

## 日光温室墙体一维导热的 MATLAB 模拟与热流分析

彭东玲<sup>1,2</sup> 张义<sup>1,2</sup> 方慧<sup>1,2</sup> 杨其长<sup>1,2\*</sup> 魏灵玲<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

2. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

**摘要** 为探明日光温室墙体层间温度变化及热量传递动态规律,采用有限差分法建立墙体一维非稳态导热模型,利用 MATLAB 编制相应的模拟程序,计算出日光温室墙体各点的温度和热流。结果表明:该模型能够比较准确模拟日光温室土墙的温度。墙体内侧存在有效蓄热层,它对日光温室室内热环境有积极的作用。墙体有效蓄热层的热流白天指向墙体外侧,夜间指向墙体内侧,因此它的厚度直接根据热流的方向确定。有效蓄热层与天气、墙体总厚度以及墙体热特性参数有关。2012-12—2013-01 期间有效蓄热层厚度为 0.26~0.45 m 不等,最大值出现在连续雪天。同时从理论上验证了 3.0 m 厚的温室土墙内部存在热流相对稳定的“热稳定层”。

**关键词** 日光温室;导热;MATLAB 模拟;有限差分法

中图分类号 S 625; TU 111.19

文章编号 1007-4333(2014)05-0174-06

文献标志码 A

## MATLAB simulation of one-dimensional heat transfer and heat flux analysis of north wall in Chinese solar greenhouse

PENG Dong-ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, FANG Hui<sup>1,2</sup>, YANG Qi-chang<sup>1,2\*</sup>, WEI Ling-ling<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Agricultural Energy-saving and Waste Disposal Key Laboratory of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract** To explore the changes of temperature and heat transfer characteristic in the north wall layer of the Chinese solar greenhouse, a one-dimensional difference model for unsteady heat transfer of wall was established. By the corresponding computer program with MATLAB, the temperature and the heat flux of any point in the wall at any time could be obtained. The analysis showed that the simulation model could accurately estimate the temperature of soil north wall in solar greenhouse. The effective heat storage layer existed in the inner surface of wall, which played a positive role on indoor thermal environment of solar greenhouse. As the heat flux of the effective heat storage layer was from the indoor to the outdoor during the day, and was from the outdoor to the indoor at night, the thickness of the layer was determined by the direction of heat flux. The effective heat storage layer was associated with the weather, the total thickness of wall and thermo physical properties of the wall material. The thickness of the storage layer that calculated in certain cases was from 0.26 to 0.45 m. A maximum value appeared on a continuous snowy day. In addition, it theoretically verified the existence of a thermal-stable layer inside 3 m soil wall whose heat flux was relatively constant in the solar greenhouse.

**Key words** solar greenhouse; heat transfer; simulation with MATLAB; difference equation

后墙是日光温室中重要的围护结构,有承重、保温和隔热的良好特性,对室内热环境具有重要的作用<sup>[1]</sup>。日光温室墙体传热特性一直是设施工程领域

研究的热点,通常采用的方法有试验测量法和数值模拟法。陈端生通过对墙体温度测试,分析了不同材料和构造的日光温室墙体的保温蓄热性能<sup>[2]</sup>。杨

收稿日期:2013-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31071833);国家“863”计划资助课题(2013AA102407)

第一作者:彭东玲,硕士研究生,E-mail:565778001@qq.com

通讯作者:杨其长,研究员,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail:yangq@ieda.org.cn

