

网络出版时间:2018-07-30 17:12

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.02.018

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180730.1711.036.html

日光温室后墙夜间非稳态导热特性研究

张传坤^{1a},魏 珉^{2a},刘福胜^{2b},徐平丽^{1b}

(1 山东省农业科学院 a 蔬菜花卉研究所,b 生物技术研究中心,山东 济南 250100;

2 山东农业大学 a 园艺科学与工程学院,b 水利土木工程学院,山东 泰安 271018)

【摘 要】【目的】对日光温室后墙夜间的非稳态导热特性进行研究,为发挥后墙保温作用提供理论依据。【方法】在位于山东泰安的试验温室内,分别于温室后墙距地面 0.1,1.1,2.1,3.1 和 4.1 m 处及地面距离后墙 0.1 m 处设置测点,选取 2015 年越冬季某一晴天和阴天,在 18:00 至翌日 06:00,每隔 1 h 测定后墙各测点的温度和热流密度,计算各测点温度变化率、热流密度积分值、后墙内部热量流动量,以及后墙与地面之间的热量流动量,研究夜间温室后墙不同高度蓄热量变化与放热量之间的关系、地面温度与后墙温度之间的关系,以及后墙内部和后墙与地面之间的热量流动。【结果】晴天夜间后墙上部蓄热量变化基本相同且大于后墙下部蓄热量变化,后墙上部放热量逐渐降低然后趋于平稳,后墙下部放热量逐渐增多,后墙中部放热总量最多;后墙温度 24:00 之前高于地面温度,24:00 之后低于地面温度,后墙与地面之间存在热量流动;后墙内部热量流动数量占后墙放热总量的比值为 14.2%。阴天夜间后墙上部蓄热量变化基本相同且大于后墙下部蓄热量变化,后墙放热量从上到下逐渐增多;后墙温度低于地面温度,地面流入后墙热量占后墙放热总量的比值为 3%;后墙内部热量流动数量占后墙放热总量的比值为 25.5%。【结论】后墙高度、后墙不同高度蓄热量影响后墙不同高度放热量;后墙高度对放热量的影响贯穿后墙放热过程的始终,后墙蓄热量对放热量的影响主要集中在后墙放热前期;后墙热量存在自上而下的整体迁移流动。

【关键词】日光温室;温室后墙;非稳态导热;热量迁移流动

【中图分类号】S625.1

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2019)02-0144-11

Unsteady heat conduction characteristics of back wall of solar greenhouse at night

ZHANG Chuankun^{1a},WEI Min^{2a},LIU Fusheng^{2b},XU Pingli^{1b}

(1 a Vegetable Research Institute, b Bio-tech Research Centre, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100, China; 2 a Horticulture and Engineering College,

b College of Water Conservancy and Civil Engineering,

Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract:【Objective】This study investigated the characteristics of unsteady heat conduction of the back wall of solar greenhouse at night to provide basis for improving the heat-releasing ability of back wall. 【Method】In the test greenhouse in Tai'an, Shandong, test points were set up at 0.1, 1.1, 2.1, 3.1, and 4.1 m on the back wall and at ground 0.1 m away from the back wall. The temperature and heat flow density of each test point were measured every 1 hour from 18:00 to 06:00 of the following day on a sunny day and a cloudy day in winter, 2015. The change rate of temperature at each test point, the integral value of heat flow density, the internal heat transfer of the back wall, and the heat flow between the back wall and the ground

【收稿日期】2017-11-10

【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”国家科技支撑计划项目(2014BAD05B03);山东省农业重大应用技术创新项目(鲁财农指(2015)16)

【作者简介】张传坤(1972—),男,山东临朐人,副研究员,在读博士,主要从事设施环境工程与调控研究。
E-mail: zhangchuankun@sina.com

were calculated. The relationship between heat storage and heat-releasing volume at different heights of back wall, the relationship between the ground temperature and the back wall temperature, the internal heat transfer of the back wall, and the heat flow between the back wall and the ground surface were studied. 【Result】 The variations of heat storage in the middle and upper parts of the back wall were basically the same and larger than that in the lower part during sunny night. The heat-releasing volumes of the middle and upper parts of the back wall firstly decreased gradually and then tended to be steady. The temperature of the back wall was higher than the ground temperature before midnight and lower than that after midnight, and there was heat flow between the back wall and the ground. The internal heat migration flow from the middle and upper parts to the lower part was 14.2% of the total heat-releasing volume of the back wall. The variations of heat storage in the middle and upper parts of the back wall during cloudy night were basically the same and larger than that in lower part, the heat-releasing volume increased gradually from the upper part to the lower part, and the temperature of the back wall was lower than that of the ground. The heat flow volume during cloudy night from the back wall to the ground was 3% of the total heat-releasing volume of the back wall, and the internal heat migration flow from the middle and upper parts to the lower part was 25.5% of the total heat-releasing volume of the back wall. 【Conclusion】 The heat-releasing volumes at different heights of the back wall are affected by the wall height, and heat storages at different heights of the back wall. The effect of the wall height is existing in the whole heat-releasing process, and the effect of heat storage of the back wall is mainly at early period. There is heat migration flow of internal back wall.

Key words: solar greenhouse; greenhouse back wall; unsteady heat conduction; heat migration flow

日光温室以其特有的采光、蓄热、保温性能,实现了蔬菜作物的越冬生产,提高了土地产出率、劳动生产率,增强了农业效益和竞争力,成为我国北方设施蔬菜栽培的主要生产方式^[1]。

后墙作为蓄热体,在维持日光温室夜温方面发挥了重要作用。多年来,科研人员对日光温室后墙蓄热展开了多方面研究。梁建龙等^[2]、柴立龙等^[3]、樊平声等^[4]、曲继松等^[5]、李小芳等^[6]、佟国红等^[7-8]对不同墙体材料日光温室的保温性能进行研究,筛选出保温效果较好的墙体;卢志权等^[9]对凹式墙体进行研究,筛选出了蓄热量较多的凹式墙体;温祥珍等^[10]对不同高度温室模型进行试验研究,认为增加墙体高度可改善温室保温性能;李凯等^[11]、管勇等^[12-13]、王宏丽等^[14]对相变蓄热材料开展研究,提高了墙体的蓄热性能。杨仁全等^[15]通过对温室气温数据进行模拟分析,对不同结构和材料后墙的保温性能予以评价;马承伟等^[16]构建墙体传热的一维差分模型,对墙体传热过程进行了模拟;佟国红等^[17-18]采用 CFD 软件 Fluent 模拟等方法,预测了温室不同墙体形成的室内温度状况。以上研究多集中在增加后墙蓄热方面,对影响温室夜间温度环境的后墙放热过程研究很少。在生产实践中,后半夜至凌晨温室温度普遍较低^[19],作物易产生冻害,因

