日光温室外保温覆盖物(草帘或保温被)早晨揭开时, 产生短暂时间的室内气温降低与相对湿度增高的情况, 统计参数时未予计入。注意区分墙体和后屋面内表面以及室内地面传递热量的含义, 包括: ①吸收的太阳辐射热量; ②传向温室内的热量(通过与室内空气对流热交换); 以及③向外方向传递的热量(从表面向墙体内, 后屋面内或地下土壤方向, 即朝向室外的方向, 通过导热方式传递的热量)。在任意时刻以及对于一段时期内, 对于每个内表面(墙体表面、后屋面内表面或室内地面), 以上参数应有以下关系: 内表面传向温室内的热量 + 内表面向外方向传递的热量 = 吸收的太阳辐射热量, (20)。在夜间, 无太阳辐射, 因此有: 内表面传向温室内的热量 = 内表面向外侧传递的热量, (21)。

6.3.2 模拟结果的分析评价方法 模拟结果数据的详细分析涉及工程热物理、建筑物理和设施园艺环境工程等方面的专业知识, 在此不能一一赘述。下面仅介绍一些简单的方面。夜间最低室内气温、夜间室内平均气温等, 可作为日光温室设计方案方面, 对不同的设计方案(规模、构造尺寸、墙体材料和构造、地面下沉情况、覆盖保温材料等)的日光温室性能进行预测评价, 进行方案的比较、优选的评价指标。墙体内表面夜间平均放热量、累积放热量等, 可作为墙体新材料开发和构造优化方面, 对不同材料、不同构造层次、各层材料不同厚度下, 墙体的保温蓄热性进行评价的指标。地下土壤各深度的(平均、最高、最低)温度, 分析掌握和评价地下植物根区的温度状况, 以及评价温室周边的保温性。此外, 从墙体、屋面、地下各部位的温度分布, 可以掌握温室各部位的保温性水平, 找出保温性差的部位, 以便采取针对性的措施。

### 7 结论与讨论

由于日光温室中的热物理过程非常复杂, 影响因素众多, 又难于精确描述, 因此其环境的准确模拟具有相当的难度, 该软件是一个初步的尝试。所以, 软件是否准确可靠、功能齐备、使用方便等, 还有待实践检验。但可以肯定, 初步的版本一定存在多方面的不足。

首先, 模拟的准确性还有待检验、提高, 软件功能和界面有待进一步丰富完善, 模拟结果在今后可以考虑采取可视化表达的方式。为方便使用, 今后拟增加配置计算模拟所需资料、数据, 拟建设相关数据库(气象、温室建筑材料、设备器材等)。

该软件的日光温室热环境模型的部分模块(蒸腾、

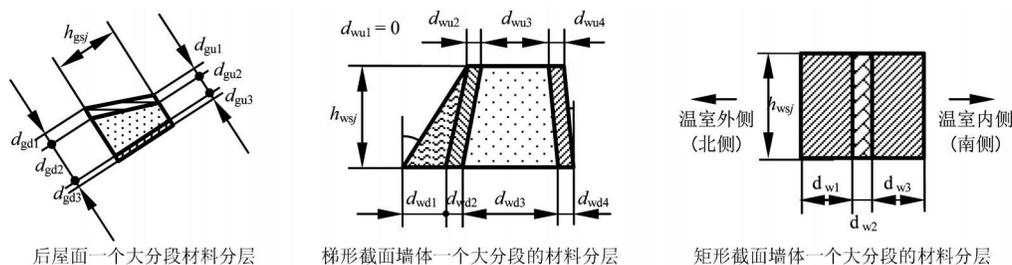


图5 墙体、后屋面内一个大分段的图形与材料分层

Fig.5 The figure and material layer of a primary subsection in wall and hinder roof