吴谕等对不同天气条件下日光温室各围护结构的保温性能进行了试验研究表明：墙体是温室中吸热量最大部分，“外阻高、内高容”的墙体结构更有利于改善室内热环境<sup>[3]</sup>。已有研究对不同厚度的日光温室土墙进行温度测试，提出了各地区土墙建造参数<sup>[4-7]</sup>。也有研究对土质墙体与室内地面的温度、蓄放热量进行比较分析<sup>[8-11]</sup>。试验测量法是传统的研究方法，至今仍是日光温室墙体传热特性的有效研究手段，但常常由于受到测量条件和精度的限制。要全面掌握日光温室墙体的保温蓄热性能，还需要用数值分析法进一步进行墙体导热的理论研究与分析。有研究用反应系数法模拟墙体内温度<sup>[12-15]</sup>。孟力力等用离散的思想处理分析墙体导热并建立了日光温室热环境模型<sup>[16]</sup>。佟国红等用 CFD 软件模拟日光温室及墙体热环境<sup>[17-21]</sup>。马承伟等用有限差分法模拟墙体温度，分析了日光温室墙体的保温蓄热性能<sup>[22-24]</sup>。综上所述，众多学者在日光温室后墙传热特性做了大量的试验和理论研究，但对墙内热流和有效蓄热能力的研究未见报道。

为此，本研究通过建立墙体热传导模型，对日光温室墙体温度分布规律及各层墙体热量动态传递规律进行模拟分析，以期探明日光温室各层墙体在导热过程中的作用和有效蓄热层的变化规律，为墙体建造提供依据。

### 1 数学模型

日光温室墙体受到室内外周期性外扰，导热是比较复杂的不稳定过程。根据传热学理论可知，如果墙壁的高度和宽度是厚度的 8~10 倍，按一维导热处理，其计算误差不大于 1%<sup>[25]</sup>。但目前大多数日光温室墙体高度小于厚度的 5 倍<sup>[23]</sup>，若按二维导热处理，边界条件和精度是个问题。由于沿高度方向的热量传导不会对室内热环境有较大的影响，所以为了简化计算，建立了沿墙体厚度方向的一维导热模型。用有限差分法进行模拟，墙内表面为坐标原点，在时间和空间上将问题离散化为差分方程，考虑第三类边界条件，按时间逐层计算。

#### 1.1 内节点离散方程的建立

本研究涉及日光温室墙体内部无内热源，将墙体内、外表面接收的太阳辐照度计入边界节点内热源；忽略湿传导及其相变热对墙体的热物性参数和温度分布的影响。墙体的热传导为一维非稳态的导热过程。

把墙体沿厚度方向分割为有限个网格单元，把原来在时间上连续的物理场离散为有限个时间节点，如图 1 所示。 $\Delta x_i$  和  $\Delta \tau$  分别是空间步长和时间步长。对内节点  $P(i)$  所代表的微元体，在  $x$  方向与之相邻的节点分别是  $L(i-1)$  和  $R(i+1)$ 。由于节点间距很小，可认为相邻节点间的温度分布是线性的，于是某时刻  $k$  节点  $P$  周围各点向  $P$  点的导热热量，根据傅里叶定律表示为

$$\Phi_{LP} = \lambda_{i-1} \frac{t_{i-1}^k - t_i^k}{\Delta x_{i-1}} \times 1 \times 1$$

$$\Phi_{RP} = \lambda_i \frac{t_{i+1}^k - t_i^k}{\Delta x_i} \times 1 \times 1$$

式中： $\Phi$  为节点导热热量，J； $\lambda$  为墙体材料的导热系数，W/(m·K)。微元体内能增量就是在墙体热传递过程中所蓄积下来的热量，用向后差分格式表示为

$$\Delta E_p = \rho_i c_{pi} \frac{t_i^k - t_i^{k-1}}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \times 1 \times 1$$

式中： $\Delta E$  为内能的增量，J； $\rho$  为墙体密度，kg/m<sup>3</sup>； $c_p$  为墙体材料的定压比热，J/(kg·K)。根据能量守恒定律，对内节点  $P(i)$  所代表的微元体写热平衡式，可得内节点  $P(i)$  温度的离散方程：

$$\Delta E_p = \Phi_{LP} + \Phi_{RP}$$

即

$$\rho_i c_{pi} \frac{t_i^k - t_i^{k-1}}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} = \lambda_{i-1} \frac{t_{i-1}^k - t_i^k}{\Delta x_{i-1}} + \lambda_i \frac{t_{i+1}^k - t_i^k}{\Delta x_i} \quad (1)$$

