

# 严寒地区保温型塑料大棚土壤蓄放热特性

田东坤, 宋卫堂, 王平智, 程杰宇, 梁 超, 赵淑梅\*

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 土壤温度及蓄放热特性是保温型塑料大棚土壤传热特性的重要体现。因此, 为定性、定量地阐明棚内土壤温度变化规律和蓄放热特性, 在严寒地区生产性大棚内进行了试验测试, 并通过构建大棚土壤热量平衡简化方程、温差拟合等方法对土壤蓄放热特性进行了理论分析。研究结果表明: 1) 土壤温度波幅随深度的增加呈幂函数递减, 通过计算得出测试地区大棚土壤的蓄热层平均厚度约为 0.55~0.80 m; 2) 棚内土壤横向地中传热损失占土壤总热损失的 9.8%~24.7%, 若将此部分热量用于提高土壤温度, 则棚内土壤平均温度可提高 0.3~0.5 °C; 3) 天气条件对土壤蓄放热性能的影响较大: 晴天日累积蓄热量比多云天多 37.2%~50.6%左右, 日累积放热量比多云天多 44.7%~64.3%; 晴天的最大蓄热流量和日累积蓄热量均是阴天的 4 倍以上, 与蓄热性能相比, 晴天与阴天的土壤放热性能差异较小。土壤蓄放热量主要受表层土壤与气温温差的影响, 棚内外气温差对其影响较小。

**关键词:** 土壤; 温度; 保温型大棚; 蓄热层厚度; 热量平衡估算方程; 热损失; 蓄放热特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.022

中图分类号: S625

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-03-0189-08

田东坤, 宋卫堂, 王平智, 等. 严寒地区保温型塑料大棚土壤蓄放热特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 189-196.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.022 <http://www.tcsae.org>

Tian Dongkun, Song Weitang, Wang Pingzhi, et al. Soil heat storage and release characteristics of the plastic tunnel with external thermal insulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 189-196. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.022 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

保温型塑料大棚是近年来在生产实践中出现的一种大棚形式, 结合了传统日光温室和塑料大棚两者的优点。该类大棚与日光温室相比, 具有建设成本低、土地利用率高特点, 而与传统塑料大棚相比, 又具有作业空间大、保温性能好等优势, 因此在全国各地得到了广泛应用。根据前期调研发现, 内蒙古、山东等地的部分保温型大棚中实现了不加温条件下番茄、辣椒等蔬菜的越冬生产, 同时调研也发现, 保温型大棚近年来在西藏拉萨、日喀则等高寒高海拔地区也开始推广, 可以说该类大棚正在成为中国园艺设施的发展趋势之一。然而, 目前该类型大棚的设计建造、环境调控等主要依靠经验, 尚缺乏相关的理论指导。为促进该类设施的科学发展, 亟需开展其热环境的形成机制、变化规律及影响因素等的理论研究。而在大棚类设施中, 围护结构不具有蓄热能力, 土壤是其唯一的蓄热体和放热热源, 因此, 分析土壤的温度分布、变化规律、以及土壤的蓄热放热特性, 就成为该类大棚热环境研究的关键<sup>[1-3]</sup>。

关于温室设施土壤温度, 前人做了较多的探索与研

究<sup>[4-7]</sup>。其中, 在土壤温度变化规律方面, 李天来等<sup>[8]</sup>研究了作物对辽沈型 I 日光温室土壤温度日变化的影响, 结果表明, 不同天气条件下棚内表层土壤的日变化可以拟合为正弦函数。范爱武等<sup>[9]</sup>利用多孔介质中的传热传质数学模型对不同环境条件下的土壤温度日变化进行了研究, 结果表明, 土壤温度主要受室内空气温度和土壤表面截获的辐射能的影响, 且这种影响随着土壤深度的增加而减小; 何雨等<sup>[10]</sup>对辽沈 I 型日光温室室内土壤温度变化的影响因素进行了研究, 认为太阳总辐射、室内外气温、室外风速都是影响温室土壤温度的主要因素, 并建立了这 4 个要素与室内地表温度之间的非线性回归方程; Smerdon 等<sup>[11]</sup>、贾红等<sup>[12]</sup>认为气温是土壤温度变化的主要影响因素, 并分别对不同深度土壤温度的年变化和日变化进行了研究, 建立了气温与浅层土壤温度的关系模型、室内不同深度土壤与室外气温的线性回归方程; Chalhoub 等<sup>[13-14]</sup>分析了土壤含水率对土壤温度变化规律的影响, 并建立了相关的土壤温度预测模型; Naranjo 等<sup>[15]</sup>对浅层土壤的热特性进行了研究, 将土壤中的热扩散视为一维瞬态通量, 并利用正弦、半无限和有限差分法等不同模型模拟了短期和长期土壤温度变化情况。在土壤蓄放热方面, Barbara<sup>[16]</sup>对土壤热特性及地面中的热量传递进行了研究, 并依据地面温度分布的 Carslaw-Jaeger 方程, 建立了基于地表热平衡方程的地表热平衡数学模型。王双瑜等<sup>[17]</sup>对不同地区、不同构造参数的日光温室的土壤热流量及土壤温度状况进行了测试和分析, 结果表明, 土壤热流量与室内温度高低不成正相关, 并建立了夜间

收稿日期: 2021-10-06 修订日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U20A2020); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-23-D02)

作者简介: 田东坤, 博士生, 研究方向为设施园艺工程。

Email: tdkwonderful@163.com

\*通信作者: 赵淑梅, 教授, 博士生导师, 研究方向为设施园艺工程。

Email: zhaoshum@cau.edu.cn

室内土壤平均传热量与室内外温差之间的关系式。李建设等<sup>[18-19]</sup>认为日光温室地面温度及吸放热量与太阳辐射有关, 针对此进行了测定与分析, 分析结果表明, 太阳辐射和地面吸放热量有密切关系。Faiziev 等<sup>[20]</sup>认为太阳能的积累在温室土壤中进行, 并根据温室平均土壤温度、温室土壤在 0.15~0.30 m 深度的温度变化以及太阳能在土壤中的积累, 建立了用于计算日光温室地面热量积累的模式。