此对后墙夜间放热特性的研究具有重要意义。

本研究以传热学非稳态导热理论为基础,以生产上大面积使用的土墙日光温室为研究对象,对后墙夜间的热量流动规律进行研究,探讨后墙放热特性,以期完善后墙放热理论、进一步发挥后墙保温作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验温室

试验在山东省泰安市(36°11'07"N, 117°06'51"E)日光温室中进行,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^[20]。夜间温室空气与后墙表面产生对流换热,根据牛顿冷却定律,空气与后墙表面热量交换的公式为:

$$\Phi = hA(T_w - T_f). \quad (1)$$

式中: Φ 为热流量, W; h 为对流换热系数, W/(m² ·

K); A 为面积, m^2 ; T_w 为后墙表面温度, T_f 为空气温度, 单位为 K。

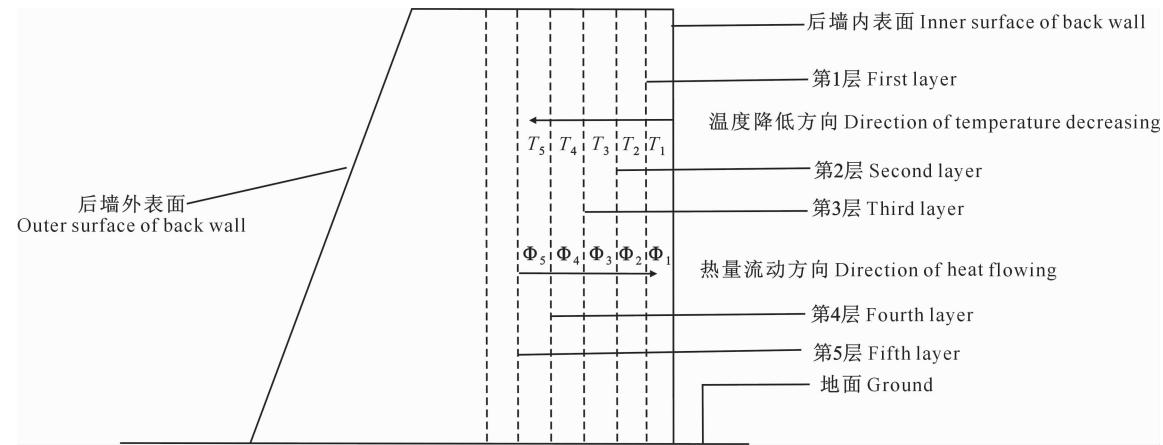
由式(1)可以看出, 对于后墙放热, h 、 T_f 为定值, 夜间后墙温度越高, 后墙放热量就越多。

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^[20], 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^[21-25]。

夜间后墙向温室内部释放热量, 后墙温度不断

降低, 后墙放热过程属于非稳态导热过程^[16]。夜间后墙表面与温室空气热量交换后后墙表面温度降低; 后墙表面温度降低后, 后墙内侧第 1 层温度(T_1)高于后墙表面温度, 后墙内侧第 1 层热量(Φ_1)向后墙表面流动; 后墙内侧第 1 层热量向后墙表面流动后, T_1 降低, 后墙内侧第 2 层温度(T_2)高于 T_1 , 后墙内侧第 2 层热量(Φ_2)向第 1 层流动。根据连续介质假说^[26], 后墙内部各层温度之间是连续分布的, 后墙表面温度降低一层一层向后墙内部传播^[20], 后墙内部热量一层一层向温室内部流动, 后墙温度降低及热量流动方向如图 1 所示。



层为概念意义上的层, 厚度理解为很薄
The layer is conceptual with very thin thickness

图 1 温室后墙剖面图

Fig. 1 Sectional view of greenhouse back wall

1.3.1 温度传播速度 后墙表面温度降低向后墙内部传播的快慢受后墙导热能力(λ)和储热能力($\rho \cdot c$)影响, 用后墙导温系数($\alpha, \text{m}^2/\text{s}$)来衡量^[20]。

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

式中: λ 为后墙导热率, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$; ρ 为后墙密度, kg/m^3 ; c 为后墙比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

后墙 λ 、 $\rho \cdot c$ 为定值, 由式(2)可知, 后墙表面温度降低向后墙内部传播的快慢由后墙物性指标决定, 与后墙表面温度降低快慢无关。

1.3.2 热流密度 单位时刻单位面积后墙放热量为热流密度, 根据傅里叶定律, 放热量数学表达式为:

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

由式(3)可以得到:

$$\Phi/A = \lambda \text{ grad } T \quad (4)$$

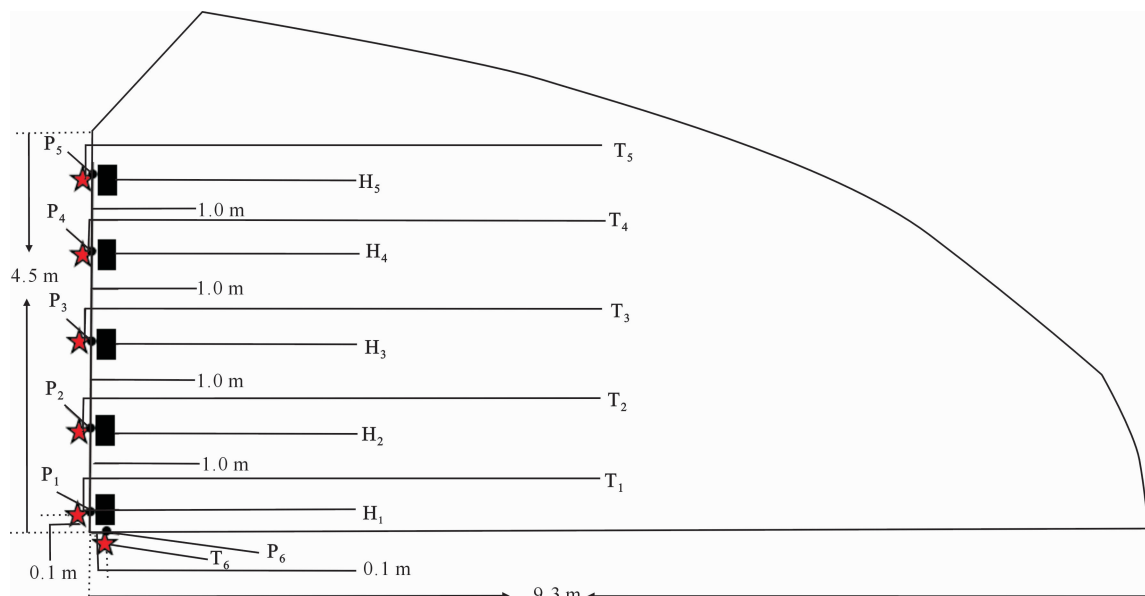
式中: Φ/A 为热流密度, W/m^2 ; A 为面积, m^2 ; grad