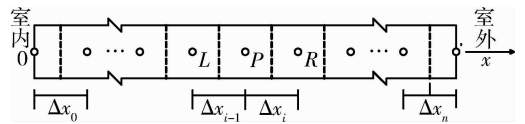


图 1 日光温室墙体节点划分

Fig. 1 Node splitting in the wall of solar greenhouse

#### 1.2 第三类边界条件下的边界节点离散方程

墙内、外侧采用第三类边界条件，已知室内外温度，将墙内、外表面太阳辐照度计入内热源，同样用热平衡法可得左、右边界节点方程分别为

$$\rho_0 c_{p0} \cdot \frac{t_0^k - t_0^{k-1}}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta x_0}{2} \times 1 \times 1 = h_1 (t_{f_1}^k - t_0^k) + \lambda_0 \frac{t_1^k - t_0^k}{\Delta x_0} \times 1 \times 1 + S_1^k \frac{(\Delta x)_0}{2} \times 1 \quad (2)$$

$$\rho_n c_{pn} \cdot \frac{t_{n+1}^k - t_{n+1}^{k-1}}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta x_n}{2} \times 1 \times 1 = h_2 (t_{f_2}^k - t_{n+1}^k) \times 1 \times 1 + \lambda_n \frac{t_n^k - t_{n+1}^k}{\Delta x_n} \times 1 \times 1 + S_2^k \frac{(\Delta x)_n}{2} \times 1 \quad (3)$$

式中:  $h_1$ 、 $h_2$  为墙体与室内、外空气的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $S_1^k$ 、 $S_2^k$  为墙内外表面太阳辐照度,  $W/m^2$ 。

$$\begin{cases} \left( \frac{\lambda_0}{\Delta x_0} + \frac{\rho_0 c_{p0} \Delta x_0}{2\Delta\tau} + h_1 \right) t_0^k - \frac{\lambda_0}{\Delta x_0} t_1^k = \frac{\rho_0 c_{p0} \Delta x_0}{2\Delta\tau} t_0^{k-1} + h_1 t_{f_1}^k + \frac{\Delta x_0 S_1}{2} \\ - \frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} t_{i-1}^k + \left[ \frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} + \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} + \frac{\rho_i c_i (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta\tau} \right] t_i^k - \frac{\lambda_i}{\Delta x_i} t_{i+1}^k = \frac{\rho_i c_i (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}{2\Delta\tau} t_i^{k-1} \\ - \frac{\lambda_n}{\Delta x_n} + \left( \frac{\lambda_n}{\Delta x_n} + \frac{\rho_n c_n \Delta x_n}{2\Delta\tau} + h_2 \right) t_{n+1}^k = \frac{\rho_n c_n \Delta x_n}{2\Delta\tau} t_{n+1}^{k-1} + h_2 t_{f_2}^k + \frac{\Delta x_n S_2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

采用隐式差分格式对以上方程进行离散化,不会受到稳定条件的限制,无条件稳定,所以在选择时间步长和空间步长时可以任意取值。为了保证结果的精确性,  $\Delta\tau$  取 600 s,  $\Delta x_i$  取 0.01~0.025 m。方程组构成的系数矩阵是一个主对角严格占优的三对角矩阵,计算方法选用高斯消元法(追赶法)求解。假定任意值(15 °C)作为初始值,计算数天的墙体温度值,前 10 d 用于模拟墙体内部的温度变化,建立起相应的温度场之后,计算值作为模拟结果。

#### 1.4 边界条件的确定

边界条件有室内、外气温、太阳辐照度,均通过实测获得。室外气温和太阳辐照度一般可以根据当地的气象资料确定。但是特定环境的温度无法从气象资料中获得,如室内气温。太阳辐照度也可以按照彦启森<sup>[25]</sup>的方法计算,但计算结果与实际情况差异较大,所以采用实测的太阳辐照度,再根据屋面采光率、墙体表面对阳光的吸收率进行折算。