上述研究对象主要为日光温室, 而保温型塑料大棚构造与日光温室不同, 围护结构保温能力相对较弱, 且不具有蓄热放热能力, 因此土壤温度变化规律及蓄放热特性方面就会存在差异, 日光温室研究结论不能完全适用。鉴于此, 本文在借鉴前人研究方法的基础上, 通过在严寒地区保温型塑料大棚的现场测试, 研究棚内土壤温度日变化规律和蓄放热特性, 以期对相关塑料大棚土壤传热机理及棚内热环境机理模型研究提供依据, 为保温型大棚在高严寒地区的推广提供理论支撑, 为进一步在高寒高海拔地区的研究与应用提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验大棚

在严寒地区, 日光温室的越冬生产比较普遍, 而使用保温型大棚进行越冬生产, 无疑是一个挑战。所以在部分严寒地区, 保温型塑料大棚往往会借鉴日光温室的特点, 比如采用东西屋脊走向, 两侧山墙为土墙, 基础无防寒措施, 屋面覆盖保温被等措施; 同时在种植安排和保温被管理上加以配合, 比如, 春夏茬种植时, 南北两侧保温被每日正常开闭, 整栋大棚种植作物; 秋冬茬种植时, 为提高大棚的保温性能, 北侧保温被不打开, 南侧保温被根据天气情况打开或关闭, 且棚内北侧不种植, 仅南侧种植。本文试验所选用的即是这种较为典型的生产性保温型塑料大棚, 见图 1。

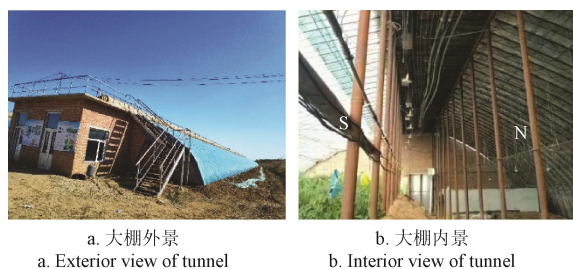


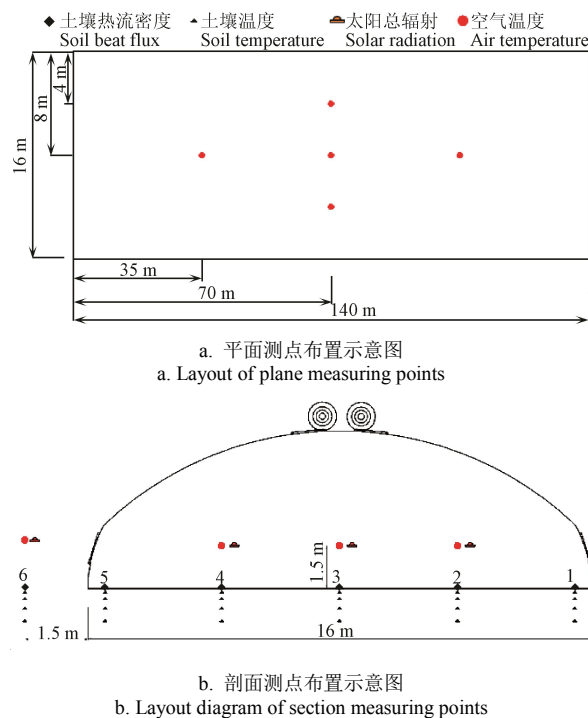
图 1 试验大棚  
Fig.1 Experimental tunnel

该大棚建成于 2017 年, 位于内蒙古自治区赤峰市宁城县, 地理位置为东经 118°9', 北纬 41°7', 平均海拔 1 000 m, 属于中海拔严寒地区; 大棚屋脊东西走向, 长度 140 m, 跨度 16 m, 脊高 4.7 m; 试验期间, 棚内南侧种植作物为番茄, 9 月定植, 采用土壤栽培, 灌溉方式为滴灌; 北侧保温被固定保温, 南侧保温被根据天气情况, 一般上午 8:30 左右揭开, 下午 17:00 左右关闭。通风口位于大棚顶部, 宽度为 1 m, 晴天 11:50 左右打开, 14:00

左右关闭。

### 1.2 测试方法

试验测试时间为 2019 年 12 月 17 日—2020 年 1 月 30 日, 测试内容包括棚内土壤热流密度及不同深度土壤温度、棚内外气温和太阳辐射。测点布置情况如图 2 所示。1) 棚内土壤热流密度及土壤温度: 在大棚中部位置, 沿跨度方向距大棚南侧屋面底脚 1.5、4、12、14、15.5 m 处布置 5 个土壤热流密度和土壤温度测点 (分别为 1、2、3、4、5 号), 其中土壤温度测点深度分别为 0、0.05、0.15、0.30、0.50 m; 2) 棚内空气温度: 将试验大棚沿长度方向 4 等分形成 3 个中间测试断面, 其中, 在两端测试断面的大棚跨中位置分别布置 1 个距地面 1.5 m 高的温度测点; 在中间断面再沿大棚跨度方向 4 等分, 然后在中间 3 个等分上也分别布置 1 个距地面 1.5 m 高的温度测点; 3) 棚内太阳辐射: 在大棚长度方向的中间断面, 在该断面距大棚南侧底脚 4、8、12 m 处分别布置 1 个太阳辐射测点, 其高度在作物冠层顶部; 4) 室外气象测点: 在大棚南侧, 设置一个室外测点, 测试内容包括太阳辐射、距地面 1.5 m 高度处空气温度、以及土壤表面热流密度及 0、0.05、0.15、0.30、0.50 m 深度的土壤温度。



注: 1~6 数字表示测点编号。  
Note: No. 1-6 indicate the number of measuring points.