T 为温度梯度, K/m 。

后墙 λ 为定值, 由式(4)可知, 后墙热流密度由后墙各层之间的 $\text{grad } T$ 决定, 即后墙表面温度变化率越大, 后墙各层之间 $\text{grad } T$ 越大, 后墙热流密度就越大。

1.4 试验设计

温度监测点位于温室中部自东向西 30 m 处, 在后墙距离地面 0.1 m (P_1)、1.1 m (P_2)、2.1 m (P_3)、3.1 m (P_4)、4.1 m (P_5) 处分别设置温度传感器 ($T_1 - T_5$) 和热流板 ($H_1 - H_5$), 温度传感器和热流板紧贴后墙表面; 在地面距离后墙南 0.1 m (P_6) 处设置温度传感器 T_6 , 温度传感器紧贴地面。具体如图 2 所示。温度传感器 $T_1 - T_6$ 测定的温度分别用 $T_1 - T_6$ 表示, 热流板 $H_1 - H_5$ 测定的热流密度分别用 $H_1 - H_5$ 表示。



$P_1 \sim P_6$ 为测点,分别设置温度传感器 $T_1 \sim T_6$ (★)、热流板 $H_1 \sim H_5$ (■)
 $P_1 \sim P_6$ are test points with temperature sensors $T_1 \sim T_6$ (★) and heat plates $H_1 \sim H_5$ (■)

图 2 温室结构和测点示意图

Fig. 2 Sketch of greenhouse structure and test points

1.4.1 后墙蓄热量变化 后墙不同高度表面温度变化率越大,放热过程中后墙各层之间温度变化率就越大,后墙蓄热量变化相应也越大,因此,后墙不同高度表面温度变化率决定其蓄热量变化速率。本试验用后墙表面温度变化率代表蓄热量变化速率,通过测定后墙不同高度表面温度变化率来研究对应高度后墙蓄热量的变化规律。

夜间后墙外侧也发生非稳态导热过程向温室外部释放热量,本研究对此不作分析。

1.4.2 后墙放热量 夜间后墙向温室内部放热,本研究用测定的热流密度值(H)来定量后墙放热量,对后墙不同高度处的放热量进行研究。

1.4.3 后墙热量流动特性 结合后墙不同高度处蓄热量变化与放热量之间的关系,对后墙热量流动进行分析。

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 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热流范围 $0 \sim 2\ 000\text{ W/m}^2$;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 06:00,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温室后墙白天蓄热量

差别很大,本试验选用 2015-12-16 晴天(蓄热量多)和 2016-01-16 阴天(蓄热量少)夜间的放热数据进行分析。

1.5 数据分析

用 MATLAB 软件对后墙不同高度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后墙表面温度变化率的快慢,进而判断墙体蓄热量变化的快慢;用 MATLAB 软件对墙体不同高度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,计算墙体放热量;用 MATLAB 软件仿真建立假想数学模型,计算后墙内部的热量流动数量,以及后墙与地面之间的热量流动数量。

2 结果与分析

2.1 晴天夜间温室后墙表面温度和热流密度

2.1.1 后墙表面温度和热流密度 2015-12-16(晴天)夜间温室后墙表面各测点温度、热流密度的变化如图 3 所示。从图 3-A 可以看出,放热初期 T_1 较低,一方面是因为 P_1 受到温室内部栽培作物的遮挡,得到的辐射蓄热较少;另一方面是 P_1 与地面很近,由于地面低温的缓冲作用,后墙与地面之间存在热量流动,导致 T_1 较低。 T_4 、 T_5 较低是由于照射到 P_4 、 P_5 处的太阳光线在经过采光面时,受入射角变大、透光率降低的影响,太阳辐射强度降低。 P_2 、

P_3 处的太阳辐射强度较高,且没有地面低温的影响,所以 T_2 、 T_3 较高。夜间后墙表面各测点温度随时间持续降低,这是由于后墙放热属于非稳态导热,释放热量后,后墙温度便会降低。 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 的

