

# 基于二维传热过程的戈壁日光温室 热环境模拟及验证

宋 羽<sup>1</sup>, 吴乐天<sup>2</sup>, 艾合买提·阿不拉<sup>3</sup>, 邹 平<sup>2</sup>, 张彩虹<sup>2</sup>, 马彩雯<sup>2</sup>

(1. 新疆农业科学院 农作物品种资源研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业科学院 农业机械化研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091; 3. 新疆阿图什市农业技术推广中心, 新疆 阿图什 845350)

**摘 要:**构建南疆戈壁石砌筑日光温室热环境动态变化数值模型,更好地分析和评价戈壁日光温室蓄热保温性能,为优化温室设计与建造提供重要依据。结合工程热物理和温室环境工程等理论,构建戈壁石日光温室墙体和土壤二维传热的动态数值模型,并通过在南疆克孜勒苏柯尔克孜自治州戈壁石砌筑日光温室的室内、墙体以及土壤进行多点、连续温度采集,与模拟结果进行比较,验证模型的准确性。实测数据与模拟结果相关性分析显示,连续5 d模拟得到的室内空气、墙体表面以及土壤表面温度与实测数据呈现相同的变化规律,相关系数均在0.9以上,且模拟值与实测值之间的平均绝对误差在1.2~2.3℃范围内。表明所建的二维传热模型能较准确地模拟和预测戈壁石砌筑的日光温室内空气温度、墙面和土壤表面温度的变化规律,可以为该种类型温室的热环境及保温性能评估提供有效地参考依据。

**关键词:**戈壁日光温室;热环境;二维传热;数值模型;验证

**中图分类号:**S 626.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)21-0052-04

日光温室因其节能、高效、低成本等特点,在我国北方被广泛使用。但由于日光温室的设计和建造主要依据有限的经验,普遍存在设计水平不高<sup>[1]</sup>、环境性能较差<sup>[2]</sup>等问题。近年来随着全疆设施蔬菜产业的迅速发展,南疆三地州的设施面积也在迅速扩大。目前南疆日光温室的建设主要采用就地取材,以戈壁碎石砌筑为主,温室热性能也大大有别于研究成果较多的土墙及砖

墙温室,因此有必要针对性地阐明戈壁石日光温室内热环境规律,并通过构建精准的数值模型,预测、分析、优化构造方案,提高温室的热环境及经济性能。国内不少研究者都针对日光温室热环境模型<sup>[3-13]</sup>进行了研究,但现有日光温室热环境理论中关于温室墙体方面的研究,分析方法大多以一维传热为假定基础<sup>[6-9]</sup>,并不适用于目前南疆大多数高度小于5倍厚度的戈壁石温室墙体;同时,对于土壤热交换的计算,大部分研究将其作为半无限大域的一维传热问题处理<sup>[10-12]</sup>,而日光温室内土壤由于跨度相对较小、易受边界影响,这种计算方法会产生较大的误差,不能比较真实地反映实际情况。该研究在前人模型研究的基础上,采用二维模型描述戈壁石温室的墙体、后屋面和土壤中产生的传热过程,建立了温

**第一作者简介:**宋羽(1980-),男,硕士,助理研究员,研究方向为设施园艺。E-mail:18999119338@163.com.

**责任作者:**马彩雯(1965-),女,硕士,研究员,现主要从事设施农业环境工程等研究工作。E-mail:xjmcw2010@sina.com.

**基金项目:**新疆自治区“十二五”重大专项资助项目(201130104)。

**收稿日期:**2015-05-21

**Abstract:** A experiment was conducted to study the effect of different straw bio-fermentation strains on soil temperature, CO<sub>2</sub> concentration of solar greenhouse and the growth and development of over-summer tomato cultivation(*Lycopersicon esculentum* Mill.). The results showed that the built-in straw biological reactor technology treated by different straw bio-fermentation strains, could significantly improve soil temperature, CO<sub>2</sub> concentration, plant height and yield(3.6%—17.5%). On the basis of comprehensive compare of three kinds of straw bio-fermentation strains, the effect of ‘Zheng-Nong’ was the best than ‘Guang-Yu’ and ‘Pu-Yuan’.