图 2 试验测点布置图  
Fig.2 Layout of test points

温度传感器采用国产 T 型热电偶 (上海南浦仪表厂, 精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ); 热流密度传感器采用 HFP01 热流量板 (Hukseflux 公司, 荷兰, 精度为  $\pm 50\text{ mV}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ ); 以上数据均由 34970A 数据采集器 (Campbell Scientific 公司, 美国) 采集; 太阳辐射传感器采用太阳总辐射探头传感器 (Onset Computer Crop 公司, 美国, 精度为  $\pm 10\text{ W}/\text{m}^2$ ), 由 HOBO 数据采集器 (Onset Computer Crop 公司, 美国)

采集。所有数据采集器进行全天测试,数据采集间隔为10 min。

### 1.3 土壤传热量计算方法

大棚土壤是由固体、液态水、水蒸气和空气构成的多孔混合物,其热形成过程包括导热、对流、蒸发凝结等多个过程<sup>[21-22]</sup>。为了合理简化土壤热平衡计算方程,作出如下假设:1)土壤在一定深度以下为恒温层;2)忽略棚内各围护结构表面/作物冠层与土壤表层之间的辐射换热;3)不考虑土壤水分运移引起的热量传递<sup>[23]</sup>。根据传热学中经典热传导公式和文献资料[7,19,24-27],以及对棚内土壤温度变化规律及传热的分析,得出白天和夜间棚内土壤的热量收支项主要包括:土壤吸收的太阳辐射热、土壤与棚内空气的对流换热和土壤的地中传热。土壤地中传热包括沿土壤深度方向的纵向传热和沿水平方向的横向传热,其中,横向传热又包括跨度和长度2个方向,但由于大棚的长度远远大于跨度,所以本研究的横向传热仅考虑跨度方向。

因此,白天棚内土壤热量平衡简化方程可表示为

$$Q_{\text{solar}} + Q_{\text{air-g}} - Q_{\text{gV}} - Q_{\text{gH}} = 0 \quad (1)$$

夜间棚内土壤热量平衡估算方程可表示为

$$Q_{\text{gV}} - Q_{\text{gH}} - Q_{\text{g-air}} = 0 \quad (2)$$

式中  $Q_{\text{solar}}$  为土壤吸收的太阳辐射能量, W;  $Q_{\text{air-g}}$  为棚内空气与土壤对流换热量, W;  $Q_{\text{gV}}$  为土壤沿垂直方向的纵向地中传热量, W;  $Q_{\text{gH}}$  为土壤沿大棚跨度方向的横向地中传热量, W。

根据牛顿冷却定律可知,从棚内空气到土壤表面的对流换热量  $Q_{\text{air-g}}$  可由式(3)计算:

$$Q_{\text{air-g}} = \sum A_{\text{air-g}} \alpha_{\text{air-g}} [t_{\text{air}} - t_{\text{g}}] \quad (3)$$

式中  $A_{\text{air-g}}$  为对流换热表面面积,  $\text{m}^2$ ;  $\alpha_{\text{air-g}}$  为棚内空气与土壤表面的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{air}}$  为棚内空气温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{g}}$  为棚内土壤表层温度,  $^\circ\text{C}$ 。

根据传热学中经典热传导公式,可求得土壤纵向地中传热量  $Q_{\text{gV}}$  计算公式为

$$Q_{\text{gV}} = \sum A_{\text{gV}} \frac{\lambda_{\text{g}}}{\delta_{\text{g}}} [t_{\text{up}} - t_{\text{down}}] \quad (4)$$

式中  $A_{\text{gV}}$  为土壤沿深度方向传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $\lambda_{\text{g}}$  为土壤导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,一般取值 0.86;  $\delta_{\text{g}}$  为土壤温度稳定层厚度, m;  $t_{\text{up}}$ 、 $t_{\text{down}}$  分别为土壤上、下层表面温度,  $^\circ\text{C}$ 。

土壤横向地中传热量  $Q_{\text{gH}}$  计算公式为

$$Q_{\text{gH}} = \sum A_{\text{gH}} K_{\text{gH}} [t_{\text{in}} - t_{\text{out}}] \quad (5)$$

式中  $A_{\text{gH}}$  为横向传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $K_{\text{gH}}$  为土壤横向导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,一般取值 0.47;  $t_{\text{in}}$ 、 $t_{\text{out}}$  分别为棚内和棚外土壤温度,  $^\circ\text{C}$ 。

### 1.4 数据处理与分析

利用 Excel 对数据进行分析与处理,并利用 Matlab 软件编写计算程序进行计算。

### 1.5 误差分析

考虑到试验测试仪器的不确定性,对测试过程中的

测量误差进行了分析。土壤和空气温度的测量误差来源于数据采集器和 T 型热电偶。在试验测试前,将数据采集器和热电偶分别在  $-30$ 、 $-10$ 、 $0$ 、 $20$  和  $40$   $^\circ\text{C}$  温度下进行了标定。在  $-30 \sim 40$   $^\circ\text{C}$  温度范围内,该误差为  $\pm 0.2$   $^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 纵向土壤温度变化及传热特性分析

#### 2.1.1 纵向土壤温度日变化规律

将晴天时棚内不同深度土壤温度测点的平均值进行分析,其日变化规律如图3所示。棚内浅层土壤温度与气温变化趋势大体一致,均呈单峰曲线。从早上 9:00 左右到下午 17:00 左右保温被处于打开状态,棚内气温均高于土壤温度,说明空气中的热量是从空气向土壤流动,加之太阳辐射的影响,土壤处于蓄热状态;其余时间,棚内气温低于棚内地表温度,土壤向空气释放热量,此时土壤处于放热状态。土壤作为不加热大棚的唯一热量来源,起到了在低温时,维持棚内气温的作用。

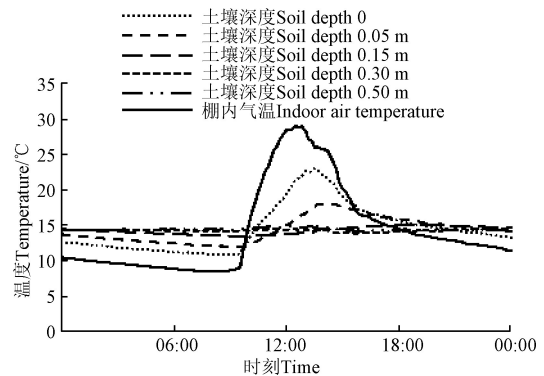


图3 晴天时棚内气温及土壤温度日变化  
Fig.3 Diurnal variation of air temperature and soil temperature in sunny days