下降趋势基本相似,大于 T_1 的下降趋势,这是由于 P_1 与地面接近,受到地面温度的缓冲,因此 T_1 降低较慢。

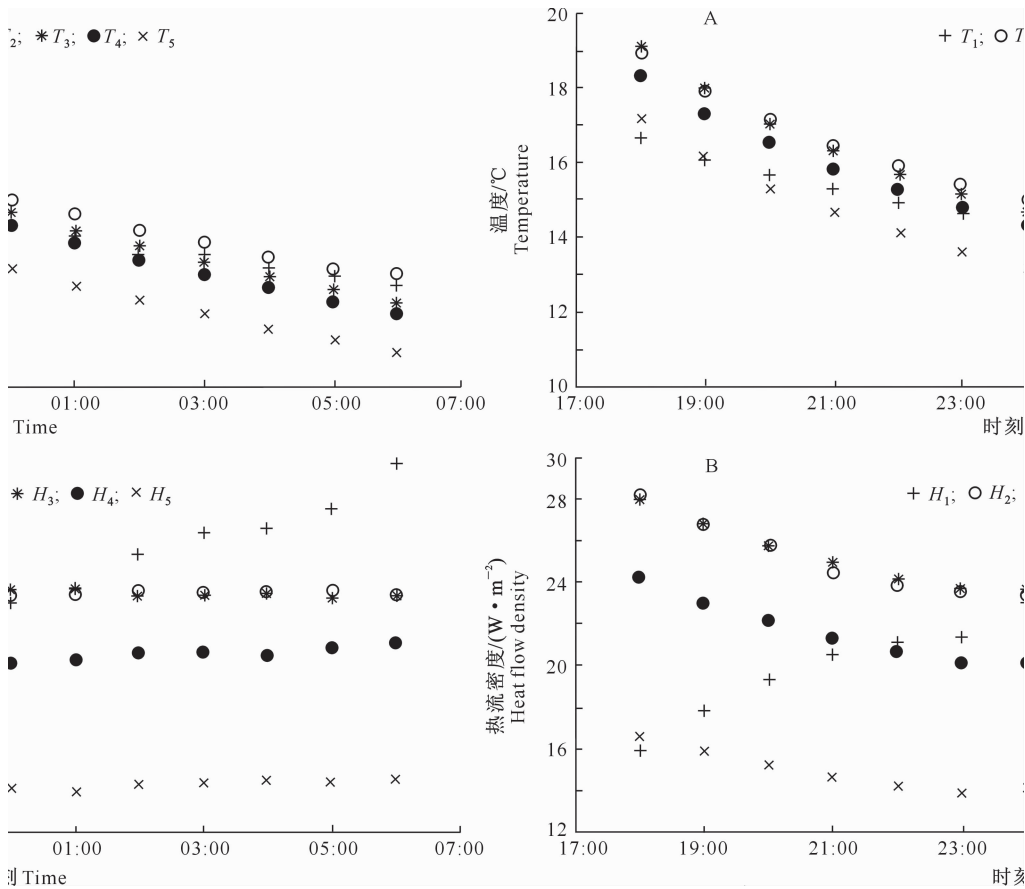


图 3 晴天夜间温室后墙表面各测点温度和热流密度的变化

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

从图 3-B 可以看出,各时段 H_2 与 H_3 基本相等,均大于 H_4 、 H_5 , H_4 与 H_5 之间也有很大差别。夜间 23:00 之前, H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 降幅较大,这是由于后墙白天蓄热量较多, T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 较高造成的。23:00 以后, H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 基本平稳,这可能是后墙高度不同引起的。 H_1 在 18:00 与 H_5 相当, 22:00 与 H_4 相当, 01:00 与 H_2 、 H_3 相当, 01:00 以

后大于 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 ,且有持续增大的趋势;这一方面可能是由于 T_1 降低缓慢,另一方面也说明后墙高度影响后墙的放热量。

2.1.2 后墙表面温度和热流密度的量化表达 将夜间温室后墙表面各测点温度和热流密度的变化与时间的关系进行拟合,结果见表 1 和表 2。

表 1 晴天夜间温室后墙表面各测点温度变化与时间的函数关系

Table 1 Relationship between temperature variations at test points on back wall and time at sunny night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	导数方程 Derivative equation	测点 Test point	拟合函数 Fitting function	导数方程 Derivative equation
P_1	$y=0.011x^2-0.46x+17$	$y'=0.022x-0.46$	P_4	$y=0.024x^2-0.83x+19$	$y'=0.048x-0.83$
P_2	$y=0.024x^2-0.81x+19$	$y'=0.048x-0.81$	P_5	$y=0.024x^2-0.84x+18$	$y'=0.048x-0.84$
P_3	$y=0.028x^2-0.93x+20$	$y'=0.056x-0.93$			

注: y 代表温度, x 代表时间。表 3 同。
Note: In functions y on behalf of temperature, x on behalf of time. Table 3 is same.

由表 1 可以看出,夜间 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 变化率基本相同,均大于 T_1 的变化率,即 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处墙

体蓄热量变化基本相同,大于 P_1 处墙体蓄热量变化。

由表 2 可以看出,夜间 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 积分值差别很大, H_1 积分值小于 H_2 、 H_3 积分值,大于 H_4 、 H_5 积分值。结合图 3-B 可以看出, H_1 积分值小于 H_2 、 H_3 积分值是由于放热初期 H_1 与 H_2 、 H_3 差别较大,尽管整个夜间 H_1 不断变大, H_2 、 H_3

逐渐变小直到趋于稳定,但 H_1 积分值仍然小于 H_2 、 H_3 积分值; H_1 积分值大于 H_4 、 H_5 积分值是由于 H_1 增大趋势较快,很快就超过了 H_4 、 H_5 造成的。

表 2 晴天夜间温室后墙表面各测点热流密度积分值

Table 2 Integral values of heat flow density at test points on bank wall at sunny night					
测点 Test point	拟合函数 Fitting function	积分值 Integral value	测点 Test point	拟合函数 Fitting function	积分值 Integral value
P ₁	$y=-0.006x^2+1.1x+15$	285	P ₄	$y=0.066x^2-1.1x+25$	261
P ₂	$y=0.069x^2-1.3x+29$	297	P ₅	$y=0.045x^2-0.75x+17$	177
P ₃	$y=0.057x^2-1.1x+29$	309			

注: y 代表热流密度, x 代表时间。表 4 同。
Note:In functions, y is heat flow density and x is time. The same for Table 4.

根据能量守恒定律,后墙蓄热量变化与后墙放热量应该相等,但由以上分析可知,一方面 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙蓄热量变化基本相同,另一方面 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 积分值差别很大,说明 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙存在热量亏缺; P_1 处后墙蓄热量变化最小,但 H_1 积分值大于 H_4 、 H_5 积分值并且与 H_2 、 H_3 积分值基本相当,说明 P_1 处后墙存在热量盈余;结合后

墙实际情况,这可能是 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙热量向 P_1 处后墙流动造成的。图 3-A 中 T_1 变化率较低,也可能是由于 P_1 处后墙存在热量盈余引起的。