选取日光温室实测的室内外气温,是以 24 h 为一个周期的函数,可以用 MATLAB 中的 cftool 工具箱进行傅里叶曲线拟合。若实测的时间间隔与计算时间步长相等,也可以直接代入测得的室内外气温。

## 2 热流量的计算

采用上面的方法可以算出各个时刻的墙体表面和内部各点的温度。单从温度的变化分析墙体热过程不够直观,有必要找出热流传递的动态规律。厚度小的墙壁在极短时间内的温度近似不变,利用差分思想,墙体各点在各个时间段的热流就可以求出。根据傅里叶定律求得  $k$  时刻  $P(i)$  到  $R(i+1)$  两节点间墙壁的热流量<sup>[26]</sup>:

$$q_i^k = -\lambda_i \frac{dt}{dx} = \lambda_i \frac{t_i^k - t_{i+1}^k}{\Delta x_i} \quad (5)$$

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 数学模型的验证

为了验证数学模型的准确度,于 2012-12-

### 1.3 节点离散方程组的求解

联立并整理(1)~(3)式,可得  $k$  时刻围护结构温度的方程组(4):

2013-01 在山东省寿光市(118°44'E, 36°52'N)蔬菜育种基地进行试验。试验温室东西走向,坐南朝北,方位角为 0°,长度 100.0 m,净跨度 10.2 m,脊高 4.3 m,温室室内下沉 1.0 m。东西山墙及后墙为夯实梯形土墙:下底 4.0 m,上底 1.8 m,高 3.1 m。后墙内表面用 240 cm 厚的砖墙和 10 cm 厚的混凝土做部分强化处理,处理了室内地面至 2.0 m 高的墙面;后墙外表面用 5 cm 厚的水泥预制板做强化处理,南采光面采用单立柱钢架结构,夜间覆盖醋酸乙烯膜(EVA 膜)。试验期间采用电动卷帘机卷放保温被,08:30 卷被,16:00 覆盖。日光温室无加温措施,当气温过高时进行简易通风,室内种植辣椒。

试验测点布置和使用仪器如下:在温室跨中偏西 5.0 m 处(避开温室中部未揭保温被及钢架结构对采光的影响),距室外地坪高 1.5 m(此时墙厚正好为 3.0 m)的后墙表面向墙内打孔布置温度测点,在不同厚度位置埋入 T 型热电偶线。温室内侧和外侧同一高度处布置相应的室内外气温测点,由德国 testo175 T3 数据记录仪测量并记录数据。在室内同一高度平行于墙面布置 1 个太阳辐照度测点,选用 QTS-4 全天候光辐数据自记录仪测试并记录数据。数据采集用 Agilent34970A 数据采集仪,每 10 s 采集 1 次。

模拟计算中的墙体热工特性参数有:土质墙体密度 1 824 kg/m<sup>3</sup>,导热系数 1.423 W/(m·K)<sup>[11]</sup>,定压比热 1 010 J/(kg·K)。对流换热系数  $h_1 = 8.7 W/(m^2 \cdot K)$ ,  $h_2 = 23 W/(m^2 \cdot K)$ <sup>[23]</sup>。考虑到受采光条件、作物、后坡遮挡以及墙与其他物体的长波辐射等因素,对测得的太阳辐照度作了相应折减,黏土的太阳辐射吸收率 0.8。