深度为 0、0.05、0.15 m 处的土壤温度最高值时间分别出现在 13:30、13:50、18:30 左右,温度值分别为 23.1、18.1、15.1  $^\circ\text{C}$ ,最低值分别出现在 8:20、9:10、9:30 左右,温度值分别为 10.9、12.0、13.4  $^\circ\text{C}$ 。表明随着土壤深度的增加,土壤温度峰值出现的时间依次延迟,这是因为土壤的热容量较大,加之热量从土壤表层向深层传递需要一定的时间。另外,从不同深度土壤的温度波动情况来看,随着土壤深度的增加,土壤温度日变化趋势逐渐减缓,0、0.05、0.15、0.30、0.50 m 处的土壤温度日变化幅度分别为 16.2、8.6、2.0、0.9 和 0.8  $^\circ\text{C}$ ,即 0.30 m 深度以下的土壤温度变化幅度已经小于 1.0  $^\circ\text{C}$ 。

#### 2.1.2 土壤蓄热层厚度确定

参考相关文献资料[24,28-32],采用温差法来确定大棚土壤蓄热层的厚度。根据前述土壤传热公式及相关文献[31],在保温被打开或关闭期间,不同深度土壤的温差越大,说明土壤在白天蓄热或夜间放热越多;反之,在上述期间,不同深度土壤的温差越小,则说明土壤在白天蓄热或夜间放热越少。在日光温室研究中,通常采用温差法计算墙体蓄热层厚度,认为当打开与关闭保温被

时刻墙体的温差低于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 该部分墙体在白天蓄热或夜间放热量非常有限, 所以将温差设定为  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [31]。该方法可以借鉴, 但对于保温型塑料大棚来说, 每一份热量都极为重要, 且由于其跨度和长度尺度较大,  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的温差所传递的热量也应考虑, 但鉴于所选用热电偶的最高精度为  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此将大棚土壤蓄热层定义为温度波幅大于  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的部分。

根据上述分析, 温度波幅与土壤深度密切相关, 因此二者的关系可以描述为

$$\alpha_i = a \cdot x^b \quad (6)$$

式中  $\alpha_i$  为不同深度土壤温度波幅 ( $i=1,2,\dots,n$ ),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  为土壤深度, m;  $a$ 、 $b$  分别方程系数和幂指数。

取 1 月 1—7 日、11 日不同天气条件下  $0\sim 0.50\text{ m}$  深度不同测点的土壤温度平均值, 对其温度波幅进行拟合, 得出温度波幅的递减方程其结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 大棚土壤温度波幅随土壤深度的增加, 呈乘幂函数递减; 幂指数  $b$  的绝对值, 晴天 < 多云 < 阴天; 而方程系数  $a$ , 晴天 > 多云 > 阴天; 结合不同天气条件下棚内外平均气温、棚内外气温差和棚内太阳辐射等数据, 发现幂指数  $b$  和方程系数  $a$  的变化规律均与棚内平均气温和太阳辐射的变化趋势一致, 由此可推断: 大棚土壤温度波幅递减规律受棚内平均气温和太阳辐射的影响。再利用式 (6) 进一步模拟计算  $0.50\sim 1.0\text{ m}$  深度土壤温度波幅变化。由模拟结果可知, 在  $0\sim 0.10\text{ m}$  深度范围, 土壤的温度变化幅度最大; 在  $0.30\text{ m}$  处, 土壤温度波幅开始小于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与前述测试结果一致; 因此, 根据前述土壤蓄热层的定义, 可确定大棚土壤蓄热层的平均厚度约为  $0.55\sim 0.80\text{ m}$ 。综合分析不同天气条件下土壤温度波幅递减方程和蓄热层厚度变化规律可知, 土壤温度波幅递减方程的幂指数  $b$  的绝对值、方程系数  $a$  的值越大, 土壤蓄热层越厚。

表 1 不同天气条件下土壤温度波幅递减方程

Table 1 Decreasing equation of soil temperature amplitude under different weather conditions

日期 Date	温度波幅递减方程 Decreasing equation of soil temperature amplitude	$R^2$ 值 Value of $R^2$	天气 Weather	蓄热层厚度 Thickness of heat storage layer/m
01-01	$\alpha_i=0.4217 \cdot x^{-0.79}$	0.934	晴	0.75
01-02	$\alpha_i=0.4566 \cdot x^{-0.74}$	0.970	晴	0.80
01-03	$\alpha_i=0.4556 \cdot x^{-0.76}$	0.951	晴	0.80
01-04	$\alpha_i=0.4007 \cdot x^{-0.76}$	0.969	晴	0.70
01-05	$\alpha_i=0.4064 \cdot x^{-0.73}$	0.957	晴	0.70
01-06	$\alpha_i=0.3710 \cdot x^{-0.72}$	0.962	多云	0.60
01-07	$\alpha_i=0.3784 \cdot x^{-0.63}$	0.980	阴	0.60
01-11	$\alpha_i=0.3404 \cdot x^{-0.65}$	0.996	阴	0.55

注:  $\alpha_i$  为不同深度土壤温度波幅,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  为土壤深度, m。

Note:  $\alpha_i$  is soil temperature amplitude at different depths,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  is soil depth, m.

