

日光温室夜间后墙不同高度放热量差异的理论分析

张传坤¹ 魏珉² 刘福胜³ 徐平丽^{4*} 李岩²

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 针对日光温室夜间后墙不同高度放热量差别较大的现象,运用物理学矢量原理、气体分子动理论,对外界低温通过覆盖面在后墙形成的放热机理进行推导,结合放热机理和后墙不同高度温度差别对后墙不同高度放热量差别的影响进行研究。结果表明:1)外界低温驱动力水平分量大小随后墙高度降低不断增大,外界低温驱动力水平分量密度随后墙高度降低不断减小,后墙放热驱动是外界低温驱动力水平分量大小和密度乘积的函数,随后墙高度降低不断增大。2)后墙放热后温度不断下降,后墙放热量自上而下逐渐增多,下侧放热量是上侧放热量的2~3倍。3)推导出的后墙放热机理能够解释后墙不同高度放热量差异,后墙不同高度放热量差异主要是由于外界低温通过覆盖面在后墙产生的放热驱动不同造成的;后墙放热是外界低温驱动下的被动放热。4)后墙温度较高时,后墙放热量受后墙温度和后墙放热驱动共同作用,此时后墙中部放热量也会较多;后墙温度较低时,后墙放热量主要受后墙放热驱动作用。

关键词 日光温室; 后墙; 放热机理; 驱动力; 放热驱动; 被动放热

中图分类号 S625.1 **文章编号** 1007-4333(2019)07-0112-10 **文献标志码** A

Theoretical analysis on the heat-releasing volume differences of back walls at different heights in solar greenhouse at night

ZHANG Chuankun¹, WEI Min², LIU Fusheng³, XU Pingli^{4*}, LI Yan²

1. Vegetable Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 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. Bio-Tech Research Center, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract Aiming at the phenomenon that the heat-releasing volume of back wall at different heights in solar greenhouse are quite different, this study first deduce the heat-releasing mechanism of the back wall formed by the outer low temperature through greenhouse cover by using physics vector principle and the gas molecular movement theory as foundation and then carry out the research on heat-releasing difference of different heights of the back wall in combination with the heat-releasing mechanism and the differences of the temperature of back walls at different heights. The results show that the horizontal component of the external low-temperature driving force increases and the density of the horizontal component of the external low-temperature driving force in the back wall decreases with the decreasing of the back wall height. The heat-releasing drive formed by the outer low-temperature is the function of the product of

收稿日期: 2018-07-31

基金项目: 国家大宗蔬菜产业技术体系建设专项(CARS-23-04);“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

driving force with the driving force density, and it increases with the height of the back wall decreasing. The temperature of the back wall decreases continuously after releasing heat. The heat-releasing volume from the back wall increases gradually from the top to the bottom, and the heat-releasing volume from the bottom side are 2–3 times higher than that from the top side. The deduced exothermic mechanism can explain the heat-releasing difference of different height back walls, and the heat release of the back wall is a passive heat-releasing process driven by the external low temperature. The difference of heat-releasing volume is mainly due to heat-releasing drive caused by external low temperature. The heat-releasing volume is affected by the heat-releasing drive and the temperature of the back wall when the temperature of the back wall is high and the heat-releasing volume in the middle of the back is also high; The heat-releasing volume of the back wall is mainly driven by the heat-releasing drive of the back wall when the temperature of the back wall is low.

Keywords solar greenhouse; back wall; heat-releasing mechanism; driving force; heat-releasing drive; passive heat release

日光温室后墙具有蓄热、保温功能,白天蓄积太阳辐射热量,夜间释放到温室内部,维持温室作物夜间需要的温度环境^[1-7]。白天温室内部温度较高,容易满足作物生长需要;夜间温室内部温度较低,尤其是遇到寒潮、连续阴天等不利天气情况时作物易产生冻害^[8]。后墙放热对夜间温室温度环境的形成具有重要作用。