模拟计算得出 2013-01-05(晴)墙体温度见图 2。模拟与实测的墙体内部各测点温度变化见图 3。对比计算误差见表 1。

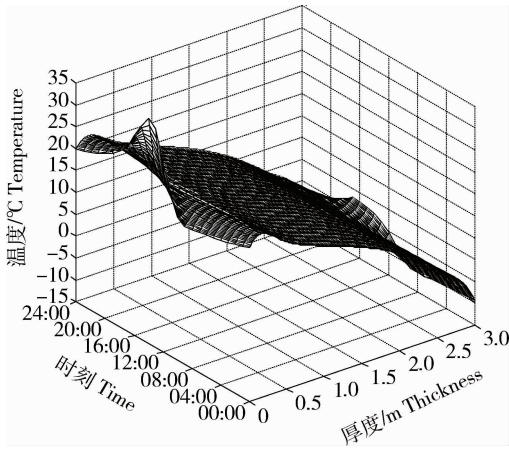
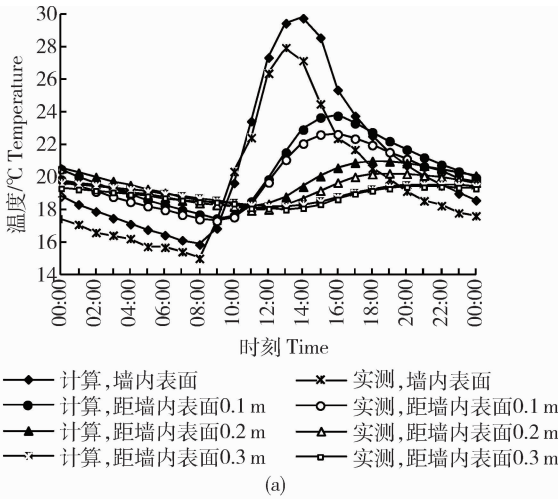


图 2 日光温室墙体模拟温度变化

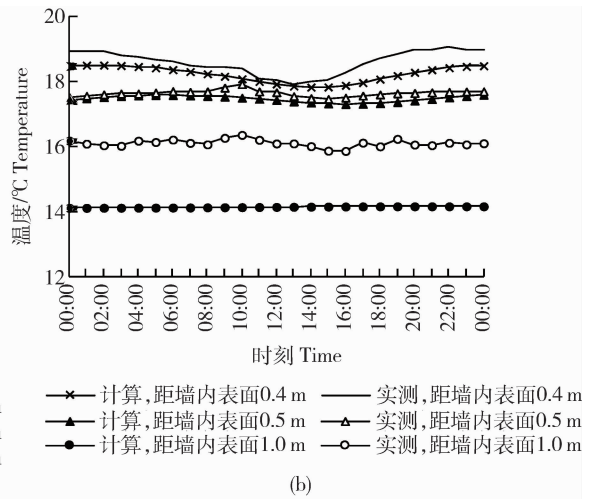
Fig. 2 Change of simulated temperature in the wall of solar greenhouse

2013 年 1 月 5 日模拟所得的墙内各点温度的变化趋势与实测值基本一致,产生误差的原因主要有:1)所选的验证日光温室墙体为梯形结构,而采用的是一维模型,只考虑墙体沿深度方向的导热,忽略高度方向的导热。2)计算导热过程时忽略湿传导及其相变热对墙体的热物性参数和温度分布的影响,但实际的墙体外表层出现了冻土层,且材料湿度由墙体内侧到外侧逐渐增大,导热系数随湿度增大<sup>[27]</sup>。3)对流换热系数会受温度和通风的影响,通风使室内气温分布不均匀。4)机械夯实土墙在建造时存在材料的不均匀,有裂缝。5)打孔布置测点,布置好后回填土,存在测量误差。如 1.5 m 和 2.0 m 测点误差较大的主要原因在于回填土不实,测点与室内空气相通,造成测得数据偏高。