2.2 阴天夜间温室后墙表面温度和热流密度

2.2.1 后墙表面温度和热流密度 2016-01-16(阴天)夜间温室后墙表面各测点温度、热流密度的变化如图 4 所示。

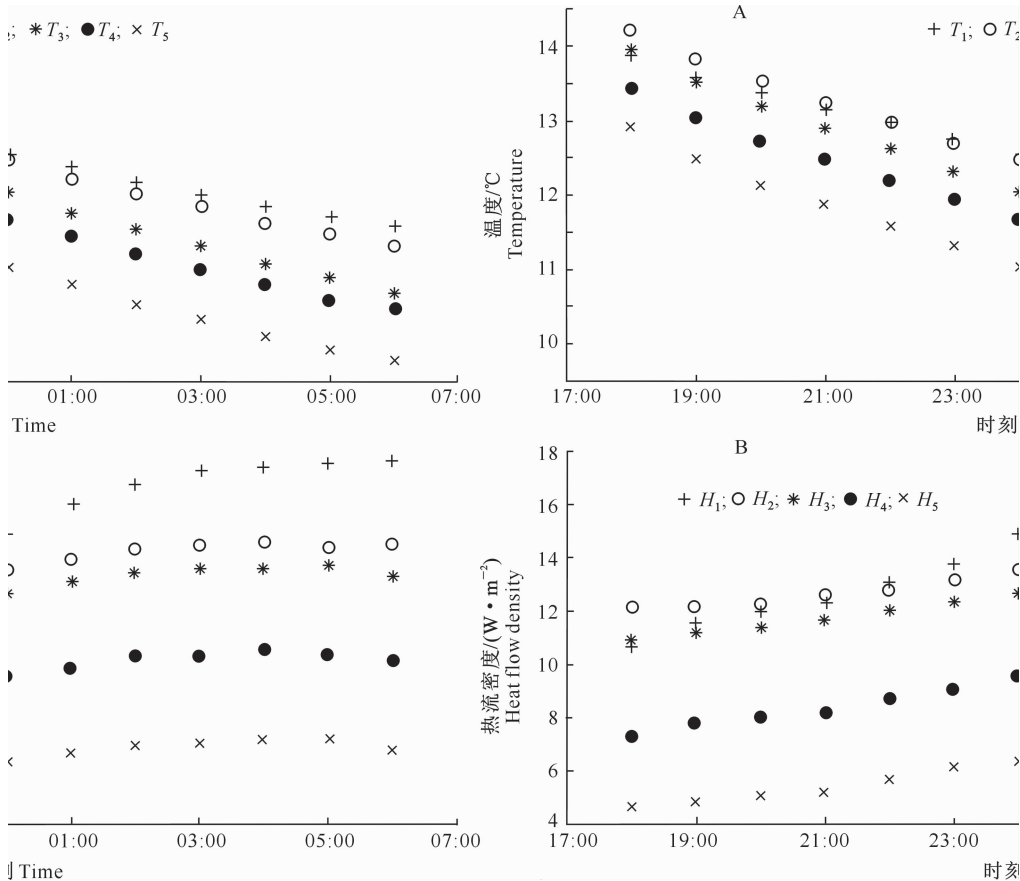


图 4 阴天夜间温室后墙表面各测点温度和热流密度的变化

Fig. 4 Temperature and heat flow density variations at test points on back wall of greenhouse at cloudy night
从图 4-A 可以看出,放热初期 T_1 小于 T_2 、 T_3 , 大于 T_4 、 T_5 ,这是由于阴天后墙接受到的辐射蓄热

较少造成的。夜间后墙表面各测点温度持续下降，也说明后墙放热过程属于非稳态导热过程，后墙释放热量后，温度降低。 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 的下降趋势基本相似，均大于 T_1 的下降趋势，这也是由于 P_1 与地面接近，受到地面温度的缓冲，因而降低较慢。

从图 4-B 可以看出，后墙不同高度放热量差别

表 3 阴天夜间温室后墙表面各测点温度变化与时间的函数关系

Table 3 Relationship between temperature variations at test points on back wall and time at cloudy night					
测点 Test point	拟合函数 Fitting function	导数方程 Derivative equation	测点 Test point	拟合函数 Fitting function	导数方程 Derivative equation
P ₁	$y=0.004\ 7x^2-0.26x+14$	$y'=0.009\ 4x-0.26$	P ₄	$y=0.007\ 1x^2-0.34x+14$	$y'=0.014\ 2x-0.34$
P ₂	$y=0.007\ 6x^2-0.35x+15$	$y'=0.015\ 2x-0.35$	P ₅	$y=0.008\ 0x^2-0.37x+13$	$y'=0.016\ 0x-0.37$
P ₃	$y=0.007\ 5x^2-0.37x+14$	$y'=0.015\ 0x-0.37$			

表 4 阴天夜间温室后墙表面各测点热流密度积分值

Table 4 Integral values of heat flow density at test points on bank wall at cloudy night					
测点 Test point	拟合函数 Fitting function	积分值 Integral value	测点 Test point	拟合函数 Fitting function	积分值 Integral value
P ₁	$y=-0.021x^2+0.93x+9.4$	185	P ₄	$y=-0.021x^2+0.58x+6.5$	118
P ₂	$y=-0.008x^2+0.36x+11$	167	P ₅	$y=-0.016x^2+0.45x+4$	78.3
P ₃	$y=-0.016x^2+0.47x+10$	158			

由表 3 可以看出，夜间 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 变化率基本相同，均大于 T_1 的变化率，说明 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处墙体蓄热量变化基本相同，且均大于 P_1 处墙体蓄热量变化。

由表 4 可以看出， H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 积分值差别很大，这可能是各测点高度不同造成的。

同样，根据能量守恒定律，后墙蓄热量变化与后墙放热量应该相等，但由以上分析可知，一方面 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙蓄热量变化基本相同，另一方面 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 积分值差别很大，说明 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙存在热量亏缺； P_1 处后墙蓄热量变化最小，但 H_1 积分值大于 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 积分值，说明

很大， H_1 在 22:00 超过 H_2 ，且有持续增大的趋势，这一方面是由于 T_1 较其他 4 个测点的温度降低缓慢，另一方面也说明后墙高度影响后墙的放热量。

2.2.2 后墙表面温度和热流密度的量化表达 将夜间温室后墙表面各测点温度和热流密度的变化与时间的关系进行拟合，结果见表 3 和表 4。

P_1 处后墙存在热量盈余；结合后墙实际情况，这可能也是 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处热量向 P_1 处流动造成的。图 4-A 中 T_1 变化率较低，也可能是由于 P_1 处后墙存在热量盈余引起的。

对比图 3-B 与图 4-B 可以看出，不同蓄热情况下，测点高度均会影响后墙放热量，后墙蓄热量多时后墙放热量也会变大；图 3-B 中 H_2 、 H_3 差别不大可能是受到后墙高度和后墙蓄热量综合作用造成的。

