

## 下挖式日光温室夜间土壤非稳态导热过程

张传坤<sup>1</sup> 魏珉<sup>2</sup> 刘福胜<sup>3</sup> 徐平丽<sup>4\*</sup> 李岩<sup>2</sup>

1. 山东省农业科学院 蔬菜花卉研究所, 济南 250100;
2. 山东农业大学 园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018;
3. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018;
4. 山东省农业科学院 生物技术研究中心, 济南 250100)

**摘要** 针对日光温室土壤温度不均衡的问题,运用传热学非稳态导热理论,测定分析跨度方向上不同测点地面温度变化率和土壤放热量之间的关系,对下挖式日光温室土壤夜间的非稳态导热过程进行研究。结果表明:1)日光温室地面放热量受地面温度和跨度位置综合作用,地面温度越高、跨度位置越大,土壤放热量越多;2)不同测点地面温度变化率和土壤放热量不成比例,土壤存在水平方向上的热量流动;3)土壤边际效应是受到后墙下土壤、温室外土壤缓冲作用引起的;4)本试验中,受后墙下土壤缓冲,土壤放热增加量占土壤放热量比例为6.06%~7.34%;受温室外土壤缓冲,土壤放热减少量占土壤放热量比例为31.8%~50.28%;边际效应对土壤温度环境具有不利影响。

**关键词** 日光温室; 非稳态导热; 温度变化率; 放热量; 缓冲

中图分类号 S625.1 文章编号 1007-4333(2019)01-0108-11 文献标志码 A

## Soil unsteady heat conduction process in deep-bed solar greenhouse at night

ZHANG Chuankun<sup>1</sup>, WEI Min<sup>2</sup>, LIU Fusheng<sup>3</sup>, XU Pingli<sup>4\*</sup>, LI Yan<sup>2</sup>

1. Vegetable Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China;
2. Horticulture and Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;
3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;
4. Biotechnology Research Centre, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China)

**Abstract** In view of the imbalance of soil temperature, this study analyzed the relationship between the change rate of temperature and soil heat-releasing volume of test points in span direction with unsteady heat conduction theory as foundation and took deep-bed solar greenhouse as trial subject, and conducted research on the process of the soil unsteady heat conduction. The results showed that the heat-releasing volume was affected by the ground temperature and the span position. The higher the surface temperature and the larger the span position, the more heat was released. The change rate of temperature and the heat-releasing volume were not proportional, and there was heat flowing in horizontal direction. The marginal effect of soil was caused by buffer from the soil under the back wall and the soil outside the greenhouse. In this experiment, the heat-releasing volume increased by soil buffer under the back wall was 6.06% - 7.34% of total soil heat-releasing volume, and the heat-releasing volume reduced by soil buffer from outside greenhouse was 31.8% - 50.28% of total soil heat-releasing volume. The marginal effect had a negative effect on the soil temperature environment.

**Keywords** solar greenhouse; unsteady heat conduction; change rate of temperature; heat-releasing volume; buffer

收稿日期: 2018-05-14

基金项目: 国家大宗蔬菜产业技术体系建设专项(CARS-25);“十二五”国家科技支撑计划课题(2014BAD05B03);山东省农业重大应用技术创新课题(鲁财农指(2015)16)

第一作者: 张传坤,副研究员,主要从事设施环境工程与调控研究,E-mail:zhangchuankun@sina.com

通讯作者: 徐平丽,研究员,主要从事生物工程技术研究,E-mail:xupingli@sina.com

土壤温度对作物生长具有重要意义,土壤温度偏低影响根系生长及各项生理功能,影响土壤微生物活动和土壤养分的可给态程度<sup>[1]</sup>,影响作物根系的吸水吸肥能力<sup>[2-3]</sup>,土壤温度还影响作物代谢、生长及光合作用<sup>[4-5]</sup>。越冬季,日光温室土壤温度存在不均衡现象,低温区域由于温度较低,影响作物生长、降低作物产量和品质,甚至造成喜温蔬菜低温障碍。

日光温室土壤温度不均衡<sup>[6-8]</sup>是由于外界土壤温度低引起的;外界低温土壤与温室土壤相互作用,使得温室土壤温度降低,温室内部存在边际效应<sup>[9]</sup>,最冷月份边际区域能够达到 2.7 m。温室内外土壤相互作用能够使得温室外部 0.3 m 范围内土壤处于冰冻与解冻循环的过程<sup>[10]</sup>,温室内部温度显著拐点在 0.4~1.0 m 范围内移动。对于非下挖式日光温室,受南北两侧低温土壤的影响,土壤最高温度出现在纵向 4.3 m<sup>[11]</sup>(温室跨度 7.9 m)处,由此向南、向北温度递减。为降低外界低温土壤作用,在温室南侧设置防寒沟,可以起到隔热、保温作用,温室最高地温从中部(横向)靠后前移到中部靠前<sup>[12]</sup>;温室南侧设置防寒沟后外界低温土壤对温室北侧影响大于对温室南侧影响<sup>[13]</sup>。

为降低外界低温土壤影响,生产中大面积推广应用下挖式日光温室,其南侧边际区域小于非下挖式日光温室南侧边际区域<sup>[14]</sup>,但外界低温土壤对下挖式温室土壤温度环境影响进行系统研究的较少。

白天土壤处于蓄热阶段,温度相对较高,容易满足作物根系对温度的要求;夜间土壤释放热量、温度降低,容易对作物生长造成影响,因此,加强夜间土壤温度环境的研究具有重要意义。本研究拟以传热学非稳态导热理论为基础,以下挖 0.5 m 的日光温室为研究对象,对不同跨度位置土壤蓄热量降低、土壤放热量之间的关系进行研究,探讨下挖式温室夜间土壤热量流动规律,以期改善日光温室土壤温度不平衡现象提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验温室

试验在泰安市(36°11'07"N,117°06'51"E)山东农业大学试验基地日光温室内进行,温室为宽厚土墙下挖式温室,下挖 0.5 m,东西长 50 m,跨度 9.3 m;前屋面为钢架结构,利得膜覆盖;后墙为土质墙体,高 4.5 m,上部宽 2.0 m,下部宽 3.5 m;夜间前屋面覆盖保温被保温,采用电动卷帘机卷放。温室内种

植番茄,9月15日定植,宽窄行栽培。

### 1.2 对流换热

流体在固体表面流动产生的热量传递现象称为对流换热。夜间温室空气与地面产生对流换热,温室空气与地面热量交换公式为<sup>[15]</sup>:

$$\Phi = hA(T_g - T_f) \quad (1)$$

式中: $\Phi$ 为热流量,W; $h$ 为对流换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $A$ 为温室地面面积,m<sup>2</sup>; $T_g$ 为地面温度, $T_f$ 为地面空气温度,K。由式(1)可见,对于土壤放热, $h$ 、 $T_f$ 为定值,夜间 $T_g$ 越高,土壤放热量越多。