**Keywords:** straw biological reactor; straw bio-fermentation strains; over-summer cultivation; tomato; solar greenhouse environment

室热环境动态数值模型<sup>[14]</sup>,并通过采集实际温室环境数据对模型的准确性进行了验证。较准确地预测和评价了不同构造方案和气象条件下的戈壁石日光温室的热环境性,以期优化日光温室建造方案,提升南疆日光温室建造水平提供理论依据,进而促进南疆日光温室产业发展。

## 1 二维热环境模型

整个日光温室热环境模型包括对室内热环境产生影响的墙体、土壤、覆盖层、通风和蒸发蒸腾五大传热分析模块,以及太阳辐射和室外气象条件等模块。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。

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

式中: $t_i$ -室内气温, $^{\circ}\text{C}$ ; $\tau$ -时间,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, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $Q_w$ -墙体与后屋面向室内的散热量,W; $Q_s$ -地面向室内的散热量,W; $Q_g$ -前屋面损失热量,W; $Q_v$ -空气渗透损失热量,W; $Q_e$ -植物与地面蒸发耗热量,W。

墙体、后屋面与土壤区域采用二维非稳态传热模型,其微分形式的控制方程如公式(2)。二维模型可以更好地反映目前常用的梯形断面墙体、复合材料砌筑墙体,以及下沉式日光温室土壤区域中的传热过程。

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

有关模型的详细介绍以及相关模块其解析过程、初始条件的确定等,在马承伟等<sup>[13]</sup>的研究文献中有详细介绍,这里不再赘述。

## 2 模型验证

为验证数值模型的精准性,该项目组于2015年1月在南疆克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称克州)阿图什市阿湖乡阿尔塞设施农业基地的戈壁石温室内进行了实际数据采集。

### 2.1 实测温室概况

试验温室位于克州阿图什市阿湖乡阿尔塞设施农业基地,温室方位角南偏西 $5^{\circ}$ 。温室采用钢结构骨架,EVA无滴膜覆盖,外覆盖棉质保温被,采用机械卷帘,墙体为戈壁碎石堆砌内加水泥砂浆抹面。温室详细构造参数见表1。其中温室于2014年11月12日定植番茄。

表1 试验温室的构造参数

Table 1 Variables of experiments greenhouse m					
跨度	长度	脊高	后墙高度	墙体厚度	下沉深度
Span	Length	Ridge height	Length of north slope	Wall thickness	Sunk depth
8.5	80.0	3.69	3.0	1.5	0.69

### 2.2 测试项目

室内环境因素测定:空气温度、空气相对湿度、墙体

厚度方向温度分布、温室跨度和深度方向的土壤温度分布、土壤热流量、太阳辐射照度。

室外环境因素测定:空气温度、空气相对湿度、太阳辐射照度、风速、风向。

墙体、土壤及室内空气温度采用T型热电偶测量,测量精度为 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ,空气温度均采用辐射罩遮挡;室内相对湿度采用日本Especmic公司的RS-12温湿度计测量并自动采集数据,测量精度为 $\pm 5\%$ ;太阳辐射由美国Onset公司的S-LIB-M003辐射传感器测量,太阳总辐射精度为 $\pm 10 \text{ W}/\text{m}^2$ ;墙体、土壤热流量传感器为荷兰Hukseflux公司生产的HFP01热流量传感器,测量精度为 $\pm 5\%$ ;室内热电偶、墙体热流量以及太阳辐射传感器的测试数据利用美国安捷伦科技有限公司的34970A数据采集仪进行自动采集;室外气象数据由美国Onset公司的HOBO-H21-002室外气象站测量,温度精度为 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ,湿度精度为 $\pm 4\%$ ,风速精度为 $\pm 1.1 \text{ m}/\text{s}$ ,太阳总辐射精度为 $\pm 10 \text{ W}/\text{m}^2$ 。自动数据采集的时间间隔均为10 min。

### 2.3 模型检验

在有关温室热环境模型验证评价指标方面,有文献采用了平均相对误差和平均绝对误差2个评价指标<sup>[9]</sup>。温度数据相对于其他数据比较特殊,对于2个不同水平的温度值(如 $5^{\circ}\text{C}$ 和 $25^{\circ}\text{C}$ ),同样一个温度波动(如 $1^{\circ}\text{C}$ )下的相对误差,若以 $0^{\circ}\text{C}$ 为基准,则2个相对误差可能会有很大差异(如20%和4%),若以绝对温度零点为基准,则2个相对误差(0.359%和0.335%)几乎没有差别,因此很难准确反映出实际的波动程度。鉴于此,以下模型验证采用平均绝对误差和最大绝对误差来评价模拟值与实测值之间的相差程度,以相关系数考核模拟值和实测值间的线性相关性。平均绝对误差、最大绝对误差、相关系数,各自定义如公式(3)~(5)所示:

$$\overline{Vx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{pi} - X_{mi}| \quad (3),$$

$$Vx_{max} = \max |X_{pi} - X_{mi}| \quad (4),$$

$$r = \frac{\text{cov}(X_{pi}, X_{mi})}{\sqrt{\text{cov}(X_{pi}, X_{pi})} \sqrt{\text{cov}(X_{mi}, X_{mi})}} \quad (5),$$