2.3 温室夜间后墙与地面的温度变化

为探明不同蓄热情况下夜间温室后墙与地面之间的热量流动，用 T_1 代表后墙温度， T_6 代表地面温度，探讨二者的关系，结果如图 5 所示。

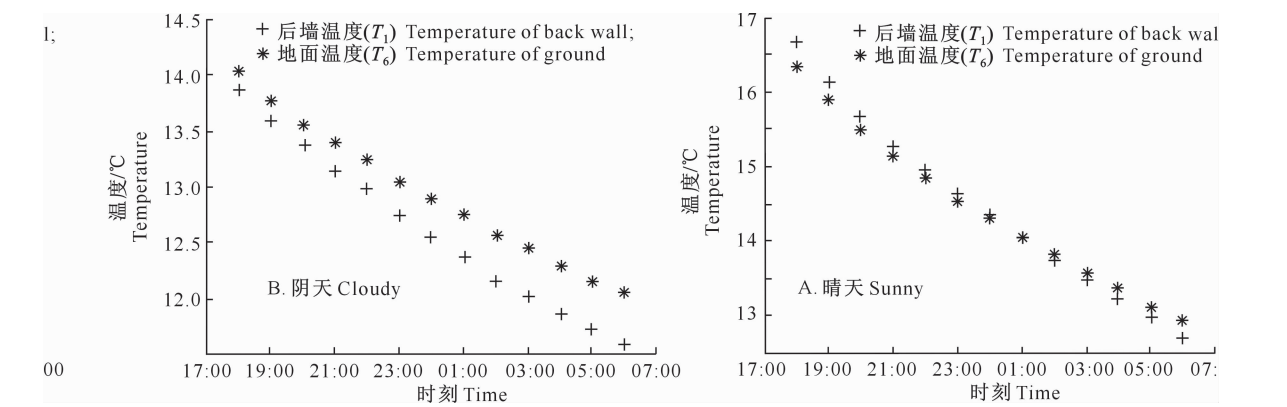


图 5 温室夜间后墙温度与地面温度的比较

Fig. 5 Comparison of temperature at the back wall and ground at night greenhouse

从图 5-A 可以看出，晴天夜间温室中，24:00 以前后墙温度高于地面温度，24:00 以后地面温度高

于后墙温度，这是由于晴天时白天后墙得到的辐射蓄热较多，墙体温度较高；随着后墙热量的释放，温

度降低,地面温度逐渐开始高于后墙温度。24:00 以前后墙热量向地面流动,24:00 以后地面热量向后墙流动。

从图 5-B 可以看出,阴天夜间温室地面温度高于后墙温度,这是由于阴天时白天后墙得到的辐射蓄热较少,后墙温度较低造成的。到了夜间地面热

量会向后墙流动。

2.4 温室夜间后墙热流密度的变化

将表 2、表 4 中不同测点的热流密度积分值与测点高度进行数据拟合,结果如图 6 所示。热流密度积分值高表明对应的热流密度也高。

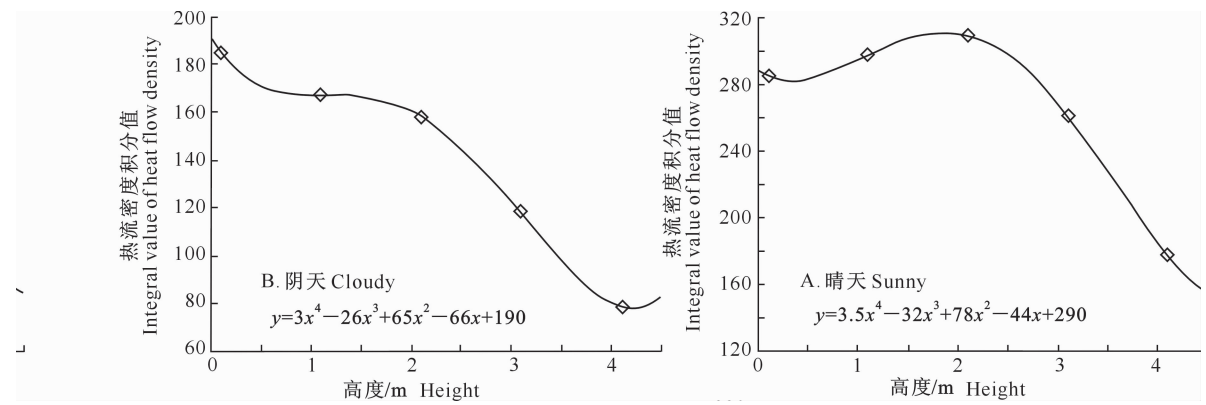


图 6 温室夜间后墙不同高度热流密度积分值的变化

Fig. 6 Variations of integral value of heat flow density at different heights of back wall in night greenhouse

对比图 6-A、图 6-B 可以看出,图 6-A 后墙中部热流密度较高是因为放热前期后墙中部热流密度较大,而热流密度较大是后墙中部温度较高所致,说明后墙中部温度影响后墙前期热流密度,且随后墙中部温度的降低其影响程度逐渐减小。考虑到日光温室后墙蓄热特点,后墙蓄热量多时后墙中部温度高,说明后墙蓄热量多时,则相应的热流密度也大,且主要在后墙放热前期热流密度较大。

不考虑后墙温度差别对热流密度的影响,从图 6-A 和图 6-B 可以看出,后墙高度是影响夜间后墙热流密度的主要因素,其影响贯穿整个放热过程。

2.5 温室夜间后墙内部流动热量的计算

2.5.1 晴天时后墙内部的热量流动

从表 1 可知,晴天时夜间 T_2 、 T_4 、 T_5 变化率相同; T_3 变化率较大,是由于后墙中部温度较高所致; T_1 变化率较小,是受到地面缓冲的影响。将表 2 中 H_2 、 H_4 、 H_5 用 MATLAB 进行数据拟合,建立假想数学模型^[27],结果如图 7 所示。此假想数学模型表示的是 P_1 、 P_3 处温度变化率与 T_2 、 T_4 、 T_5 变化率相同时各测点热流密度积分值曲线,与图 6-A 相比,该曲线各测点热流密度积分值没有受到后墙中部温度较高和地面缓冲的影响。通过对图 6-A 与图 7 的差别计算,可以量化后墙中部温度较高和地面缓冲影响的大小。

本研究以图 7 中没有受到后墙中部温度较高影响时 1.1~4.5 m 后墙最大热流密度积分值,作为

P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 处后墙蓄热量的变化数值,减去没有受到后墙中部温度较高影响时 1.1~4.5 m 后墙的放热量,计算出 1.1~4.5 m 后墙热量亏缺,也就是后墙内部的热量流动数量。

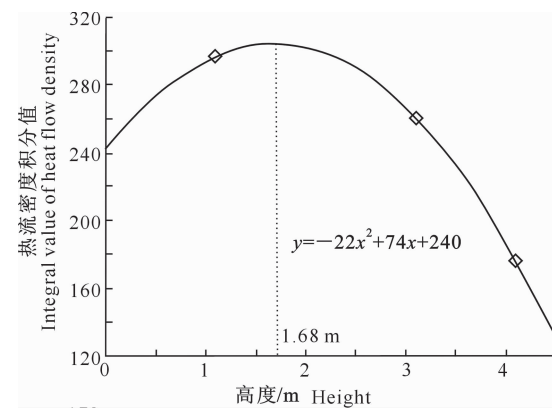


图 7 晴天夜间没有后墙中部高温影响时后墙不同高度的热流密度积分值

Fig. 7 Integral value of heat flow density at different heights of the back wall without the effect of high temperature of middle part of the back wall at sunny night