## 2.2 横向土壤温度变化及传热特性分析

### 2.2.1 横向土壤温度日变化规律

由于大棚的长度远大于跨度, 所以横向土壤温度与传热分析, 仅关注大棚跨度方向。由于测点 3 位于走道

附近, 所以重点关注其余几个测点其结果, 典型晴天条件下试验大棚沿跨度方向由北到南各测点的土壤温度日变化规律如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 大棚的横向土壤温度日变化较明显。以大棚中间过道为界, 将大棚分为南北两区, 那么在靠近南北区屋面底脚处日变化幅度最大, 最大可达  $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 两区中部的土壤温度变化幅度相对较小, 最大值为  $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可以看出, 棚内靠近边界处的土壤温度受室外条件影响较大, 即土壤边界效应明显。

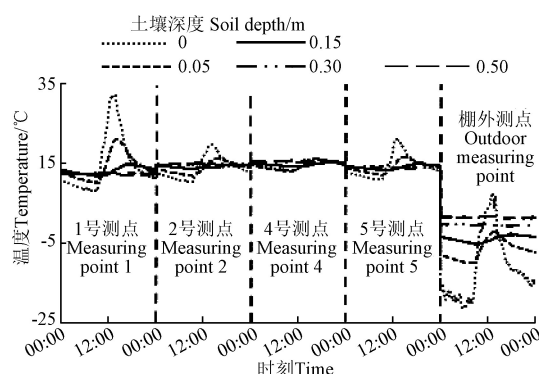


图 4 晴天时土壤温度沿大棚跨度方向日变化

Fig.4 Diurnal variation of soil temperature along tunnel span in sunny days

进一步对大棚测试期间典型天气条件下的土壤温度进行统计, 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 南区整体土壤温度变化幅度小于北区, 但其最低值和平均值却均高于北区, 表明南区土壤温度较为稳定。结合图 4, 详细对比南北边界处土壤温度数值, 靠近南屋面底脚处的地表温度波动最大, 最高温度为  $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 低于北区边界处的  $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 二者温差为  $11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 而南区边界处的最低温度, 则高于北区  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 且平均温度也高于北区  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 南区中部的土壤最高温度低于北区  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最低温度高于北区  $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均温度高于北区  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分析其原因, 应该主要在于白天南区种植作物的遮挡, 使棚内空气温度和太阳辐射对南区地表温度的直接影响减弱, 从而导致地表及不同深度土壤温度的最高值小于无种植作物的北区; 到了夜间, 同样由于种植作物的遮挡以及自身作为内热源, 则导致了其周边土壤的散热速率较慢, 因此南区土壤温度的最低值高于北区。另外, 从表 2 中可以看出, 南区  $0.30\text{ m}$  处的土壤温度波幅已经在  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 而北区  $0.5\text{ m}$  处的土壤温度波幅仍大于  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 结合前文对蓄热层厚度的分析, 可以推断作物种植模式和生育阶段等对土壤沿深度方向的日变化和大棚蓄热层厚度的影响较大。

大棚的横向传热主要是由棚内向棚外的热量损失 [33-34]。从图 4 中可以看出, 棚内不同深度土壤温度全天均高于棚外同一深度土壤温度,  $0\sim 0.50\text{ m}$  范围 4 个测点处棚内外土壤温度平均温差分别为  $25.5$ 、 $20.9$ 、 $17.9$ 、 $14.5$  和  $12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表明棚内土壤横向传热全天均处于热量散失状态。

表 2 晴天大棚内南北区土壤温度变化比较  
Table 2 Comparison of ground temperature changes in south and north of the tunnel in sunny day

区域 Area	土壤深度 Soil depth/m	最高值 Max/℃	最低值 Min/℃	最大温差 Max temperature difference/℃	平均值 Average/℃
南区 South	0	16.0	13.2	2.8	14.6
	0.05	16.3	13.0	3.3	14.5
	0.15	15.3	14.2	1.1	14.8
	0.30	14.8	14.3	0.5	14.6
	0.50	15.8	15.3	0.5	15.5
北区 North	0	20.0	10.4	9.6	13.8
	0.05	16.2	11.8	4.4	13.9
	0.15	14.8	13.6	1.2	14.2
	0.30	13.9	13.1	0.8	13.6
	0.50	14.0	13.2	0.8	13.6

2.2.2 横向土壤传热量计算

根据式（1）～（5）编程求解土壤传热量，同时为更加直观，将大棚土壤传热量换算成单位地面的传热量。结果显示，在典型天气条件下（1 月 1—7 日）大棚土壤全天总热损失量为 922.6~1 229.4 W/m<sup>2</sup>，其中纵向地中传热损失为 362.1~838.4 W/m<sup>2</sup>，土壤与棚内空气对流换热损失为 270.7~332.8 W/m<sup>2</sup>，土壤横向地中传热损失为 120.3~227.7 W/m<sup>2</sup>，三者分别占总热损失的 39.2%~68.2%，22.0%~36.1%，9.8%~24.7%。在上述 3 项热损失中，横向传热关注的较少，但实际上，这部分热损失是可以通过工程手段加以控制的。

若将上述土壤横向地中传热损失量用于提升棚内土壤温度，则根据式（7）可以计算出棚内土壤平均温升幅度<sup>[7]</sup>：

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{gH}}}{V_s \gamma_s C_s} \quad (7)$$

式中 $\Delta t$ 为棚内土壤提升的平均温度，℃； $V_s$ 为土壤体积，m<sup>3</sup>； $\gamma_s$ 为土壤湿容重，kg/m<sup>3</sup>； $C_s$ 为土壤比热容，W/(kg·℃)。

大棚土壤体积  $V_s$  取值为 1 120 m<sup>3</sup>，土壤湿容重  $\gamma_s$  取值为 1 530 kg/m<sup>3</sup>，土壤比热容  $C_s$  取值为 0.58W/(kg·℃)<sup>[7]</sup>，则计算可得 $\Delta t=0.3\sim0.5$ ℃，即理论上若能阻隔土壤横向传热，棚内土壤平均温度可提升 0.3~0.5℃。由此可见，若能采取有效措施，阻止土壤横向传热，对提升大棚热环境是非常有益的。

2.3 土壤蓄放热特性分析

2.3.1 土壤热流量日变化

从土壤的热流量日变化可以更好地阐明土壤对棚内气温的影响，取各测点土壤热流量的平均值进行分析，图 5 为不同天气条件下土壤热流量日变化，正值表示土壤从周围吸收的热量，负值表示土壤向棚内空气释放热量。如图 5 所示，无论晴天还是阴天，棚内土壤热流量的总体趋势是一致的。土壤热流量在上午 9:00 左右开始表现为正值，说明此时土壤开始蓄热，土壤温度开始上升。土壤蓄热开始后，蓄热量迅速增大，这与表层土壤温度变化趋势一致，在中午 12:00 左右达到热流量最大值。下午 17:00 左右开始直到次日上午 9:00 左右，土壤