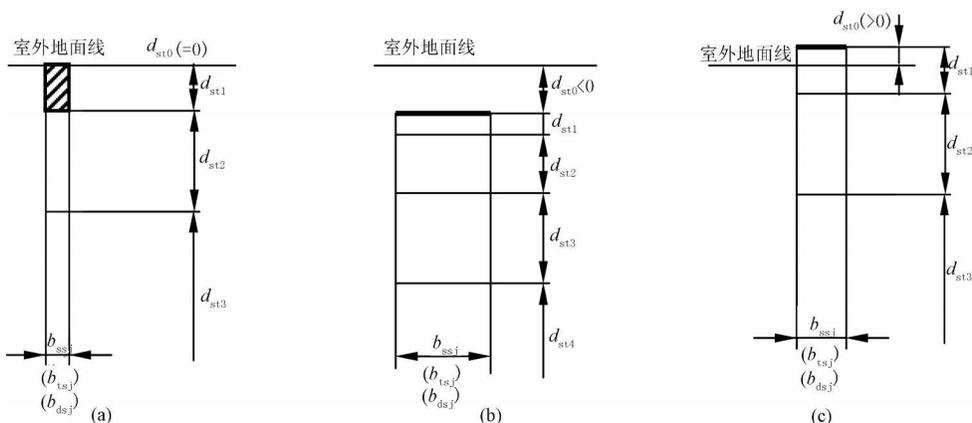


图6 地下各分区的大分段图形与材料分层

Fig.6 The figure and material layer of a primary subsection in underground area

蒸发、空气交换、前屋面传热等)还较为粗糙,有待进一步研究完善。对于室内空气的温度,是采用集总参数法,采用一个温度反映室内气温的状况,这种处理不能反映室内空间的温度不均匀性。前屋面形状对太阳辐射透过和室内光照环境的影响,模型中也未能得到反映。此外,对不同地区日光温室的模拟评价,如何采用典型的气象条件等等,均是模型和软件需要研究完善的问题。

希望通过对该软件的试用,由设施园艺领域的研究和工程技术人员、生产者对其进行检验,指出其不足之处,提供改进完善的意见,可以在今后通过持续不断的改进,使其最终成为日光温室的工程设计、建设、研究等方面的真正有用的辅助工具。

参考文献

[1] 李元哲,吴德让,于竹.日光温室微气候的模拟与实验研究[J].农业工程学报,1994,10(1):130-136.  
 [2] 郭慧卿,李振海,张振武等.日光温室温度环境动态模拟[J].沈阳农业大学学报,1994,25(4):438-443.  
 [3] 陈青云,汪致富.节能型日光温室热环境的动态模拟[J].中国农业大学学报,1996(1):67-72.  
 [4] 李小芳.日光温室的热环境数学模拟及其结构优化[D].北京:中国农业大学,2005.  
 [5] 吴春艳,赵新平,郭文利.日光温室作物热环境模拟及分析[J].农业

工程学报,2007,23(4):190-195.  
 [6] 佟国红,李保明,Christopher D M,等.用CFD方法模拟日光温室温度环境初探[J].农业工程学报,2007,23(7):178-185.  
 [7] 孟力力,杨其长,Genard P A Bot,等.日光温室热环境模拟模型的构建[J].农业工程学报,2009,25(1):164-170.  
 [8] 畔柳武司.日光温室の熱環境形成機構に関する基礎的研究[D].日本茨城:筑波大学,2003.  
 [9] 郭慧卿,李振海,张振武等.日光温室北墙构造与室内温度环境的关系[J].沈阳农业大学学报,1995,26(2):193-199.  
 [10] 李小芳,陈青云.墙体材料及其组合对日光温室墙体保温性能的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(4):185-189.  
 [11] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室墙体传热特性的研究[J].农业工程学报,2003,19(3):186-189.  
 [12] 佟国红,Christopher D M.墙体材料对日光温室温度环境影响的CFD模拟[J].农业工程学报,2009,25(3):153-157.  
 [13] 杨仁全,马承伟,刘水丽,等.日光温室墙体保温蓄热性模拟分析[J].上海交通大学学报,2008,26(5):447-453.  
 [14] 马承伟,卜云龙,籍秀红,等.日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J].上海交通大学学报,2008,26(5):411-415.  
 [15] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.  
 [16] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.  
 [17] 陶文铨.计算流体力学与传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,1991.