由图 7 的曲线拟合方程计算出后墙 1.68 m 处热流密度积分值最大,为 305 W/m²。后墙 1.1~4.5 m 蓄热量降低数量为:

$$\Phi_1 = 305 \times (4.5 - 1.1) = 1\,037\text{ W}.$$

由图 7 的曲线拟合方程计算出后墙 1.1~4.5 m 的放热量为:

$$\Phi_2 = \int_{1.1}^{4.5} (-22x^2 + 74x + 240) dx$$

$$\Phi_2 = 861 \text{ W}$$

1.1~4.5 m 后墙热量亏缺数量为:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 1\,037 - 861 = 176 \text{ W}$$

由图 5-A 可知,晴天时夜间地面与后墙之间温度差别不大,对于地面与后墙之间的热量流动本研究不予考虑,因此晴天时后墙 0~1.1 m 的热量盈余为 176 W。

由图 6-A 的曲线拟合方程计算出晴天时夜间后墙的放热量为:

$$\Phi_3 = \int_0^{4.5} (3.5x^4 - 32x^3 + 78x^2 - 44x + 290) dx$$

$$\Phi_3 = 1\,240 \text{ W}$$

晴天时夜间后墙内部热量流动数量占后墙放热总量的比值为 $176/1\,240 = 14.2\%$ 。

2.5.2 阴天时地面与后墙之间的热量流动 由图 6-B 可知,阴天时夜间后墙放热量与后墙中部温度关系不大,后墙放热量主要受到地面缓冲作用的影响。将表 4 中 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 用 MATLAB 进行数据拟合,建立假想数学模型,结果如图 8 所示。与图 6-B 相比,此假想数学模型表示没有受到地面缓冲时各测点热流密度积分值的曲线,通过对图 6-B 与图 8 的差别计算可以量化地面缓冲作用的大小。

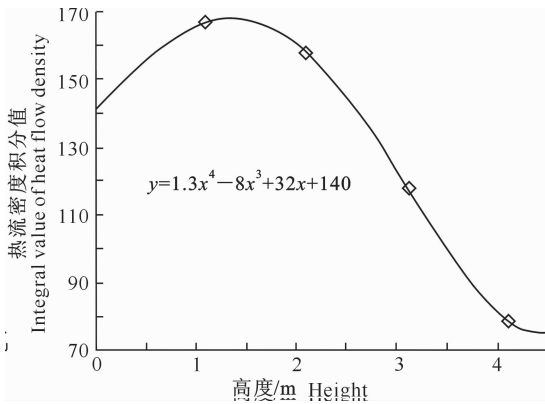


图 8 阴天夜间没有地面缓冲时温室后墙的放热量
Fig. 8 Integral value of heat flow density without buffer of the ground at cloudy night

由图 6-B 的曲线拟合方程可计算出,受地面缓冲作用影响后墙 0~1.1 m 的放热量为:

$$\Phi_1 = \int_0^{1.1} (3x^4 - 26x^3 + 65x^2 - 66x + 190) dx$$

$$\Phi_1 = 189 \text{ W}$$

由图 8 的曲线拟合方程可计算出,未受地面缓冲作用影响后墙 0~1.1 m 放热量为:

$$\Phi_2 = \int_0^{1.1} (1.3x^4 - 8x^3 + 32x + 140) dx$$

$$\Phi_2 = 171 \text{ W}$$

则地面向后墙热量流动数量为

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 189 - 171 = 18 \text{ W}$$

由图 6-B 的曲线拟合方程可计算出,阴天时夜间后墙的放热量为:

$$\Phi_3 = \int_0^{4.5} (3x^4 - 26x^3 + 65x^2 - 66x + 190) dx$$

$$\Phi_3 = 603 \text{ W}$$

阴天时夜间地面流入后墙热量占后墙总放热量的比例为 $18/603 = 3\%$ 。

2.5.3 阴天时后墙内部的热量流动 由图 6-B 的曲线拟合方程可计算出,后墙 1.1~4.5 m 中 1.1 m 处热流密度最大,为 167 W/m^2 ;阴天时后墙中部放热量受后墙中部温度影响较小,本研究以 1.1 m 处热流密度积分值为参照,计算后墙 1.1~4.5 m 的热量亏缺。后墙 1.1~4.5 m 蓄热量降低的数量为:

$$\Phi_1 = 167 \times (4.5 - 1.1) = 567.8 \text{ W}$$

后墙 1.1~4.5 m 放热量为:

$$\Phi_2 = \int_{1.1}^{4.5} (3x^4 - 26x^3 + 65x^2 - 66x + 190) dx$$

$$\Phi_2 = 414 \text{ W}$$

后墙 1.1~4.5 m 热量亏损数量为:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 567.8 - 414 = 153.8 \text{ W}$$

后墙 1.1~4.5 m 向 0~1.1 m 流动的热量占后墙放热总量的比例为 $153.8/603 = 25.5\%$ 。

3 讨论

晴天时夜间温室后墙放热量为 1 240 W,通过计算可知,后墙总放热量为 $2.232 \times 10^8 \text{ J}$,相当于 62 kW·h 电能的热量;阴天时夜间温室后墙放热量为 603 W,通过计算可知,后墙总放热量为 $1.0854 \times 10^8 \text{ J}$,相当于 30.15 kW·h 电能的热量。本试验温室面积为 465 m^2 ,与维持夜温需要的热量相比,后墙非稳态导热维持温室夜温的效率很高。我国日光温室蔬菜栽培面积达到 113 万 hm^2 ,后墙非稳态导热为园艺产业节省了大量能源。

夜间后墙向温室内部释放热量,后墙温度不断降低,由于后墙非稳态导热的放热特性,温室空气温度始终低于后墙温度,因此,后半夜到凌晨时分,温室作物容易受到低温障碍。当遭遇降雪、连阴雨等极端天气时,后墙白天蓄热量不足、温度较低,夜间温室内部气温会更低,温室作物便容易遭受冻害,使产量受到损失,这说明后墙非稳态导热无法抵御极

端天气的危害,通过后墙非稳态导热释放热量来维持温室夜温具有局限性,必须通过辅助措施加以解决。

后墙下部放热量多,后墙内部存在自上而下的热量流动,因此当后墙温度低、蓄热不足时,补充热量的合适位置应该在后墙下部。张传坤等^[28]研究提出,在后墙内部距离地面 0.5 m 高度处东西方向设置加温火道,利用煤气、天然气等高热值清洁能源为温室补充热量。

夜间后墙温度传播距离有限,热量流动的距离也是有限的,其距离不应该超过墙体蓄热层厚度,因此后墙热量自上而下流动的方式应该是整体迁移流动,且流动同时发生,但导致热量自上而下整体流动的原因有待于进一步研究。夜间日光温室后墙不同高度放热量差别很大,影响后墙放热量的作用机理也有待于进一步研究。