### 1.3 非稳态导热

非稳态导热是温度场随时间变化的导热过程<sup>[15]</sup>,如发动机的启动和停机、太阳辐射对建筑物的升温、建筑物夜间的降温、金属零件热处理时的退火与淬火等,非稳态导热在橡胶、钢锭、矿井原岩、窑炉砌体、窑墙等方面的研究已经深入到理论水平<sup>[16-20]</sup>。

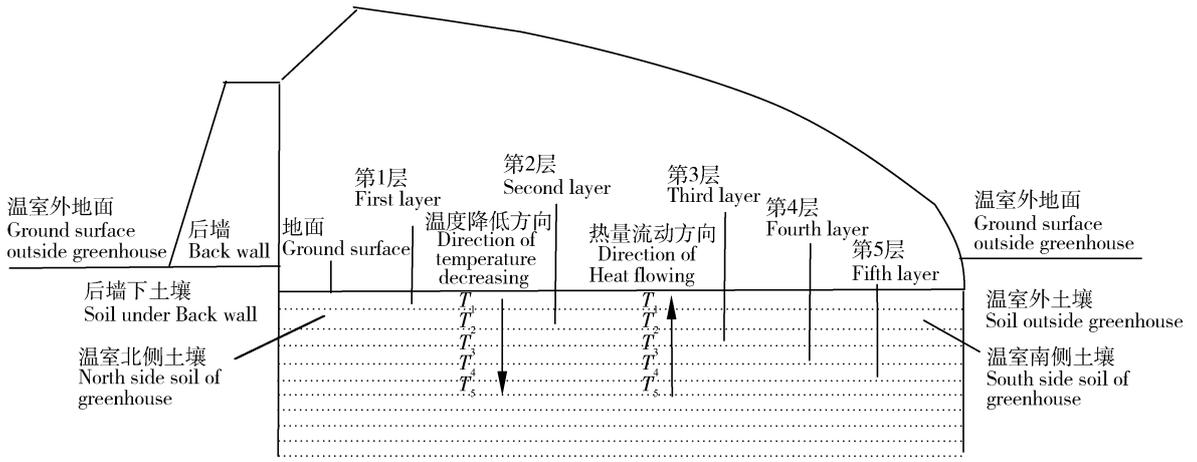
夜间土壤向温室内部释放热量,温度降低,土壤放热过程属于非稳态导热过程<sup>[21]</sup>。夜间地面与温室空气交换热量后地面温度降低;地面温度降低后,地面下第1层土壤温度( $T_1$ )高于地面温度,地面下第1层土壤热量( $Q_1$ )向地面流动;地面下第1层土壤热量向地面流动后, $T_1$ 降低,地面下第2层土壤温度( $T_2$ )高于 $T_1$ ,地面下第2层土壤热量( $Q_2$ )向第一层流动。根据连续介质假说<sup>[22]</sup>,土壤各层之间温度是连续分布的,地面温度降低一层一层地向地面下各层土壤传播<sup>[15]</sup>,土壤热量一层一层地向地面流动。日光温室土壤温度降低和热量流动方向如图1所示。可以看出,后墙下土壤与温室北侧土壤连接,两者之间温度分布是连续的,存在温差引起的热量流动;温室南侧土壤与温室外土壤连接,两者之间温度分布也是连续的,也存在温差引起的热量流动。

#### 1.3.1 温度变化传播速度

地面温度降低向地面下土壤传播的快慢受土壤导热能力和储热能力的影响,用导温系数 $\alpha$ 衡量<sup>[24]</sup>:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为土壤导温系数,m<sup>2</sup>/s; $\lambda$ 为土壤导热率,J/(m·s·K); $\rho$ 为土壤密度,kg/m<sup>3</sup>; $c$ 为土壤比热容,kJ/(kg·K)。土壤 $\lambda$ 、 $\rho c$ 为定值,由式(2)可知,地面温度降低向地面下土壤传播的快慢由土壤物性指标决定,与地面温度本身变化无关,因此,夜间温室不同跨度处地面温度降低向地面下土壤传播的快慢是相同的。



层为概念意义上的层,厚度理解为很薄。 $T_1 \sim T_5$  分别为地面下 1~5 层土壤温度; $Q_1 \sim Q_5$  分别为地面下 1~5 层土壤释放的热量。  
The layer is the conceptual layer, thickness is very thin.  $T_1 - T_5$  represent 1 - 5 layer of soil temperatures underground, respectively;  $Q_1 - Q_5$  represent heat-releasing volume from 1 - 5 layer of soil, respectively.

图 1 下挖式日光温室土壤剖面图

Fig. 1 Soil sectional drawing of deep-bed solar greenhouse

1.3.2 热流密度

单位时间单位面积地面放热量为热流密度,根据傅里叶定律,热流密度数学表达式为:

$$\Phi = \lambda A \text{grad}T \quad (3)$$

式中: $\Phi$  为热流密度,  $W/(s \cdot m^2)$ ;  $\text{grad}T$  为瞬时温度梯度,  $K/m$ 。土壤  $\lambda$ 、 $A$  为定值,由式(3)可知,热流密度由土壤各层之间瞬时  $\text{grad}T$  决定,即地面温度变化率越大,土壤各层之间  $\text{grad}T$  越大,地面热流密度就越大。

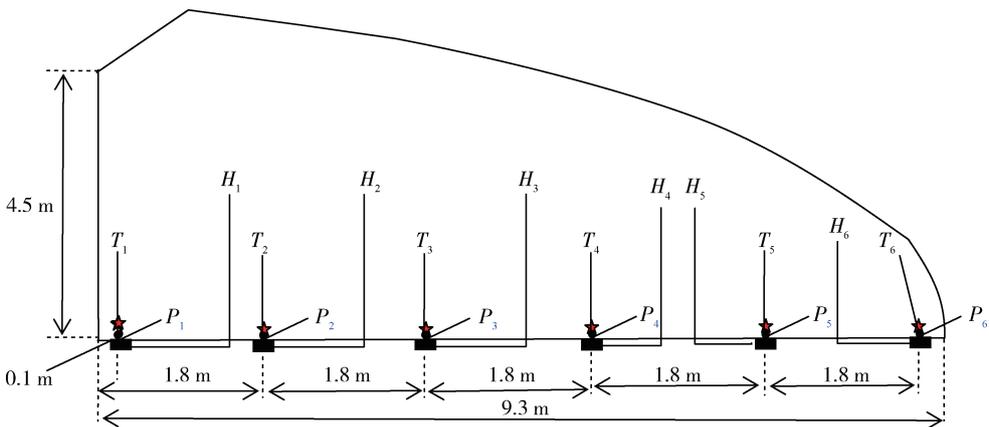
1.3.3 土壤蓄热量变化

土壤蓄热量降低是土壤温度降低的过程,包括各层土壤之间温度降低速率、地面温度变化向土壤内部传播快慢 2 个方面。地面温度变化率越大,土

壤各层之间温度变化率越大,土壤蓄热量变化就越大;同一温室中不同测点温度降低向温室下土壤传播快慢相同;综合以上 2 个方面可知,地面温度变化率越大,土壤蓄热量变化就越大,地面温度变化率与土壤蓄热量变化之间存在相关关系。