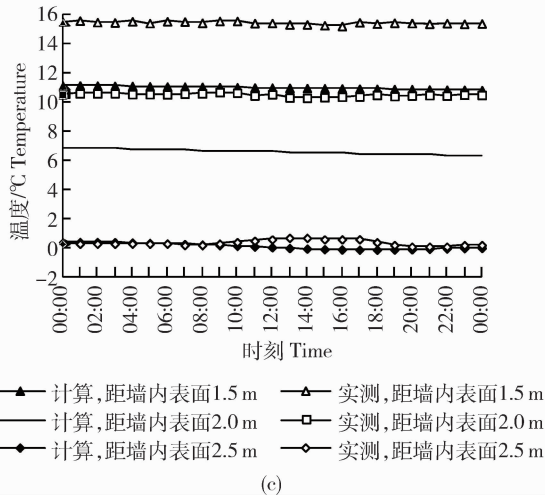
- ◆— 计算,距墙内表面 0.1 m
- 计算,距墙内表面 0.2 m
- ▲— 计算,距墙内表面 0.3 m
- ◆— 实测,距墙内表面 0.1 m
- 实测,距墙内表面 0.2 m
- ▲— 实测,距墙内表面 0.3 m

(a)



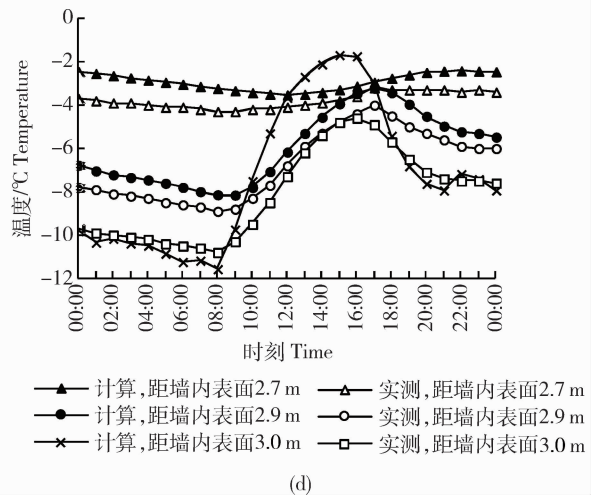
- ◆— 计算,距墙内表面 0.4 m
- ▲— 计算,距墙内表面 0.5 m
- 计算,距墙内表面 1.0 m
- ◆— 实测,距墙内表面 0.4 m
- ▲— 实测,距墙内表面 0.5 m
- 实测,距墙内表面 1.0 m

(b)



- ▲— 计算,距墙内表面 1.5 m
- 计算,距墙内表面 2.0 m
- ◆— 计算,距墙内表面 2.5 m
- ▲— 实测,距墙内表面 1.5 m
- 实测,距墙内表面 2.0 m
- ◆— 实测,距墙内表面 2.5 m

(c)



- ▲— 计算,距墙内表面 2.7 m
- 计算,距墙内表面 2.9 m
- ◆— 计算,距墙内表面 3.0 m
- ▲— 实测,距墙内表面 2.7 m
- 实测,距墙内表面 2.9 m
- ◆— 实测,距墙内表面 3.0 m

(d)

图 3 日光温室土质墙体温度模拟值与实测值相对比

Fig. 3 Comparison between simulated values and measured values in the soil wall of solar greenhouse

表1 后墙各测点误差分析

Table 1 Error analysis on the north wall measuring points

厚度/m Thickness	平均绝对误差/ $\pm$ °C MAE	最大误差/°C $E_{max}$	最小误差/°C $E_{min}$
0	1.4	4.1	0.5
0.1	0.5	1.1	0.1
0.2	0.5	0.9	0.1
0.3	0.2	0.3	0.1
0.4	0.4	0.7	0.1
0.5	0.2	0.4	0.1
1.0	2.0	2.2	1.7
1.5	4.4	4.3	4.5
2.0	3.9	4.2	4.6
2.5	0.3	0.7	0.0
2.7	0.9	1.3	0.3
2.9	0.8	1.3	0.3
3.0	1.2	3.6	0.1