## Research and Development of Software for Thermal Environmental Simulation and Prediction in Solar Greenhouse

MA Cheng-wei, HAN Jing-jing, LI Rui

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

**Abstract:** Based on the theories of engineering thermophysics and greenhouse environmental engineering, the author built a dynamic model for the thermal environment in solar greenhouse, and used numerical algorithms like method of finite difference to develop a software to simulate and predict the thermal environment in solar greenhouse. If geographical position, meteorological conditions outside, construction materials and structure plan of the greenhouse are given, the software can simulate the entire day's changing situation of the thermal environment inside. It can also predict and estimate thermal environment function of solar greenhouse, and then help designers to choose an optimum design plan for solar greenhouse.

**Key words:** solar greenhouse; thermal environment; mathematical model; numerical simulation; software

## 中国首家蔬菜工厂在沈阳正式投入运营

2010年3月27日,由中国农业科学院与沈阳市人民政府主办,北京中环易达设施园艺科技有限公司与沈阳市小韩村靓马集团承办的“科技支撑农民专业合作社—小韩村现代农业现场座谈会”暨“小韩村农业专业合作社(蔬菜工厂)院士工作站揭牌仪式”在沈阳隆重举行。来自国家发改委、财政部、科技部、农业部等相关单位的领导60多人亲临现场,并就“蔬菜工厂”的启动和新农村建设进行研讨,这一活动的成功举办也标志着历时8个月建设的国内首家蔬菜工厂—沈阳市小韩村蔬菜工厂正式投入运营。

中国首家蔬菜工厂于2009年7月26日正式开工建设,由中国农业科学院和北京中环易达设施园艺科技有限公司负责承建。蔬菜工厂占地面积约45 000 m<sup>2</sup>,由科技展示区(约11 520 m<sup>2</sup>)、生产示范区(约23 040 m<sup>2</sup>)和配套设施区(约10 000 m<sup>2</sup>,包括育苗、加工、包装、冷藏等)等3个区组成。科技展示区重点展示蔬菜工厂化生产所采用的各种先进栽培模式,包括 NFT/DFT 水耕栽培、管道无土栽培、墙面立体无土栽培、立柱无土栽培、容器培等;生产示范区主要进行蔬菜的工厂化生产,由叶菜植物工厂、果菜植物工厂和植物育苗工厂等3个部分组成,采用国际上最先进的多段密植栽培、低段密植栽培、多层漂浮培、复合型雾培、多层细叶菜栽培以及新

式管道栽培等立体栽培技术;配套设施区主要进行产后的技术配套,重点进行种苗繁育、蔬菜加工、包装、冷藏等配套服务,为蔬菜工厂进入高端市场提供支撑。据测算,该蔬菜工厂每年可生产绿色有机蔬菜320万kg,产值可达5 000万元以上。

国内首家蔬菜工厂是中国农科院农业环境与可持续发展研究所与北京中环易达设施园艺科技有限公司近年来最新研制的高新技术成果,仅自主研发的专利技术就有30余项,是目前国际上首次在温室环境下进行立体、多层次工厂化栽培的成功尝试。“蔬菜工厂”由计算机系统对蔬菜生育过程的主要环境因子(温度、湿度、光照、CO<sub>2</sub>等)和营养液要素进行精确控制,采用浅层地能进行冬夏季温度调节,能保证蔬菜的周年连续高效生产;同时,通过立体、多层次栽培模式与工程技术的应用,使空间利用率大幅提高,产量可达常规温室生产的5~10倍。

蔬菜工厂是现代农业的有益尝试,为解决我国资源紧缺、高效农产品集约、绿色、可持续生产问题提供了可靠的技术保障。中国农业科学院副院长、中国工程院院士刘旭认为“蔬菜工厂真正实现了现代工程装备农业,大幅度提高了资源利用效率,为未来解决我国人口资源问题提供了有效的技术途径”。