1.4 试验设计

测点位置设置在温室中部自东向西 30 m 处,距离后墙向南 0.1 m ( $P_1$ )、1.8 m ( $P_2$ )、3.6 m ( $P_3$ )、5.4 m ( $P_4$ )、7.2 m ( $P_5$ )、9.0 m ( $P_6$ ) 跨度处分别安装温度传感器和热流板,温度传感器和热流板紧贴地面,具体设置见图 2。温度传感器测定的温度分别用  $T_1 \sim T_6$  表示,热流板测定的热流密度分别用  $H_1 \sim H_6$  表示。



$P_1 \sim P_6$  为测点;  $T_1 \sim T_6$  为各测点温度;  $H_1 \sim H_6$  为热流密度。  
 $P_1 - P_6$  are test points;  $T_1 - T_6$  are temperature of test points;  $H_1 - H_6$  are heat flow density.

图 2 下挖式日光温室结构和测点示意图

Fig. 2 Sketch of deep-bed solar greenhouse structure and test points

### 1.4.1 土壤蓄热量降低研究

本试验用地面温度变化率代表土壤蓄热量变化速率,通过测定分析地面不同跨度处温度变化率来研究对应跨度处土壤蓄热量的变化规律。

### 1.4.2 地面放热量研究

夜间地面向温室内部释放热量,本研究用测定的热流密度值( $H$ )定量地面放热量,对地面不同跨度处的放热量进行研究。

### 1.4.3 土壤热量流动特性

结合地面不同跨度处蓄热量变化与放热量之间的关系,对土壤热量流动进行数据分析。

### 1.4.4 测试仪器和时间

温度和热流密度采用 JTNT-C 多通道温度热流测试仪测定。温度传感器技术参数为:温度范围 $-20\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,常温可达 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度分辨率 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热流板技术参数为:热流范围 $0\sim 2\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,温度范围 $-50\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度 $5\%$ 。

测定时间为 2015-12-15—2016-01-28。数据记录从每天下午 18:00 到第 2 天凌晨 6:00,间隔时间为 5 min,以每小时测定的 12 个数据的均值作为该时刻该测点的温度和热流密度。

试验期间不同天气条件下土壤白天蓄热量差别很大,本试验选用 12 月 16 日晴天(蓄热量最多)和

1 月 16 日阴天(蓄热量最少)夜间的测定数据进行分析。

### 1.4.5 数据分析

用 MATLAB 软件处理数据;用 MATLAB 软件对地面不同跨度处温度变化与时间的关系进行数据拟合,求解拟合函数导函数,根据导函数斜率的大小来判断地面温度变化率的快慢,进而判断土壤蓄热量变化的快慢;用 MATLAB 软件对地面不同跨度处放热量与时间的关系进行数据拟合,并对拟合函数进行积分运算,计算地面放热量。用 MATLAB 软件仿真建立假想数学模型,量化后墙下土壤缓冲、温室外土壤缓冲作用的大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 晴天夜间温室地面温度和热流密度

#### 2.1.1 地面温度和热流密度

2015-12-16 夜间温室地面各测点温度、热流密度的变化见图 3。

1)从图 3(a)可以看出,同一时刻各测点温度除去  $T_5$  略大于  $T_4$  外,基本上是自北向南逐渐降低。不同时刻各测点温度持续降低,这是由于土壤放热是非稳态导热,土壤释放热量后,温度降低; $T_1$ 、 $T_6$  与  $T_2\sim T_5$  相比降低相对缓慢。

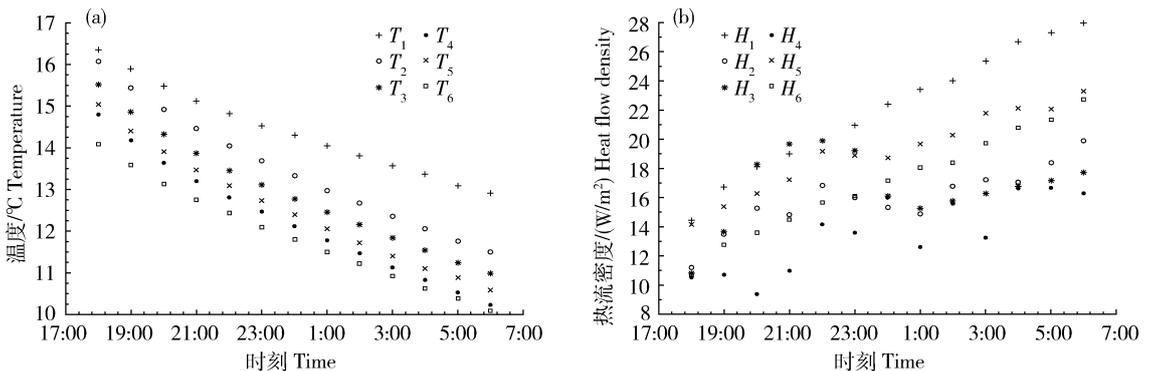


图 3 晴天夜间温室地面各测点温度(a)和热流密度(b)的变化

Fig. 3 Temperature and heat flow density variations of the test points on the ground of greenhouse at sunny night

2)夜间  $T_1$  一直大于  $T_2$ ,说明后墙下土壤温度一直高于  $T_1$ ,原因是如果后墙下土壤温度低于  $T_1$ , $T_1$  会小于  $T_2$ ,这与夜间  $T_1$  一直大于  $T_2$  不符;同样道理,夜间  $T_5$  一直大于  $T_6$ ,可以推断出  $T_6$  一直高于温室外土壤温度。

3)从图 3(b)可以看出,同一时刻各测点热流密度差别较大;不同时刻各测点热流密度变化较

多, $H_1$ 、 $H_6$  持续增大, $H_2\sim H_5$  反复较多;考虑到各测点温度缓慢降低,各测点热流密度的不稳定除去受到测点温度影响外,应该还受到其他因素影响。