热流量表现为负，说明土壤作为热源开始向棚内空气散热，这与纵向土壤温度变化规律相同。观察土壤热流量的变化规律发现，土壤在夜间向棚内供给的热量较稳定，没有明显的峰值或波动出现。

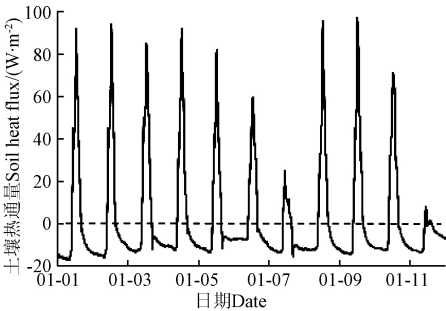


图 5 不同天气条件下土壤热流量日变化  
Fig.5 Diurnal variation of soil heat flux under different weather conditions

选取 1 月 2—3 日晴天、1 月 6 日多云天、1 月 7 日和 11 日阴天作为典型天气，对不同天气条件下土壤蓄放热性能的各参数进行统计，如表 3 所示。在晴好天气条件下，9:20—15:50 为土壤蓄热阶段，日累积蓄热量为 1 577~1 730 W，土壤热流量最大值为 94 W/m<sup>2</sup>；在多云天气条件下，9:40—15:50 为土壤蓄热阶段，日累积蓄热量为 1 149 W，土壤热流量最大值为 60 W/m<sup>2</sup>；在阴天条件下，9:40—14:50 为土壤蓄热阶段，日累积蓄热量为 373~293 W，土壤热流量最大值为 25 W/m<sup>2</sup>。晴天与多云天的蓄放热时间差异不大，但其瞬时蓄放热流量值差异较大，因此晴天土壤日累积蓄热量比多云天多 37.2%~50.6%左右，日累积放热量比多云天多 44.7%~64.3%左右；晴天的最大蓄热流量和日累积蓄热量均是阴天的 4 倍以上；与蓄热性能相比，晴天与阴天的土壤放热性能差异较小。由此可知，天气条件对土壤的蓄放热性能影响较大，且不同天气条件下土壤蓄放热性能主导影响因素不同。

表 3 土壤蓄放热性能参数  
Table 3 Correlation coefficient between each element and soil heat storage and release

日期 Date	日累积蓄 热量 Daily accumulati on heat/W	蓄热 时长 Heat storage duration/h	最大蓄 热流量 Max heat storage flow/ (W·m <sup>-2</sup> )	日累积 放热量 Daily accumulated heat release/W	放热时长 Heat release duration/h	最大放 热流量 Max heat release flow/ (W·m <sup>-2</sup> )
01-02	1 577	6	94	1 191	18	15
01-03	1 730	6.5	85	1 049	17.2	13
01-06	1 149	5.8	60	725	18.2	11
01-07	373	5.6	25	1 276	18.4	15
01-11	293	5	8	721	20	13

2.3.2 土壤蓄放热特性的相关性分析

由于土壤蓄放热影响因素较多，本文参考相关文献[35]并结合前文的分析，选择太阳辐射、棚内外温差、表层土壤与棚内气温温差 3 要素，将其与土壤热流量进行相关性分析，尝试不同因素对土壤蓄放热特性的影响。分析计算的相关系数，如表 4 所示。从表 4 中可以看出，



在不同天气条件下, 土壤的蓄热阶段和放热阶段主导影响因素不同。

表 4 土壤蓄放热与各要素相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil heat storage and release and various factors

阶段 Stage	天气 Weather	太阳辐射 Solar radiation	棚内外气温差 Temperature difference between inside and outside the tunnel	表层土壤与 棚内气温差 Temperature difference between surface soil and air in tunnel
白天蓄热阶段 The heat storage stage during daytime	晴天	0.61	0.68	0.73
	多云天	0.66	0.72	0.95
	阴天	0.87	0.71	0.96
夜晚放热阶段 The heat release stage at night	晴天	—	0.74	0.99
	多云天	—	0.25	0.91
	阴天	—	0.42	0.89

在白天蓄热阶段, 无论晴天、多云天还是阴天条件下, 土壤蓄热流量均表现为受表层土壤与棚内气温差的影响最大。其中, 晴天条件下, 土壤蓄热与各要素的相关系数差异较小, 说明太阳辐射、棚内外温差以及空气与土壤表面温差, 均具有较大影响; 但在多云和阴天条件下, 表层土壤与棚内气温差对蓄热量的影响力显著提升, 说明在太阳辐射较弱的条件下, 土壤与空气对流换热是主导传热方式。因此可以推断, 在不同天气条件下, 对土壤蓄热量影响的差异性首先体现在表层土壤与棚内气温差上, 然后体现在太阳辐射上, 这应该是作物层遮挡导致太阳辐射影响力下降的缘故; 阴天条件下太阳辐射影响力有一定提升, 应该是阴天散射光为主, 作物遮挡影响下降所致。

在夜晚放热阶段, 无论何种天气, 土壤夜晚放热量也主要受表层土壤与棚内气温差的影响, 这与其白天蓄热阶段相同。但在晴天条件下, 土壤放热还与棚内外气温差有较强的相关性, 这是因为晴天时棚内外气温差更大, 因此对土壤放热量的影响更大; 相比较而言, 多云天与阴天条件下, 土壤放热与棚内外温差的相关性较小。

综合分析, 在不同天气条件下, 影响土壤蓄热量和放热量的主导因素是表层土壤与棚内气温差, 而棚内外气温差影响最小。

### 3 结 论

1) 研究发现, 土壤温度波幅随深度的增加呈乘幂函数递减规律, 且不同天气条件下递减方程的幂指数  $b$  的绝对值, 晴天<多云天<阴天; 而方程系数  $a$ , 晴天>多云天>阴天; 根据温差法, 分析确定在测试地区大棚土壤的蓄热层平均厚度约为 0.55~0.80 m。