式中, $X_{pi}$ -模拟值; $X_{mi}$ -测量值。 $r$ 越接近1,线性关系越密切<sup>[12]</sup>。

小寒(2015年1月6日)和大寒(2015年1月20日)是一年相对较冷的一段时间。测试结果显示该段时间室外最低温度出现在1月17日,达 $-13.1^{\circ}\text{C}$ ,因此选取1月16—20日这段时间的数据进行分析。且这段时间的天气状况包括了多云、晴、晴、多云转晴等天气,比较典型。

以实测的室外空气温度、太阳辐射等数据作为室外气象条件,利用模型模拟计算了室内空气温度、温室后

墙内表面温度以及室内土壤表面温度,模拟结果与实测数据的对比如图 1a~c 所示。统计的模拟值与实测值之间的平均绝对误差、最大绝对误差以及相关系数,如表 2 所示。

从图 1 和表 2 可以看出,连续 5 d 的模拟数据与相应的实测数据之间具有良好的一致性,基本能反映出温室的实际温度环境状况及变化规律。其中,室内空气温

实测值略高于模拟值;在墙体内表面温度方面,晴天情况下的拟合效果良好,但是多云天气下的模拟数据略高于实测;在土壤表面温度方面,二者日变化的规律相同,只是所有白天的模拟温度都高于实测温度,总体看来,模型模拟值与实测值吻合程度较好,可以比较准确的模拟日光温室热环境的变化。

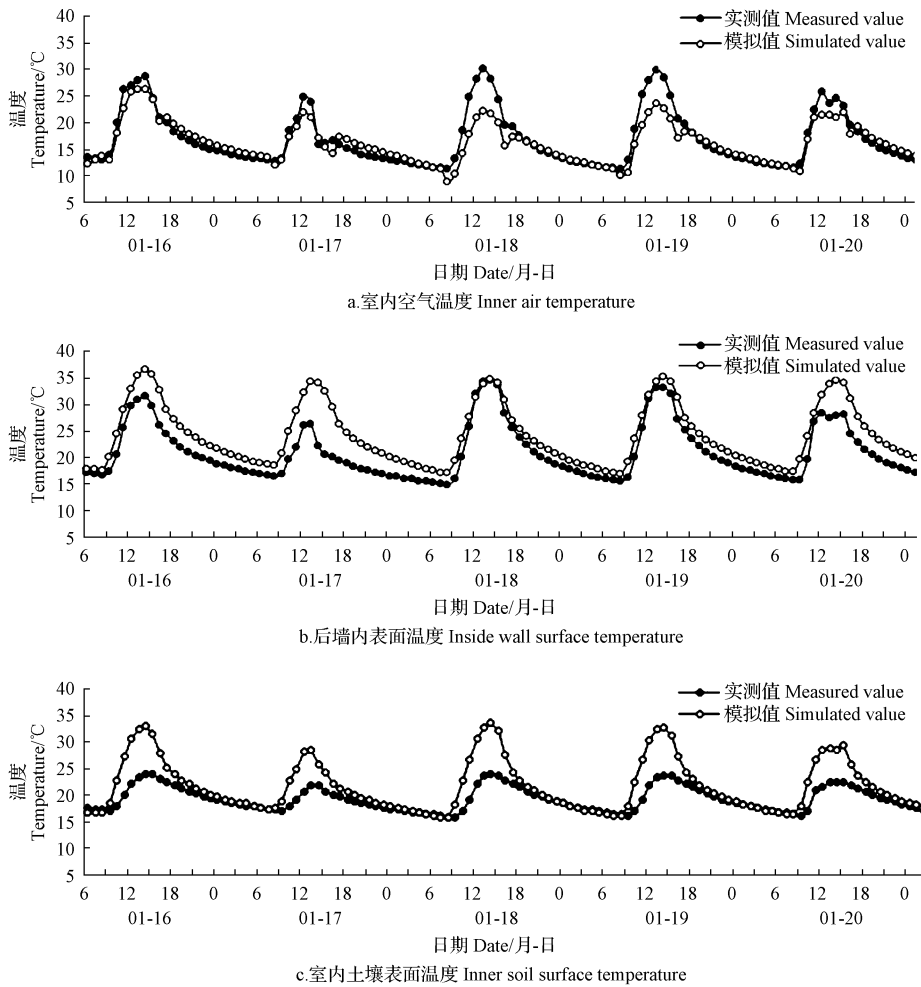


图 1 室内温度模拟值和实测值(2015 年 1 月 16—20 日)

Fig. 1 Simulated and measured temperature distributions inside the greenhouse

表 2 温度模拟值与实测值平均绝对误差及相关系数(2015 年 1 月 16—20 日)

Table 2 Average relative error and correlation coefficient of the simulated and measured temperatures