#### 2.1.2 地面温度和热流密度的量化表达

将地面各测点温度和热流密度变化与时间的关系进行拟合,结果分别见表 1 和表 2。

表1 晴天夜间温室地面各测点温度变化与时间的函数关系

Table 1 The functional relationship between temperature variations of test points on the ground and time at sunny night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals	导数方程 Derivative equation
$P_1$	$y=0.009\ 4x^2-0.41x+17$	0.16	$y=0.0188x-0.41$
$P_2$	$y=0.013x^2-0.55x+17$	0.17	$y=0.026x-0.55$
$P_3$	$y=0.013x^2-0.54x+16$	0.23	$y=0.026x-0.54$
$P_4$	$y=0.011x^2-0.52x+15$	0.22	$y=0.022x-0.52$
$P_5$	$y=0.012x^2-0.52x+15$	0.18	$y=0.024x-0.52$
$P_6$	$y=0.007\ 8x^2-0.43x+14$	0.16	$y=0.015\ 6x-0.43$

注:拟合函数中  $y$  代表温度,  $x$  代表时间。表 3 同。

Note: In functions  $y$  represents temperature.  $x$  represents of time. The same as in Table 3.

1)由表1中导数方程可以看出,  $T_1$ 、 $T_6$  变化率小于  $T_2 \sim T_5$  变化率,  $T_2 \sim T_5$  变化率基本相当,说明  $P_1$ 、 $P_6$  处土壤蓄热量变化小于  $P_2 \sim P_5$  处土壤蓄热量变化,  $P_2 \sim P_5$  处土壤蓄热量变化基本相当。 $P_1$  处土壤蓄热量变化小是由于温室北侧土壤与后墙下土壤连接,受后墙下土壤缓冲作用,  $P_1$  处土壤温度降低较慢;考虑到后墙下土壤温度高于温室北侧土壤温度,后墙下土壤缓冲作用是通过后墙下土壤热量流入温室北侧土壤来实现的。 $P_6$  处土壤蓄热量变化小是由于温室南侧土壤与温室外土壤连接,受温室外土壤缓冲作用,  $P_6$  处土壤温度降低较

慢;白天温室内土壤蓄热量多、土壤温度高,温室南侧土壤与温室外土壤之间温差较大,热量流动较多;夜间温室土壤放热,温室南侧土壤温度下降速率大于有 0.5 m 土层覆盖的温室外土壤下降速率,温室南侧土壤与温室外土壤之间的温差降低,热量流动减少,由此可见,温室外土壤缓冲作用是通过温室南侧土壤向温室外土壤热量流动减少来实现的。

$P_2 \sim P_5$  处土壤蓄热量变化基本相当,是因为  $P_2 \sim P_5$  处土壤距离后墙下土壤和温室外土壤较远,没有受到后墙下土壤和温室外土壤的缓冲。

表2 晴天夜间温室地面各测点热流密度积分值

Table 2 Integral value of heat flow density of test points on the ground at sunny night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals	积分值 Integral value
$P_1$	$y=0.002\ 3x^3-0.07x^2+1.7x+13$	1.00	264.20
$P_2$	$y=0.02x^3-0.44x^2+3.1x+8.8$	2.20	186.80
$P_3$	$y=-0.004\ 9x^4+0.18x^3-2.3x^2+11x+0.8$	2.90	171.42
$P_4$	$y=0.003\ 3x^4-0.095x^3+0.87x^2-2.2x+12$	3.60	107.80
$P_5$	$y=0.005\ 4x^3-0.13x^2+1.6x+13$	1.60	234.20
$P_6$	$y=0.006x^3-0.13x^2+1.8x+9.3$	0.79	210.80

注:拟合函数中  $y$  代表热流密度,  $x$  代表时间。表 4 同。

Note: In functions  $y$  represents heat flow density.  $x$  represents time. The same as in Table 4.

2)由表2可以看出,  $H_1$  最高,  $H_5$ 、 $H_6$  基本相当,  $H_2$ 、 $H_3$  较低,  $H_4$  最小。  $H_1$  高是因为  $T_1$  最高,

$P_1$  点对流换热温差最大;  $H_6$  高但各测点中  $T_6$  最低,  $P_6$  点对流换热温差最小,  $P_6$  点与  $P_1$  点的区别

是  $P_6$  点跨度距离较大,因此,  $H_6$  较大可能是  $P_6$  点跨度距离较大引起的;综合  $P_1 \sim P_6$  点温度、跨度距离与放热量的关系可以看出,测点温度越高放热量越多,测点跨度距离越大放热量越多,测点放热量是测点温度与测点跨度距离综合作用的结果。

3)根据能量守恒定律,土壤蓄热量变化和放热量应该是相等的,但由 1)、2)可知,一方面  $P_2 \sim P_5$  处土壤蓄热量变化基本相当,另一方面  $H_2 \sim H_5$  差别很大,说明不同测点处热量存在亏缺和盈余,这种亏缺和盈余是通过土壤跨度方向上热量流动来实现的,即土壤存在跨度方向上的热量流动。

## 2.2 阴天夜间温室地面温度和热流密度

### 2.2.1 地面温度和热流密度

2016-01-16 夜间温室地面各测点温度、热流密度的变化见图 4。

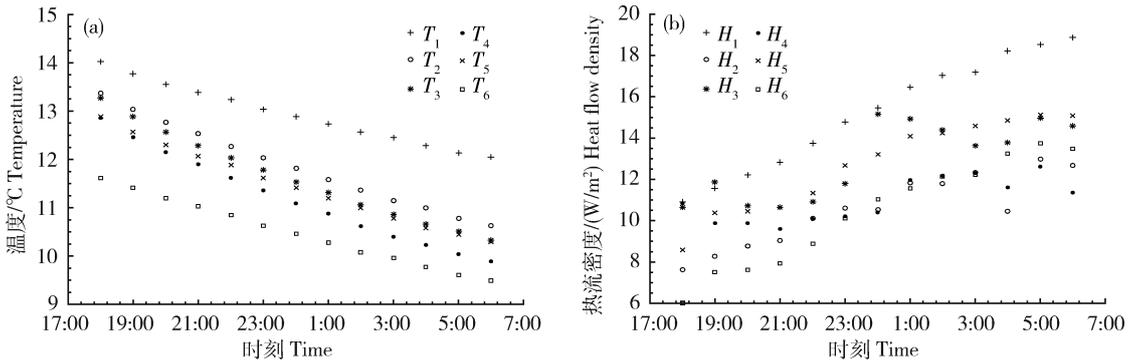


图 4 阴天夜间温室地面各测点温度(a)和热流密度(b)的变化

Fig. 4 Temperature and heat flow density variations of the test points on the ground of greenhouse at cloudy night