2) 在测试条件下, 棚内土壤横向地中传热全天处于失热状态, 其热损失占总热损失的 9.8%~24.7%, 若将此部分热量用于提升棚内土壤温度, 理论上可将棚内土壤平均温度提高 0.3~0.5 °C。

3) 天气条件不影响土壤热流量的变化趋势, 但是影响土壤的蓄放热性能。晴天土壤日累积蓄放热量比多云

天多 37.2%~64.3%左右, 日累积放热量比多云天多 44.7%~64.3%左右; 晴天的最大土壤热流量值和日累积蓄热量均是阴天的 4 倍以上; 与蓄热性能相比, 晴天与阴天的土壤放热性能差异较小。

4) 土壤表层与气温差是影响土壤蓄放热量的主导因素, 其相关系数为 0.73~0.99; 其次是室外太阳辐射, 其相关系数为 0.61~0.87; 影响最小的是棚内外气温差, 其相关系数为 0.25~0.74, 表明大棚内土壤的蓄放热均以对流传热方式为主。

本研究旨在通过保温型塑料大棚的土壤温度和蓄放热特性的初步分析, 了解保温型大棚在中纬度严寒地区的土壤温度情况, 为构建更准确的土壤二维传热模型、阐明大棚土壤边际效应及土壤传热机制提供研究基础, 为保温型塑料大棚在高寒高海拔地区的应用推广提供基础数据和理论支撑。当然, 影响保温型塑料大棚土壤温度变化及蓄放热特性的因素还有较多, 诸如大棚规格、通风方式、种植作物种类、模式和生育阶段等的影响, 这些内容将在今后的研究中进一步丰富和深入。

### 【参 考 文 献】

- [1] Nawalany G, Bieda, W, Radon J, et al. Experimental study on development of thermal conditions In ground beneath a greenhouse[J]. Energy Build, 2014, 69: 103-111.
- [2] Ghosal M K, Tiwari G N, Srivastava N. Thermal modelling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: An experimental validation[J]. Energy Build, 2004, 36(3): 219-227.
- [3] Kurpaska S, Latała H. Energy analysis of heat sur plus storage systems in plastic tunnels[J]. Renew Energy, 2010, 35(12): 2656-2665.
- [4] 孙治强, 孙丽, 王谦, 等. 日光温室土壤温度环境边际效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 150-155.  
Sun Zhiqiang, Sun Li, Wang Qian, et al. Marginal effect of the soil temperature environment in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 150-155. (in Chinese with English abstract)
- [5] Mahre Y, 马树庆. 提高温室土壤温度的数值试验研究[J]. 国外农学: 农业气象, 1987(3): 33-35.
- [6] 吴德让, 李元哲, 于竹. 日光温室地下热交换系统的理论研究[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 137-143.  
Wu Derang, Li Yuanzhe, Yu Zhu. Optimal design and test research of earth tube heat exchangers in a sun-light greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1994, 10(1): 137-143. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马承伟. 塑料大棚地下热交换系统的研究[J]. 农业工程学报, 1985, 1(1): 54-65.  
Ma Chengwei. Studies on the vinyl-house house heating by the underground heat exchange system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1985, 1(1): 54-65. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李天来, 李曼, 韩亚东, 等. 辽沈 I 型日光温室地温日变化规律及其谐波模拟验证[J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 152-160.  
Li Tianlai, Li Man, Han Yadong, et al. Soil temperature

- diurnal variation in Liaoshen type I solar greenhouse and harmonic simulation confirmation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 19(10): 152-160. (in Chinese with English abstract)
- [9] 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 24(3): 167-171.  
Fan Aiwu, Liu Wei, Wang Chongqi. Simulation on the daily change of soil temperature under various environment conditions[J]. ACTA Energiæ Solaris Sinica, 2002, 24(3): 167-171. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何雨, 须晖, 李天来, 等. 辽沈 I 型日光温室地温预测模型及数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(16): 8687-8689.  
He Yu, Xu Hui, Li Tianlai, et al. Forecasting model and numerical simulation of soil temperature in greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(16): 8687-8689. (in Chinese with English abstract)
- [11] Smerdon J E, Pollack H N, Cermak V, et al. Daily, seasonal, and annual relationships between air and subsurface temperatures[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D7): 101-113.
- [12] 贾红, 徐为根, 彭明艳, 等. 日光温室土壤温度变化特征和预报模型研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 647-6473, 6482.  
Jia Hong, Xu Weigen, Peng Mingyan, et al. Analysis of variation characters and prediction model of soil temperature in solar greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(11): 6471-6473, 6482. (in Chinese with English abstract)
- [13] Chalhoub M, Bernier M, Coquet Y, et al. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 295-307.
- [14] 塔娜, 五十六, 马文娟, 等. 不同含水率下日光温室土壤温度变化规律的峰拟合法拟合[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 204-210.  
Ta Na, Wu Shiliu, Ma Wenjuan, et al. Peak-fitting based prediction of soil temperature according to soil moisture content in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 204-210. (in Chinese with English abstract)
- [15] Naranjo M C, Wright A J, Oyinlola M A, et al. A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements[J]. Geothermics, 2018, 76: 38-49.
- [16] Barbara L. Heat transfer model to predict temperature distribution in the ground[J]. Energies, 2018, 12(1): 1-16.
- [17] 王双瑜, 马承伟, 赵淑梅, 等. 华北地区几种日光温室土壤热流量特征初探[C]//中国设施园艺工程学术年会, 设施蔬菜栽培技术研讨暨现场观摩会, 中国园艺学会, 中国农业工程学会, 2012: 409-416.
- [18] 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.  
Li Jianshe, Bai Qing, Zhang Yahong. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 231-236. (in Chinese with English abstract)
- [19] Bargach M N, Tadili R, Dahman A S, et al. Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco[J]. Renewable energy, 2000, 20: 415-433
- [20] Faiziev T A, Toshmamatov B M. Mathematical model of heat accumulation in the substrate and ground of a heliogreenhouse[J]. Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 723(3): 032006.
- [21] 张勇. 西北日光温室传热学简化模型构建及温光高效新结构初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
Zhang Yong. Development and Optimization of a New Reduced Simplified Model of Equilibrium Thermodynamics & Applied Technology of High States of Light and Temperature in Heliogreenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [22] 韩亚东. 辽沈日光温室能量平衡方程中几个主要分量模拟模型的构建[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.  
Han Yadong. Establishing Main Components Modeling of Energy Balance Equation in Liaoshen Solar Greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李树海. 华北型连栋温室热环境模型[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.  
Li Shuhai. Thermal Environment Model of Huabei Type Multi-span Greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [24] Mihalakakou G, Santamouris M, Lewis J O, et al. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles[J]. Solar Energy, 1997, 60(3): 181-190.
- [25] 毕玉革. 北方干寒地区日光温室小气候环境预测模型与数字化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.  
Bi Yuge. Study on Micro-climatic Environmental Simulation Model and Digitization for Solar Greenhouse in the Northern Drought Cold Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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.  
Yi Donghai. Research of Temperature in Soil Wall and Solar Greenhouse[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [28] 彭东玲, 张义, 方慧, 等. 日光温室墙体一维导热的 MATLAB 模拟与热流分析[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 174-179.  
Peng Dongling, Zhang Yi, Fang Hui, et al. MATLAB simulation of one-dimensional heat transfer and heat flux analysis of north wall in Chinese solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 174-179. (in Chinese with English abstract)
- [29] 白青, 张亚红, 孙利鑫. 基于温波传递理论的日光温室土壤蓄热层及墙体厚度分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 207-213.  
Bai Qing, Zhang Yahong, Sun Lixin. Analysis on heat storage layer and thickness of soil wall in solar greenhouse based on theory of temperature-wave transfer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 207-213. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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.  
Ma Chengwei, Lu Hai, Li Rui, et al. One-dimensional Finite