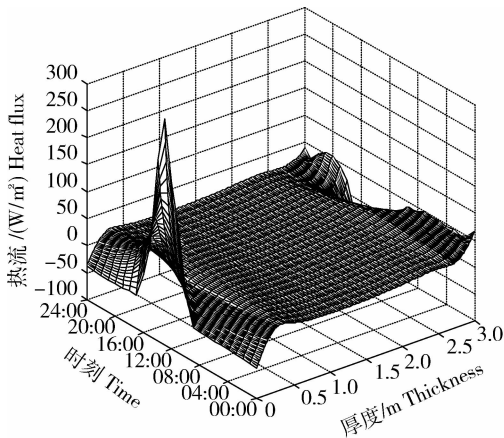
### 3.2 热流量分析

图4(a)为模拟计算得出的热流变化三维立体图,将其旋转至时间坐标处于同一水平线(图4(b))。模拟的一天中,夜间墙体向室内放热量为 $1.86 \text{ MJ/m}^2$ ,平均放热强度为 $32.39 \text{ W/m}^2$ 。另一部分吸收的热量

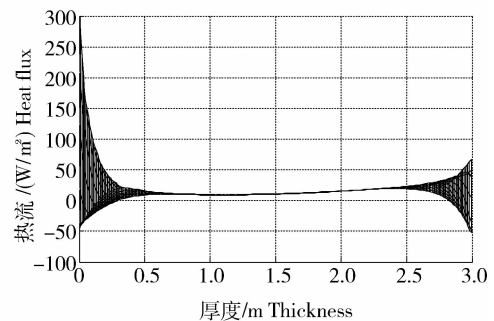
由墙体内侧向墙体外侧逐层传导。

根据热流的正负可以判定,墙体热流的主要方向是由墙体内侧到外侧。全天中,墙体各层热流没有恒为0的点。在墙体中间存在一个热流近似相等的区域,张志录从试验的角度找出并定义该层为热稳定层<sup>[7]</sup>。热稳定层各点的温度近似不变;热流近似相等,恒大于0,即热流方向始终指向墙体外侧(图4(b))。本研究理论上验证了热稳定层的存在。

墙体各层热流波动的波幅由外向内逐层递减,出现波峰的时间相应延迟。一天中,考虑墙体的蓄热、放热作用,墙体内侧存在一层薄壁直接或间接地将白天吸收的热量在夜间释放到室内空气中,定义这一层能向室内方向放热的薄壁为“有效蓄热层”。它对日光温室室内热环境有积极作用。有效蓄热层的热流白天指向墙体外侧,夜间指向墙体内侧。所以根据热流的正负得出,这一天3.0 m厚的日光温室墙体有效放热层厚度为0.29 m。笔者在模拟计算时发现,有效蓄热层厚度与边界条件、墙体热特性参数以及具体的天气状况有很大关系。在模拟的26 d中,有效蓄热层的厚度为0.26~0.45 m不等,其中最大值出现在连续雪天。有效蓄热层以外的墙体在热量传递过程中,不能将热量释放到室内空气,起保温的作用。



(a) X-Y-Z视角 X-Y-Z View



(b) X-Z视角 X-Z View

图4 日光温室墙体内模拟热流变化

Fig. 4 Changes of simulated heat flux in the wall of solar greenhouse

## 4 结论

本研究构建的日光温室墙体导热模型建立在一

维有限差分法的基础上,综合考虑了是室内外气象条件、太阳辐射以及温室通风对墙体热环境的影响。利用MATLAB强大的计算和可视化功能,编制计

算程序,运用该软件可以计算任意时刻墙体表面和内部各点的温度和热流,用于分析墙体导热特性。

1)日光温室墙体导热过程的数值模拟通过了试验验证,如文中所述,存在一定的误差,受验证墙体的热特性和结构特性影响较大。严格地讲,一维墙体导热模型不是准确的模型,但它可以简单快速地进行模拟,计算出有效蓄热层的厚度、墙体向室内、外传导的热量,并分析热流的变化;同时,一维模型也是二维或者更复杂模型的基础。运用该模型,能方便灵活地用于复合墙体,对于厚度小的矩形墙体模拟精度更高。该模型还可以模拟计算不同室内外温度条件下不同墙体温度和热流变化情况。