### 2.2.2 地面温度和热流密度的量化表达

将地面各测点温度和热流密度变化与时间的关系进行拟合,结果分别见表 3 和表 4。

1)由表 3 中导数方程可以看出,  $T_3$ 、 $T_4$  变化率最大,  $T_2$ 、 $T_5$  变化率次之,  $T_1$  变化率较小,  $T_6$  变化率最小。  $T_1$ 、 $T_2$  变化率小是由于温室北侧土壤与后墙下土壤连接,受后墙下土壤缓冲作用,  $P_1$ 、 $P_2$  处土壤温度降低较慢;考虑到后墙下土壤温度大于  $T_1$ 、 $T_1$  大于  $T_2$ ,后墙下土壤缓冲作用是通过后墙下土壤热量流入  $P_1$ 、 $P_2$  处土壤来实现的,且后墙下土壤对  $P_1$  的缓冲作用大于对  $P_2$  的缓冲作用。  $T_6$ 、 $T_5$  变化率小是由于温室南侧土壤与温室外土壤连接,受温室外土壤缓冲作用,  $P_5$ 、 $P_6$  处土壤温度降低较慢;考虑到  $T_5$  大于  $T_6$ 、 $T_6$  大于温室外土壤温度,后墙下土壤缓冲是通过  $P_5$ 、 $P_6$  处土壤向温室外土壤

1)由图 4(a)可以看出,同一时刻各测点温度除去  $T_5$  略大于  $T_4$  外,基本上也是自北向南逐渐降低。不同时刻各测点温度持续降低,这也是由于土壤放热是非稳态导热,土壤释放热量后,温度降低;  $T_1$ 、 $T_6$  与  $T_2 \sim T_5$  相比降低也是相对缓慢。

2)夜间  $T_1$  一直大于  $T_2$ ,说明后墙下土壤温度一直高于  $T_1$ ,原因也是如果后墙下土壤温度低于  $T_1$ ,  $T_1$  会小于  $T_2$ ,这与夜间  $T_1$  一直大于  $T_2$  不符;同样道理,夜间  $T_5$  一直大于  $T_6$ ,说明  $T_6$  一直高于温室外土壤温度。

3)同一时刻各测点热流密度差别较大;不同时刻各测点热流密度变化较多,  $H_1$  持续增大,  $H_2 \sim H_6$  反复较多(图 4(b));考虑到各测点温度缓慢降低,各测点热流密度的不稳定除去受到测点温度影响外,应该也还受到其他因素影响。

热量流动减少来实现的,且温室外土壤对  $P_6$  的缓冲作用大于对  $P_5$  的缓冲作用。

$P_3$ 、 $P_4$  处土壤蓄热量变化较大,是因为  $P_3$ 、 $P_4$  处土壤距离后墙下土壤和温室外土壤较远,没有受到后墙下土壤和温室外土壤的缓冲。

2)由表 4 可以看出,  $H_1$  最高,  $H_3$ 、 $H_5$  基本相当,  $H_2$ 、 $H_4$ 、 $H_6$  基本相当。  $H_1$  高是因为  $T_1$  最高,  $P_1$  点对流换热温差最大;  $T_3$ 、 $T_5$  差别较大,但  $H_3$ 、 $H_5$  放热量差别不大;  $T_2$ 、 $T_4$ 、 $T_6$  差别也很大,但  $H_2$ 、 $H_4$ 、 $H_6$  差别却不大;综合  $P_1 \sim P_6$  点温度、跨度距离与放热量的关系也可以得出,测点温度越高放热量越多,测点跨度距离越大放热量越多,测点放热量是测点温度与测点跨度距离综合作用的结果。

3)根据能量守恒定律,土壤蓄热量变化与放热量应该相等,但从表 3、表 4 可以看出,  $T_3$ 、 $T_4$  变化

率基本相当,但  $H_3$ 、 $H_4$  并不相同,说明  $P_3$ 、 $P_4$  处热量存在亏缺和盈余,这种亏缺和盈余也是通过土壤

跨度方向上热量流动来实现的,即土壤存在跨度方向上的热量流动。

表3 阴天夜间温室地面各测点温度变化与时间的函数关系

Table 3 Functional relationship between temperature variations of test points on the ground and time at cloudy night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals	导数方程 Derivative equation
$P_1$	$y=0.003\ 8x^2-0.22x+14$	0.067	$y=0.007\ 6x-0.22$
$P_2$	$y=0.005\ 2x^2-0.3x+14$	0.053	$y=0.010\ 4x-0.3$
$P_3$	$y=0.007\ 3x^2-0.34x+14$	0.073	$y=0.014\ 6x-0.34$
$P_4$	$y=0.007\ 2x^2-0.35x+13$	0.078	$y=0.014\ 4x-0.35$
$P_5$	$y=0.004\ 8x^2-0.28x+13$	0.074	$y=0.009\ 6x-0.28$
$P_6$	$y=0.002\ 5x^2-0.21x+12$	0.053	$y=0.005x-0.21$

表4 阴天夜间温室地面各测点热流密度积分值

Table 4 Integral value of heat flow density of test points on the ground at cloudy night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals	积分值 Integral value
$P_1$	$y=-0.003\ 8x^3+0.064x^2+0.47x+10$	0.54	178.70
$P_2$	$y=0.000\ 7x^3-0.038x^2+0.82x+6.7$	2.00	126.90
$P_3$	$y=-0.01x^3+0.2x^2-0.63x+11$	3.30	154.30
$P_4$	$y=-0.014x^3+0.3x^2-1.6x+12$	1.20	129.70
$P_5$	$y=-0.003\ 6x^3+0.045x^2+0.54x+8.4$	1.12	153.32
$P_6$	$y=-0.004\ 2x^3+0.068x^2+0.44x+5.8$	1.06	125.96

### 2.3 温室夜间后墙下土壤、温室外土壤缓冲作用特点

1)对比表1和表3可以看出,土壤蓄热量多、温度高时后墙下土壤对温室北侧土壤的缓冲作用小于土壤蓄热量少、温度低时后墙下土壤对温室北侧土壤的缓冲作用。这可能是因为在白天温室土壤温度高时,后墙下土壤与温室北侧土壤之间温差小,后墙下土壤对温室北侧土壤影响范围小,夜间后墙下土壤对温室北侧土壤缓冲范围也小;白天温室土壤温度低时,后墙下土壤与温室北侧土壤之间温差大,后墙下土壤对温室北侧土壤影响范围大,夜间后墙下土壤对温室北侧土壤缓冲范围也大。