- difference model and numerical simulation for heat transfer of wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 231-237. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李明, 周长吉, 魏晓明. 日光温室墙体蓄热层厚度确定方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 177-183.  
Li Ming, Zhou Changji, Wei Xiaoming. Thickness determination of heat storage layer of wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 177-183. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李伟, 李新国, 赵军, 等. 土壤蓄热特性与模拟研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1491-1495.  
Li Wei, Li Xinguo, Zhao Jun, et al. Study on heat storage characteristics of soil and simulation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(11): 1497-1495. (in Chinese with English abstract)
- [33] 孙治强, 孙丽, 王谦, 等. 日光温室土壤温度环境边际效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 150-155.  
Sun Zhiqiang, Sun Li, Wang Qian, et al. Marginal effect of the soil temperature environment in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 150-155. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马承伟. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [35] Grzegorz Nawalany. Numerical analysis of the effect of ground dampness on heat transfer between greenhouse and ground[J]. Sustainability, 2021, 13: 3084.

## Soil heat storage and release characteristics of the plastic tunnel with external thermal insulation

Tian Dongkun, Song Weitang, Wang Pingzhi, Cheng Jieyu, Liang Chao, Zhao Shumei<sup>\*</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A plastic tunnel with external thermal insulation has been a new type of greenhouse to combine the traditional solar greenhouse and plastic tunnel in recent years. The thermal insulation plastic tunnel presents the cost-saving construction and a higher land utilization rate, compared with the solar greenhouse, while a larger working space and excellent thermal insulation performance, compared with the plastic greenhouse. However, the thermal insulation of the enclosure structure can be relatively weak without heat storage and release, compared with the solar greenhouse. The soil can serve as only one regenerator and heat source of the tunnel during heat transfer. Therefore, the soil temperature can determine the heat storage and release, further to form the thermal environment of the tunnel. This study aims to quantitatively analyze the temperature distribution and the heat storage-release property of soil in a plastic tunnel with external thermal insulation. A numerical simulation was conducted to clarify the formation, variation, and influencing factors of the thermal environment in the thermal insulation plastic greenhouse. An experimental test was also carried out in the production greenhouse in the severely cold regions. The results show that: 1) The amplitude of soil temperature decreased significantly, with the increase of depth in a power function. The average thickness of the heat storage layer in the tunnel soil in the test area was determined as about 0.55-0.80 m, according to the Temperature Difference Method. 2) There was a significantly different variation in the lateral soil temperature under the various solar radiation, crop cultivation, and soil marginal effect, particularly in the depth of 0-0.15 m. The soil temperature of each layer in the tunnel was higher than that outside the tunnel all day, and the heat transfer in the transverse soil was in a state of heat loss all day. The loss of heat transfer in the transverse soil was accounted for 9.8%-24.7% of the total heat loss of the soil. Once the heat loss was reused to convert into the soil temperature, the average soil temperature in the tunnel increased by 0.3-0.5 °C. (3) There was no influence of weather conditions on the heat flow in soil, but on the heat storage and release performance of soil. The accumulated heat on the sunny days was about 37.2%-50.6% more than that on the cloudy days, and the release was 44.7%-64.3% more than that on the cloudy days. The maximum heat storage flow and accumulated heat in the sunny days were more than 4 times those on the cloudy days. There was little difference in the soil heat release between the sunny and cloudy days, compared with heat storage. 4) The heat storage and release of soil were depended mainly on the temperature difference between surface soil and air temperature, followed by the solar radiation outdoor, but the smallest impact was the temperature difference inside and outside the tunnel, indicating a convective heat transfer for the heat storage and release of soil in the tunnel. The soil temperature of the tunnel was measured in the middle latitude cold areas. As such, a more accurate heat-transfer model of soil was achieved to clarify the boundary conditions and heat transfer in the tunnel. The finding can also provide theoretical support to promote the plastic tunnel with external thermal insulation in the alpine and high altitude areas.

**Keywords:** soil; temperature; plastic tunnel with external thermal insulation; thickness of heat storage layer; heat balance estimation equation; heat loss; heat storage and release characteristics