位置 Position	平均绝对误差 Mean absolute error/℃	最大绝对误差 Maximal absolute error/℃	相关系数 Correlation coefficient
室内空气温度 Inner air temperature	1.02	6.95	0.934
后墙内表面温度(距地面 1.5 m 高) Inside wall surface temperature(1.5 m from ground)	2.07	8.14	0.943
温室土壤表面温度 Inner soil surface temperature	2.66	8.57	0.936

3 讨论与结论

模拟数据和实测数据的变化规律一致,且二者数据基本吻合,只是存在少量差异。造成不同因子间差异的原因可能有以下几个方面:室内空气温度在晴天的白

天,实测值略高于模拟值,可能是传感器遮阳不够理想,受到了太阳辐射的影响;墙体内表面温度在多云天气下的模拟数据略高于实测,可能是温室保温被的实际管理模式与模型内部设定的管理模式之间存在差异导致的;

而土壤表面温度方面,可能是由于土壤表面覆有地膜、且地膜内表面严重结露,影响了土壤表面实际接受到的太阳辐射,而模型中对于地膜的影响考虑还不是很细致。

同时模型目前在植物与土壤的蒸腾蒸发、温室换气以及前屋面传热(包括保温被管理模式)等方面的描述还不是很细致,墙体材料以及土壤的特性参数也不够全面,部分模拟结果与实测有一定的出入,因此在今后的研究中将针对这些问题做进一步完善。

运用工程热物理和温室环境工程等理论,基于墙体和土壤二维传热过程,构建的日光温室热环境的动态数值模型,能够比较准确预测南疆戈壁石砌筑日光温室室内空气温度;能够比较准确地反映室内后墙表面及土壤表面温度的变化规律,可以作为该种温室环境评价的参考指标,在日光温室的环境预测及构造方案评价方面具有较好的推广应用前景。

#### 参考文献

- [1] 陈杰,杨祥龙,周胜军,等.中国设施园艺研究现状与发展趋势[J].中国农学通报,2005,21(1):236-238.
- [2] 刘在民.节能型日光温室温光性能优化及其应用效果研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2007.
- [3] 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.
- [4] 郭慧卿,李振海,张振武,等.日光温室温度环境动态模拟[J].数学模型的建立与程序验证[J].沈阳农业大学学报,1994,25(4):438-44.
- [5] 陈青云,汪政富.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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 梁浩,方慧,杨其长,等.日光温室后墙蓄放热增温效果的性能测试[J].农业工程学报,2013,29(12):187-193.
- [9] 佟国红,DAVID M C.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.
- [10] 王思倩,张志录,侯伟娜,等.下沉式日光温室南侧边际区域土壤温度变化特征[J].农业工程学报,2012,28(8):235-240.
- [11] 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.
- [12] 佟国红,李保明,DAVID M C,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.
- [13] 马承伟,韩静静,李睿.日光温室热环境模拟预测软件研究开发[J].北方园艺,2010(15):69-75.
- [14] 曹晏飞,张建宇,赵淑梅,等.山东寿光日光温室冬季热环境测试[C]//中国农业科学院.设施园艺创新与进展:2011 第二届中国·寿光国际设施园艺高层学术论坛论文集,2011:152-158.
- [15] 宇传华,颜杰.Excel 与数据分析[M].北京:电子工业出版社,2002:193-200.

## Simulation and Verification of Thermal Environment in Gobi Solar Greenhouse Based on the Two-dimensional Heat Transfer Process

SONG Yu<sup>1</sup>, WU Letian<sup>2</sup>, ABULA Aihemaiti<sup>3</sup>, ZOU Ping<sup>2</sup>, ZHANG Caihong<sup>2</sup>, MA Caiwen<sup>2</sup>

(1. Institute of Germplasm Resources, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi, Xinjiang 830091; 2. Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi, Xinjiang 830091; 3. Agricultural Technology Promotion Center of Autushi, Atushi, Xinjiang 845350)

**Abstract:** This project aimed to build a dynamic model for the thermal environment of Gobi solar greenhouse in south Xinjiang Province, which promoted analyzing and evaluating heat isolation performance of such kind of solar greenhouse and offered important basis for optimizing greenhouse design and construction. Based on the theories of engineering thermophysics and greenhouse environmental engineering, a dynamic model for the thermal environment in Gobi solar greenhouse was built. The continuous air temperature, soil temperature and wall temperature in Gobi stone made solar greenhouses in Ke District, South Xinjiang was tested to analyze and verify the model. Five days' measured data had same variation with the simulated ones with correlation coefficient over 0.9, and the average relative errors between them were about 1.2—2.3°C. The results showed that this model could accurately predict the temperature transformation rule in Gobi stone solar greenhouse and could be an important reference for heat environment and isolation performance evaluation of such kind of greenhouse.

**Keywords:** Gobi solar greenhouse; thermal environment; two-dimensional heat transfer; numerical model; verification