2)还可以看出,土壤蓄热量多、温度高时温室外土壤对温室南侧土壤的缓冲作用小于土壤蓄热量少、温度低时温室外土壤对温室南侧土壤的缓冲作用。这可能是因为在白天温室土壤温度高时,温室南

侧土壤蓄热量多,向温室外土壤热量流动数量也多,温室外土壤与温室南侧土壤的互相作用向温室外土壤移动,温室外土壤对温室南侧土壤影响较小,夜间温室外土壤对温室南侧土壤缓冲范围小;白天温室土壤温度低时,温室南侧土壤蓄热量少,向温室外土壤热量流动数量少,温室外土壤与温室南侧土壤的互相作用向温室南侧土壤移动,温室外土壤对温室南侧土壤影响范围大,夜间温室外土壤对温室南侧土壤缓冲的范围大。

### 2.4 热流密度积分在跨度方向的变化

2015-12-16、2016-01-16 夜间各测点热流密度积分值与跨度的函数关系见图5。

1)尽管两日之间放热量差别很大,热流密度积分值在跨度方向上具有相似的变化趋势,说明不同天气夜间土壤放热遵循相同的规律。

2)对比图 5(a)、(b)可以看出,土壤白天蓄热多时,夜间温室外土壤缓冲作用小,温室南侧土壤放热较多;土壤白天蓄热少时,夜间温室外土壤缓冲作用

大,温室南侧土壤放热量少;说明当温室蓄热量少时(尤其是遭遇不良天气影响时),温室外土壤缓冲对温室热环境的形成更加具有不利影响。

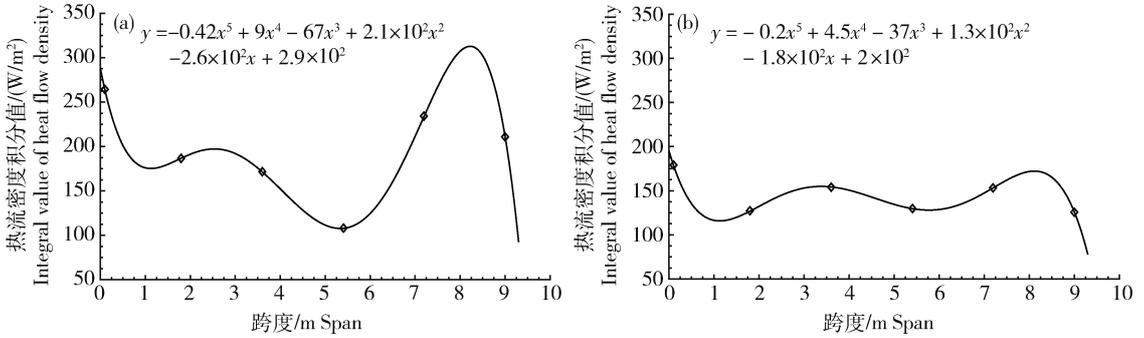


图 5 晴天(a)和阴天(b)夜间各测点热流密度积分值随跨度的变化

Fig. 5 Functional relationship between the integral value of heat flow density and span at sunny night and cloudy night

2.5 后墙下土壤缓冲作用对土壤放热量影响

后墙下土壤缓冲对  $H_1$  造成影响最大,将表 2、表 4 中  $H_2 \sim H_6$  用 MATLAB 进行数据拟合,建立在没有后墙下土壤缓冲时的假想数学模型<sup>[23]</sup>,通过

假想数学模型与实际数学模型的差别来量化后墙下土壤缓冲作用的大小。2015-12-16、2016-01-16 夜间在没有后墙下土壤缓冲时假想数学模型函数关系见图 6。

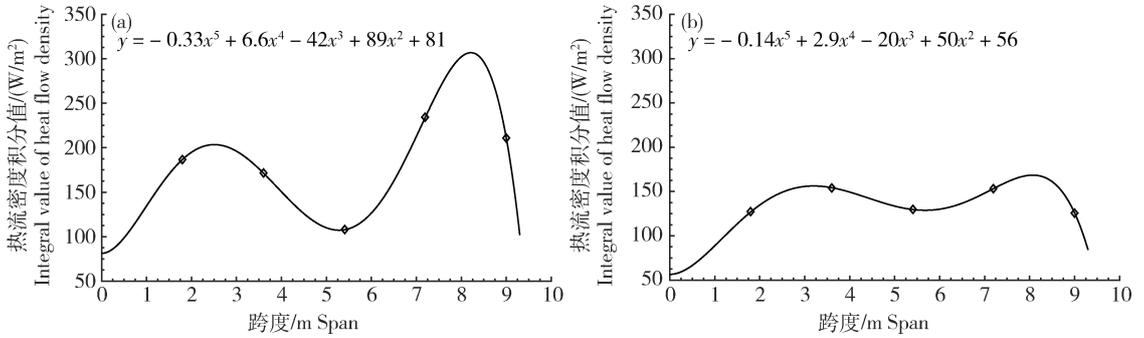


图 6 晴天(a)和阴天(b)夜间没有后墙下土壤缓冲时的假想数学模型

Fig. 6 Hypothetical mathematical model without buffer from the soil under the back wall, t sunny night and cloudy night

2.5.1 晴天夜间土壤放热量计算

由图 6(a)可知,没有后墙下土壤缓冲时土壤放热量  $\Phi_1$  为

$$\Phi_1 = \int_0^{9.3} (-0.33x^5 + 6.6x^4 - 42x^3 + 89x^2 + 81)$$

由图 5(a)可知,土壤放热量为

$$\Phi_2 = \int_0^{9.3} (-0.42x^5 + 9x^4 - 67x^3 + 210x^2 - 260x + 290)$$

后墙下土壤缓冲对土壤放热量的影响  $\Phi_3 = \Phi_2 - \Phi_1$ , 后墙下土壤缓冲对土壤放热量影响占总放热量的比例为 7.34%。

2.5.2 阴天夜间土壤放热量计算

由图 6(b)可知,在没有后墙下土壤缓冲时土壤放热量为

$$\Phi_1 = \int_0^{9.3} (-0.14x^5 + 2.9x^4 - 20x^3 + 50x^2 + 56)$$

由图 5(b)可知,土壤放热量为

$$\Phi_2 = \int_0^{9.3} (-0.2x^5 + 4.5x^4 - 37x^3 + 130x^2 - 180x + 200)$$

后墙下土壤缓冲对土壤放热量影响为  $\Phi_3 = \Phi_2 - \Phi_1$ 。后墙下土壤缓冲对土壤放热量影响占总放热量的比例为 6.06%。

## 2.6 温室外土壤缓冲作用对土壤放热量影响

温室外土壤缓冲对  $H_6$  造成影响最大,将表 2、表 4 中  $H_1 \sim H_5$  用 MATLAB 进行数据拟合,建立在没有温室外土壤缓冲时的假想数学模型,通过假