4 结 论

1)后墙不同高度是影响日光温室夜间后墙放热量的主要因素,影响后墙放热的整个过程;后墙放热量随后墙高度的降低而增加;后墙蓄热量高时,后墙中部总放热量也会很大,主要在放热前期。

2)夜间日光温室后墙热量存在自上而下的整体迁移流动,地面与后墙之间存在热量流动。

3)供试温室试验期间后墙热量迁移流动量占后墙总放热量的比例为 14.2%~25.5%。

4)供试温室试验期间地面向后墙流动的热量占后墙总放热量的 3%。

[参考文献]

- [1] 王 伟,张京社,王引斌.我国日光温室墙体结构及性能研究进展[J].山西农业科学,2015,43(4):496-498,504.
Wang W,Zhang J S,Wang Y B. The research progress on the structure and the properties of solar greenhouse walls in China [J]. Journal of Shanxi Agricultural Science, 2015, 43(4): 496-498, 504.
- [2] 梁建龙,王旭峰.阿拉尔垦区日光温室墙体的保温设计[J].塔里木农垦大学学报,2002,14(1):29-30.
Liang J L,Wang X F. Design of thermal insulation of greenhouse wall in Alar reclamation area [J]. Journal of Tarim University of Agricultural Reclamation, 2002, 14(1): 29-30.
- [3] 柴立龙,马承伟,籍秀红,等.北京地区日光温室节能材料使用现状 & 性能分析[J].农机化研究,2007(8):17-21.
Chai L L,Ma C W, Ji X H, et al. Present situation and the performance analysis of the energy-saving material in solar greenhouse of Beijing region [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(8): 17-21.
- [4] 樊平声,冯伟民,卢显宇,等.不同墙体日光温室保温性能研究[J].山东农业科学,2014,46(3):25-27.
Fan P S,Feng W M,Lu Y Y, et al. Effects of different walls on thermal insulation properties of solar greenhouse [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(3): 25-27.
- [5] 曲继松,张丽娟,冯海萍,等.宁夏干旱风沙区夯土砖土复合墙体日光温室保温性能初步研究[J].西北农业学报,2010,19(1):158-163.
Qu J S,Zhang L J,Feng H P, et al. A preliminary study on brick-clay compound wall heat preservation effect of solar greenhouse in Ningxia arid-sandstorm area [J]. Acta Agricultural Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 158-163.
- [6] 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.
Li X F,Chen Q Y. Effects of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of sunlight greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 185-189.
- [7] 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.
Tong G H,Bai Y K,Zhao R F, et al. Thermal property investigations for layered walls and earth walls in Chinese solar greenhouses [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(6): 718-722.
- [8] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室节能墙体的选择[J].可再生能源,2003(4):14-16.
Tong G H, Wang T L,Bai Y K, et al. Selection of energy efficiency wall in solar greenhouse [J]. Renewable Energy, 2003 (4): 14-16.
- [9] 卢志权,刘在民,于锡宏,等.不同凹式墙体对温室蓄热性能的影响[J].浙江大学学报,2013,40(3):344-361.
Lu Z Q,Liu Z M,Yu X H, et al. Effects of different concave type structure wall on thermal performance in the greenhouse [J]. Journal of Zhejiang University, 2013, 40(3): 344-361.
- [10] 温祥珍,梁海燕,李亚灵,等.墙体高度对日光温室夜间气温的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(5):980-983.
Wen X Z,Liang H Y,Li Y L, et al. Effect of wall height on air temperature of greenhouse during night [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 980-983.
- [11] 李 凯,宋 丹,王宏丽,等.日光温室瓶胆式相变墙体热性能研究[J].北方园艺,2013(5):40-42.
Li K,Song D,Wang H L, et al. Thermal performance analysis of the cavity wall with PCM of solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2013(5): 40-42.
- [12] 管 勇,陈 超,凌浩恕,等.日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J].农业工程学报,2013,29(21):166-173.
Guan Y,Chen C,Ling H S, et al. Analysis of heat transfer properties of three-layer wall with phase-change heat storage in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 166-173.
- [13] 管 勇,陈 超,李 琢,等.相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J].农业工程学报,2012,28(10):194-201.
Guan Y,Chen C,Li Z, et al. Improving thermal environment

- in solar greenhouse with phase-change thermal storage wall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 194-201.
- [14] 王宏丽, 李晓野, 邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 253-257.
Wang H L, Li X Y, Zou Z R. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 253-257.
- [15] 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.
Yang R Q, Ma C W, Liu S L, et al. The imitation analysis of heat preservation and capability of the wall of solar greenhouse [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 26(5): 449-453.
- [16] 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 C W, Lu H, Li R, 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, 2010, 26(6): 231-237.
- [17] 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.
Tong G H, Li B M, Christopher D M, et al. Preliminary study on temperature pattern in China solar greenhouse using computational fluid dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 178-185.
- [18] 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.
Tong G H, Christopher D M. Simulation of temperature variations for various wall materials in Chinese solar greenhouse using computational fluid dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 153-157.
- [19] 方慧, 杨其长, 张义. 基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热装置试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 210-216.
Fang H, Yang Q C, Zhang Y. Experimental study on shallow soil assisted heat release-storage system with water-water heat pump in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 210-216.
- [20] 张靖周, 常海萍. 传热学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Zhang J Z, Chang H P. Heat transmission science [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [21] 梁世彬, 方曜奇, 刘润杰, 等. 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, 17(S): 143-146.
Liang S B, Fang Y Q, Liu R J, et al. 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(S): 143-146.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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): 29-33.
Han X L. Calculation of temperature distribution and heat storage during unsteady heat conduction of kiln masonry [J]. Pottery and Porcelain, 2002(6): 29-33.
- [25] 胡智敏, 曾令可, 吴建青, 等. 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, et al. 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.
- [26] 张鸿雁, 张志政, 王元, 等. 流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhang H Y, Zhang Z Z, Wang Y, et al. Hydrodynamics [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [27] 瞿亮, 凌民, 傅昱, 等. 基于 MATLAB 的控制系统计算机仿真 [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, et al. Computer simulation of control system based on matlab [M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2006.
- [28] 张传坤, 郭洪恩, 魏珉, 等. 日光温室加温辅助墙体: 中国, ZL201520365642. 1 [P]. 2015-09-23.
Zhang C K, Guo H E, Wei M, et al. Auxiliary heating wall for solar greenhouse: China, ZL201520365642. 1 [P]. 2015-09-23.