2)由模拟计算出 26 d 墙体温度和热流变化情况可以确定墙体存在有效蓄热层。传统意义上,人们认为墙体对日光温室热环境有重要的保温、蓄热功能,墙体内侧存在一层薄壁白天吸热,夜间向温室内部释放热量。第一次提出了“有效蓄热层”的概念,找出它的热流变化规律。有效蓄热层的热流方向是白天指向墙体内部,夜间指向墙体外部,对日光温室室内热环境有积极作用。墙体向室内放热的墙壁厚度达到的最大值为有效蓄热层厚度,由 1 天中热流的正负可以确定。有效蓄热层厚度与天气、墙体总厚度,以及墙体热特性参数等有关。计算得出 2012-12—2013-01 期间有效蓄热层厚度为 0.26~0.45 m 不等。对其他类型的日光温室墙体有效蓄热层还有待于进一步验证。同时,从理论上验证墙体中间存在温度变化小、热流相对稳定的热稳定层。为日光温室墙体保温蓄热和优化设计提供有意义的理论支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 马承伟,苗香雯.农业生物环境工程[M].北京:中国农业出版社,2005:4-6
- [2] 陈端生,郑海山,刘步洲.日光温室气象环境综合研究:墙体、覆盖物热效应研究初报[J].农业工程学报,1990,6(2):77-81
- [3] 杨昊谕,于海业.东北地区日光温室保温性能实验研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2007,28(3):8-10
- [4] 亢树华,戴雅东,房思墙,等.节能型日光温室墙体材料及结构研究[J].中国蔬菜,1992(16):1-5
- [5] 杨建军,邹志荣,张智,等.西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J].农业工程学报,2009,25(8):180-185
- [6] 易东海.日光温室土质墙体温度特性研究[D].郑州:河南农业大学,2011
- [7] 张志录,王思倩,刘中华,等.下沉式日光温室土质墙体热特性的试验与分析[J].农业工程学报,2012,28(12):208-215
- [8] 白义奎,刘文合,王铁良,等.辽沈 I 型日光温室环境及保温性能试验研究[J].农业工程学报,2003,19(5):191-196
- [9] 白青,张亚红,刘佳梅.日光温室土质墙体温度与室内气温的测定分析[J].西北农业学报,2009,18(6):332-337
- [10] 李建设,白青,张亚红.日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J].农业工程学报,2010,26(4):231-236
- [11] 张峰,张林华.下沉式日光温室土质墙体的保温蓄热性能[J].可再生能源,2009,27(3):18-20
- [12] 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
- [13] 郭慧卿,李振海,张振武,等.日光温室环境动态模拟 I:数学模型的建立与程序验证[J].沈阳农业大学学报,1994,25(4):438-443
- [14] 李振海,郭慧卿,张振武,等.日光温室几何参数与室内温度环境的关系[J].沈阳农业大学学报,1995,26(1):58-63
- [15] 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
- [16] 孟力力,杨其长,Gerard 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
- [17] 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
- [18] 佟国红,David M Christopher.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
- [19] 佟国红,白义奎,赵荣飞,等.日光温室复合墙与土墙热性能对比分析[J].沈阳农业大学学报,2011,42(6):718-722
- [20] 张林华,张峰,刘珊,等.下沉式土质墙体温室室内温度场的三维非稳态模拟[J].太阳能学报,2010,31(8):965-971
- [21] 蒋国振,胡耀华,刘玉凤,等.基于 CFD 的下沉式日光温室保温性能分析[J].农业工程学报,2011,27(12):275-281
- [22] 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:农业科学版,2008,26(5):411-415
- [23] 马承伟,陆海,李睿,等.日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J].农业工程学报,2010,26(6):231-237
- [24] 杨仁全,马承伟,刘水丽,等.日光温室墙体保温蓄热性能模拟分析[J].上海交通大学学报,2008,26(5):449-453
- [25] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1986:37
- [26] 章熙民,任泽霈,陈钟硕.传热学[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2001:15
- [27] 柳孝图.建筑物理[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:55-56