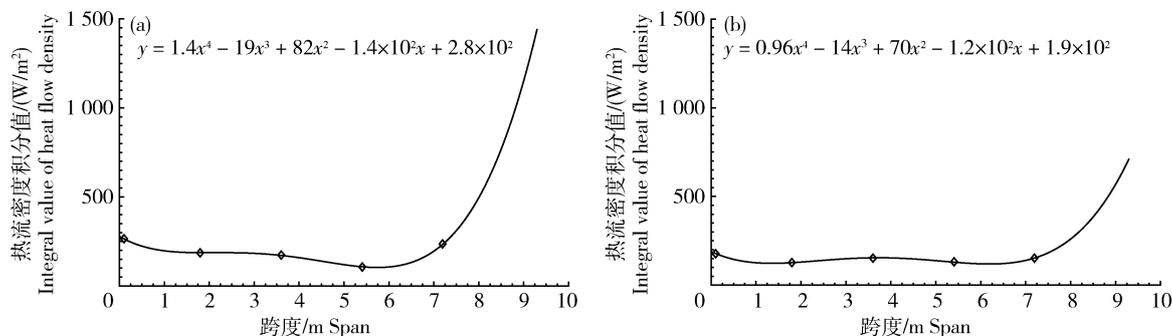


图 7 晴天(a)和阴天(b)夜间没有温室外土壤缓冲时的假想数学模型

Fig. 7 Hypothetical mathematical model without buffer from outsides of the greenhouse at sunny night (a) and cloudy night (b)

### 2.6.1 晴天夜间土壤放热量计算

由图 7(a)可知,在没有温室外土壤缓冲时土壤放热量为

$$\Phi_4 = \int_0^{9.3} (1.4x^4 - 19x^3 + 82x^2 - 140x + 280)$$

温室外土壤缓冲对土壤放热量的影响为  $\Phi_3 = \Phi_2 - \Phi_4$ 。温室外土壤缓冲对土壤放热量影响占总放热量比例为 50.28%。

### 2.6.2 阴天夜间土壤放热量计算

由图 7(b)可知,在没有温室外土壤缓冲时土壤放热量为

$$\Phi_4 = \int_0^{9.3} (0.96x^4 - 14x^3 + 70x^2 - 120x + 190)$$

温室外土壤缓冲对土壤放热量影响为  $\Phi_3 = \Phi_2 - \Phi_4$ 。温室外土壤缓冲对土壤放热量影响占总放热量比例为 31.8%。

## 3 讨论

本试验中后墙下土壤热量向温室北侧土壤流动,后墙下土壤缓冲对土壤放热量增加占土壤放热量比例为 6.06%~7.34%,说明通过下挖利用深层土壤热资源以及后墙热量向后墙下土壤传导,日光温室土壤北侧边际效应发生改变,热量流动朝向有利于温室土壤温度环境方面转变,这可能是下挖式温室在生产中大面积推广应用的原因之一。

尽管下挖式温室利用深层土壤热资源,温室外

想数学模型与实际数学模型的差异来量化温室外土壤缓冲作用的大小。2015-12-16 和 2016-01-16 夜间在没有温室外土壤缓冲时假想数学模型函数关系见图 7。

土壤温度仍然低于温室南侧土壤温度,温室南侧土壤热量一直向温室外土壤流动,由试验可知,夜间温室外土壤缓冲使得土壤放热量降低占土壤放热量比例为 31.8%~50.28%,因此降低温室外土壤缓冲对于改善温室土壤热环境具有重要意义。生产中多采用防寒沟来降低温室外土壤缓冲,但由于使用材料的热阻较小、湿度大、位置不当等原因,效果不理想。下挖式日光温室利用深层土壤温度高的特点来减少温室外土壤缓冲,但从本试验来看温室外土壤影响仍然很大。对防寒沟填充材料进行改进,利用高热阻材料把温室土壤包围起来,切断温室土壤与外界土壤之间的热量流动是降低温室外土壤缓冲的有效方法。张传坤在日光温室地面围护隔热层<sup>[24]</sup>制备中提出利用聚苯板、泡沫塑料等高热阻材料把温室土壤包围起来,切断温室土壤与外界土壤之间热量流动,降低温室外土壤缓冲。

后墙下土壤热量向温室北侧土壤流动,温室南侧土壤热量向温室外土壤流动,温室中部土壤热量存在欠缺和盈余,由于温室土壤温度基本上自北向南逐渐降低,温室土壤在跨度方向上存在自北向南的热量流动。温室土壤热量流动数量受后墙下土壤缓冲、温室外土壤缓冲、地面温度、跨度距离等因素影响,其中后墙下土壤缓冲、温室外土壤缓冲作用大小又受到温室土壤白天蓄热量影响,使得土壤热量流动过程比较复杂,还出现了图 3(a)、图 4(a)中  $T_5 > T_4$  的情况;本试验不排除热量会有从  $P_5$  处到  $P_4$  处的局

部流动,限于作者水平有限,不做进一步研究。

本试验没有计算出土壤跨度方向上热量流动数量,是因为跨度距离对地面放热量影响机理尚不明确,而且跨度距离和测点温度对地面放热量影响作用相反,只有把这2种因素进行量化才能计算出来,关于跨度位置对土壤放热量影响的机理有待于进一步研究。

## 4 结 论

1)温室外土壤缓冲是下挖式温室土壤温度不均衡的主要原因。

2)下挖式温室土壤夜间存在自北向南的热量流动。

3)地面温度越高,地面放热量越多;跨度距离越大,地面放热量越多;地面放热量是地面温度和跨度距离综合作用的结果。

4)本试验温室试验期间后墙下土壤缓冲引起土壤放热量增多数量占土壤放热量的比例为6.06%~7.34%。

5)本试验温室试验期间温室外土壤缓冲引起的土壤放热量降低数量占土壤放热量的比例为31.8%~50.28%。

## 参考文献 References

- [1] 李式军,郭世荣. 设施园艺学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2012:30  
Li S J, Guo S R. *Protected Horticulture*[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2012:30(in Chinese)
- [2] 于威,王铁良,刘文合,白义奎,佟国红. 日光温室地中热水管加温对土壤温度的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2014,45(3):321-325  
Yu W, Wang T L, Liu W H, Bai Y K, Tong G H. Soil temperature in solar greenhouse with buried hot water pipes [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014, 45(3):321-325(in Chinese)
- [3] 白义奎,迟道才,王铁良,赵崇,任冰洁. 日光温室燃池:地中热交换系统加热效果的初步研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):178-181  
Bai Y K, Chi D C, Wang T L, Zhao D, Ren B J. Experimental research of heating by fire-pit and underground heating exchange system in a solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10):178-181(in Chinese)
- [4] 冯玉龙,刘恩举,孟庆超. 根系温度对植物的影响:根温对植物代谢的影响[J]. 东北林业大学学报 1995,23(4):94-99

- Feng Y L, Liu E J, Meng Q C. Influence of temperature of root system on plant: Influence of root temperature on plant metabolism[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1995, 23(4):94-99(in Chinese)
- [5] 冯玉龙,刘恩举,孙国斌. 根系温度对植物的影响:根温对植物生长及光合作用的影响(1)[J]. 东北林业大学学报 1995,23(4):63-69  
Feng Y L, Liu E J, Sun G B. Influence of temperature of root system on plant (i): Influence of root temperature on plant growth and photosynthesis[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1995, 23(4):63-69(in Chinese)
- [6] 高国训,靳力争,郭富常,顾自豪. 节能日光温室温度分布及其变化[J]. 天津农业科学,2001,7(1):33-36  
Gao G X, Jin L Z, Guo F C, Gu Z H. Temperature distribution and variation in saving solar greenhouse [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2001, 7(1):33-36(in Chinese)
- [7] 张海鑫,塔娜,康宏源. 日光温室边际土壤温度试验及模拟研究[J]. 北方园艺,2017(5):41-48  
Zhang H X, Tana, Kang H Y. Experiment and simulation of soil temperature at edge area in solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2017(5):41-48(in Chinese)
- [8] 陈端生. 日光温室小气候环境及其调节[J]. 中国花卉园艺,2013(8):47-52  
Chen D S. Microclimate environment and its regulation in solar greenhouse[J]. *China Flower & Horticulture*, 2013(8), 47-52 (in Chinese)
- [9] 孙治强,孙丽,王谦,李胜利. 日光温室土壤温度环境边际效应[J]. 农业工程学报,2009,20(5):150-155  
Sun Z Q, Sun L, Wang Q, Li S L. Marginal effect of the soil temperature environment in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5):150-155(in Chinese)
- [10] 商量. 日光温室周边地温对室内地温的影响研究[D]. 太谷:山西农业大学,2016  
Shang L. The influence of ground temperature on indoor and outdoor temperature in solar greenhouse[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016(in Chinese)
- [11] 郝庆炉,薛香,段爱旺. 日光温室室内温度特点及其变化规律研究[J]. 灌溉排水学报,2003,22(6):50-53  
Gao Q L, Xue X, Duan A W. Temperature characteristics and its changing laws within solar greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6):50-53(in Chinese)
- [12] 白义奎,刘文合,柴宇,车忠仕,佟国红. 防寒沟对日光温室横向地温的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):595-597  
Bai Y K, Liu W H, Chai Y, Che Z S, Tong G H. Effect of cold-proof ditch on soil temperature changes in horizontal in solar greenhouse [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5-6):595-597(in Chinese)
- [13] 佟国红,王铁良,白义奎,刘文合,于威,赵荣飞. 日光温室土壤温度分布边际效应的数值模拟[J]. 北方园艺,2010(15):65-68

- Tong G H, Wang T L, Bai Y K, Liu W H, Yu W, Zhao R F. Numerical modeling of marginal effect on soil temperature distribution in a Chinese solar greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2010(15): 65-68 (in Chinese)
- [14] 王思倩, 张志录, 侯伟娜, 易东海, 孙治强. 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
- Wang S Q, Zhang Z L, Hou W N, Yi D H, Sun Z Q. Variation characteristics of soil temperature at south edge area in sinking-mode greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 235-240 (in Chinese)
- [15] 张靖周, 常海萍. 传热学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015: 81, 60-61
- Zhang J Z, Chang H P. *Heat Transmission Science* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015: 81, 60-61 (in Chinese)
- [16] 梁世彬, 方曜奇, 刘润杰, 朱彻. 玻璃化状态下胎面胶粒和胶粉非稳态导热的分析与计算[J]. *工程热物理学报*, 1996(S1), 17: 143-146
- Liang S B, Fang Y Q, Liu R J, Zhu C. Analysis of transient heat transfer of scrap tire peel and its fine powder below the glass transition temperature [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1996, 17(S1): 143-146 (in Chinese)
- [17] 高兴勇, 陆蕴香. 大型圆柱体钢锭非稳态导热的集总热容法应用[J]. *锻压技术*, 2011, 36(2): 116-118
- Gao X Y, Lu Y X. Application of lumped heat capacity method to large-scale circular cylinder steel ingot unsteady state heat conduction [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2011, 36(2): 116-118 (in Chinese)
- [18] 樊海兵, 曲方, 谢正文. 非稳态导热理论在矿井原岩温度测定中的应用[J]. *中国计量学院学报*, 2008, 19(3): 233-236
- Fan H B, Qu F, Xie Z W. Virgin rock temperature measurement depending on unstable heat conduction [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2008, 19(3): 233-236 (in Chinese)
- [19] 韩小良. 窑炉砌体非稳态导热时温度分布及蓄热量的计算[J]. *陶瓷*, 2002(6): 29-32
- Han X L. Calculation of temperature distribution and heat storage during unsteady heat conduction of kiln masonry [J]. *Pottery and Porcelain*, 2002(6): 29-32 (in Chinese)
- [20] 胡智敏, 曾令可, 吴建青, 刘振群. 周期性变化边界条件下窑墙非稳态导热的数值模拟[J]. *硅酸盐通报*, 1997(4): 4-9
- Hu Z M, Zeng L K, Wu J Q, Liu Z Q. Numerical simulation of unsteady heat transfer in kiln wall with periodically variational boundary conditions [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1997(4): 4-9 (in Chinese)
- [21] 马承伟, 陆海, 李睿, 曲梅. 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 C W, Lu H, Li R, Qu M. 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*, 2010, 26(6): 231-237 (in Chinese)
- [22] 张鸿雁, 张志政, 王元, 崔海航. 流体力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2014: 1-2
- Zhang H Y, Zhang Z Z, Wang Y, Cui H H. *Fluid Mechanics* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014: 1-2 (in Chinese)
- [23] 瞿亮, 凌民, 傅昱, 蔡立军. 基于MATLAB的控制系计算机仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2006
- QU L, LING M, FU Y, Cai L J. *Computer Simulation of Control System Based on MATLAB* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2006 (in Chinese)
- [24] 张传坤. 日光温室地面围护隔热层: 中国, 201620974735. 9 [P]. 2017-04-19
- Zhang C K. Heat-insulating layer around the soil of solar greenhouse: China, 201620974735. 9 [P]. 2017-04-19 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春