已有研究对后墙放热进行了测试和分析,对墙体进行分层,根据各层温度变化结合墙体导热系数计算出晴天夜间累计放热量为 1 865 kJ/m²,雪天夜间累计放热量为 869 kJ/m²^[9];在后墙表面设置热通量板,输出 15 min 热量积累值,然后对积累值相加,计算出晴天夜间放热量为 1.90 MJ/m²、阴天夜间放热量为 0.76 MJ/m²^[10];根据后墙表面温度与温室空气温度之差,结合后墙表面换热系数,计算出晴天夜间累计放热量为 1.06 MJ/m²、阴天夜间累计放热量为 0.35 MJ/m²^[11]。以上研究测试温室所处维度不同,计算方法不同,得到的结果也不相同。后墙蓄热、放热随日出日落周期性变化^[12],属于非稳态导热^[2,13],蓄放热量受外界环境条件制约,在后墙安装主动蓄放热装置^[14-16],主动蓄积温室内部太阳辐射热量,夜间把热量缓慢释放到温室内部,能够提高温室夜间温度。研究发现后墙夜间放热量并不均衡,不同高度放热量差别较大^[17],这种差别不是单纯由于后墙表面温度差别造成的,考虑到夜间温室外温度较低,外界低温应该是造成这种差别的主要原因,但对外界低温影响后墙放热机理进行系统研究的较少。

本研究拟以物理学矢量原理、气体分子动理论为理论基础,对外界低温通过覆盖面在后墙形成的放热机理进行推导,结合后墙表面温度、后墙放热驱

动 2 方面因素对后墙不同高度放热量差别进行分析,以期完善后墙放热理论提供理论依据。

1 材料与方法

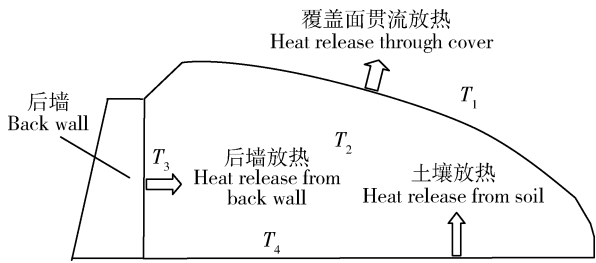
1.1 试验温室

试验在山东省泰安市(36°11′07″N,117°06′51″E)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,保温被为生产上通常使用的保温被,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 日光温室夜间覆盖面贯流放热分析

1.2.1 覆盖面贯流放热

覆盖面贯流放热^[18]过程起始于温室外温度(T_1)的降低,夜间 T_1 低于温室空气温度(T_2),温室热量通过覆盖面向外界散失;温室内热量向外界散失后, T_2 降低, T_2 小于后墙表面温度(T_3)、地面温度(T_4),温室空气通过对流换热^[13]与后墙表面、地面进行热量交换;后墙表面、地面与温室空气热量交换后 T_3 、 T_4 降低,后墙、土壤热量向后墙表面、地面流动,然后释放到温室内部;由此可见,后墙、土壤放热是在外界低温作用下的被动放热。 T_1 越低,通过覆盖面散失的热量越多, T_2 越低,温室空气与后墙表面、地面的对流换热温差越大,后墙、土壤放热量越多,因此 T_1 大小影响后墙、土壤放热量数量。覆盖面贯流放热示意图 1。整个夜间, T_2 降低缓慢,考虑到空气比热容较低,温室空气热量变化有限,温室放热是外界低温作用下的后墙、土壤放热,温室空气的作用仅仅是作为传热中介。



T_1 为温室外温度, T_2 为温室空气温度, T_3 为后墙表面温度, T_4 为地面温度。

T_1 is temperature outside greenhouse. T_2 is air temperature of greenhouse. T_3 is temperature of surface of back wall. T_4 is temperature of ground.

图1 夜间日光温室覆盖面贯流放热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat release through cover in solar greenhouse at night

1.2.2 贯流放热过程中的驱动力

夜间日光温室保温被两侧温差较大,在保温被内部形成温度梯度^[19]。温度梯度是指保温被两侧温差与保温被厚度的比值,温度梯度方向垂直于保温被覆盖面,因此温度梯度是矢量,遵守矢量正交分解法则,温室内部热量在温度梯度作用下由覆盖面内侧向覆盖面外侧流动。

徐丰等^[20]在侧加热腔内的自然对流中对于密度差引起的空气流动使用驱动力来表示,考虑到空气流动和热量流动同属物理学范畴,且土壤放热、后墙放热均为被动放热,为便于理解覆盖面贯流放热,本研究引入驱动力概念,对外界低温影响覆盖面贯流放热作用的大小用驱动力表示。驱动力的意义为温室相同蓄热条件下,外界温度越低,驱动力越大,温室贯流放热量越多。

1.2.3 温室空气在贯流放热中的作用

1) 根据物理学气体分子动理论^[21],温度是气体分子平均平动动能的唯一量度,表示为:

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常量; T 为温度, K; \bar{v} 为空气分子平均速度, m/s。

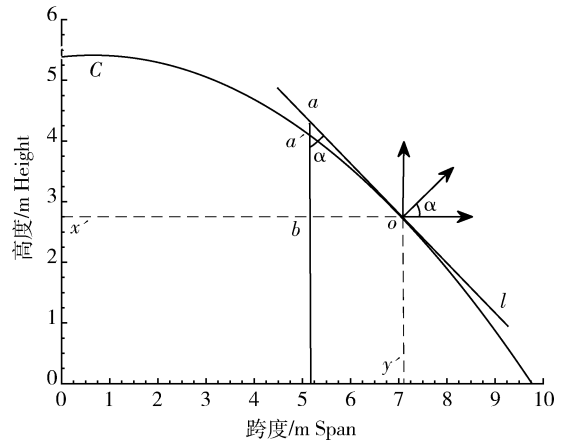
2) 根据气体分子能量按自由度均分定理^[21],温室空气分子平均平动动能按自由度均分,表示为:

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{1}{2}m\bar{v}_x^2 + \frac{1}{2}m\bar{v}_y^2 + \frac{1}{2}m\bar{v}_z^2 \quad (2)$$

式中: \bar{v}_x 、 \bar{v}_y 、 \bar{v}_z 分别为空气分子在 3 个自由度方向上的平均平动速度, m/s。

由式(1)和(2)可知,气体温度不仅可以用气体分子平均平动动能来表示,而且可以按自由度分解为 x 、 y 、 z 3 个方向的平均平动动能;当空气分子处于平衡状态时,3 个方向的平均平动动能相等。

夜间温室外低温驱动力透过保温被内部温度梯度在保温被内侧对温室气体产生放热驱动力,温室气体温度降低,气体分子平均平动动能减小。将驱动力(F)进行正交分解,分解为水平驱动力(F_x)和垂直驱动力(F_y), F_x 打破气体分子水平方向上的平衡状态,使得水平方向上的平均平动动能减小;空气分子之间能量传递和交换依靠分子之间碰撞,通过分子之间碰撞 F_x 作用传递到后墙,驱动后墙放热。外界低温驱动力的正交分解见图 2。本研究只涉及后墙放热,故只对 F_x 展开研究,对于 F_y 不做进一步研究。本研究没有对保温被内部温度梯度进行研究。



C 为试验温室垂直于后墙的截面与覆盖面形成的曲线, o 为覆盖面上任意点, l 为 o 点处覆盖面的切线, $aa'b$ 为跨度的垂线, F 为保温被内部温度梯度对温室气体分子产生的驱动力, F_x 为 F 在水平方向上的分量, F_y 为 F 在垂直方向上的分量, x' 为 F_x 在后墙上的驱动点, y' 为 F_y 在地面上的驱动点, α 为 F 与 F_x 的夹角。

C is the curve formed between the cross section perpendicular to the back wall and the cover of experimental greenhouse. o is at any point in the coverage. l is the tangent of the cover at o point. $aa'b$ is perpendicular to span. F is the driving force of thermal insulation internal temperature gradient on the production of greenhouse gas molecules. F_x is horizontal component of F . F_y is vertical component of F . x' is the driving point of F_x on the back wall. y' is the driving point of F_y on the ground. α is the angle between F and F_x .

图2 日光温室外界低温驱动力的正交分解

Fig. 2 Orthogonal decomposition of external driving forces in solar greenhouse

1.2.4 水平驱动力的函数表达

水平驱动力为驱动力的水平分量,两者之间存在三角函数关系:

$$F_x = F \cos \alpha \quad (3)$$

式(3)中 α 随 F 在覆盖面上的南移逐渐变小(图 2), $\cos \alpha$ 在 $[0 \sim 90^\circ]$ 内是减函数,随着 F 在覆盖面上的南移, F_x 对应的后墙高度不断降低且 F_x 不断变大。 α 大小由该点在覆盖面所处位置决定,本研究覆盖面曲线 Matlab 拟合函数中 x 为跨度, y 为高度(图 2)。对拟合函数求导,可以得到覆盖面切线 l 的导数方程:

$$y = -0.13x + 0.085 \quad (4)$$

l 与 F 方向垂直,由式(4)可知,驱动力 F 方向的导数方程为:

$$y = \frac{1}{0.13x - 0.085} \quad (5)$$

F 方向的斜率为 $\text{tg}\alpha$,结合式(5)可以得到 α 随 x 变化的函数:

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right) \quad (6)$$

由式(3)和式(6)可知:

$$F_x = F \cos \alpha = F \cos\left(\text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right)\right) \quad (7)$$

1.2.5 水平驱动力密度的函数表达

驱动力在覆盖面上均匀分布,单位覆盖面长度上驱动力密度相等,但单位后墙高度对应覆盖面长度不同, $L_5 > L_4 > L_3 > L_2 > L_1$ (图 3),水平驱动力在后墙不同高度的密度是不同的。

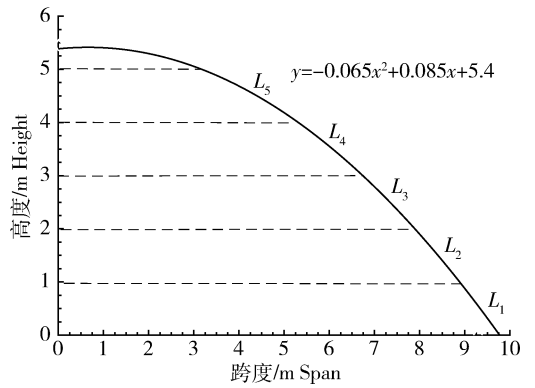
覆盖面 oa' 对应的后墙高度为 $a'b$ (图 2), $\frac{oa'}{a'b}$ 为水平驱动力密度,在 o 点处对 $\frac{oa'}{a'b}$ 取极限,可以得到水平驱动力密度变化率:

$$\lim_{b \rightarrow 0} \frac{oa'}{a'b} = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{oa}{ab} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (8)$$

水平驱动力密度变化率在 $[0 \sim 90^\circ]$ 内是增函数,随着 o 点在覆盖面上的南移,水平驱动力对应后墙高度不断降低, α 不断变小,水平驱动力密度变化率不断变小。对式(8)积分,可以得到水平驱动力密度随 x 变化的函数:

$$y = \int \frac{1}{\cos \alpha} dx \quad (9)$$

L_5 对应的后墙高度一部分是温室后坡(图 3),



L_1, L_2, \dots, L_5 分别为后墙高度 0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 m 对应的覆盖面长度。

L_1, L_2, \dots, L_5 are lengths of cover corresponding to the height of the back wall of 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 meter, respectively.

图 3 日光温室单位后墙高度对应的覆盖面长度

Fig. 3 Length of cover corresponding to the height of back wall in solar greenhouse

考虑到后坡不是蓄热体,不对后坡进行研究。为了更直观描述驱动力水平分量和水平分量密度,本研究中后墙高度由温室脊高代替(图 2 和图 3)。

1.2.6 后墙放热驱动

F_x 作用传递到后墙并对后墙产生放热驱动 (D),根据物理学类比原理^[13], D 的大小由水平驱动力大小和水平驱动力密度的乘积决定,由式(7)和(9)可知:

$$D = F \cos(\alpha) \times \int \frac{1}{\cos \alpha} dx = F \cos\left(\text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right)\right) \cdot \int \left(\cos\left(\text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right)\right)\right)^{-1} dx \quad (10)$$

温室覆盖面两侧温差相同,外界低温透过覆盖面在温室内部对温室空气形成的放热驱动力 F 相同,将式(10)中 F 省略,不同高度后墙放热驱动比例的微分方程为:

$$y = \cos\left(\text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right)\right) \cdot \int \left(\cos\left(\text{arctg}\left(\frac{1}{0.13x - 0.085}\right)\right)\right)^{-1} dx \quad (11)$$

用 Matlab 求解微分方程(11)并进行数据拟合,具体见图 4。随着 F 在覆盖面上的南移, o 点对应 x 不断增大, F_x 对应的后墙高度不断降低(图 2),因此随着 x 增大,后墙放热驱动比例随后墙高度降低不断增大。

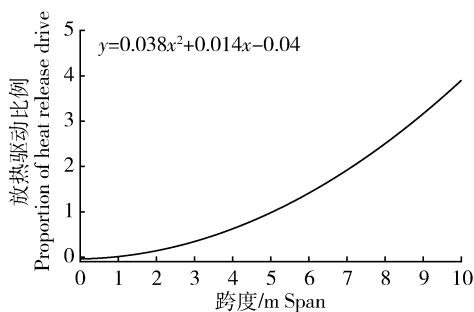
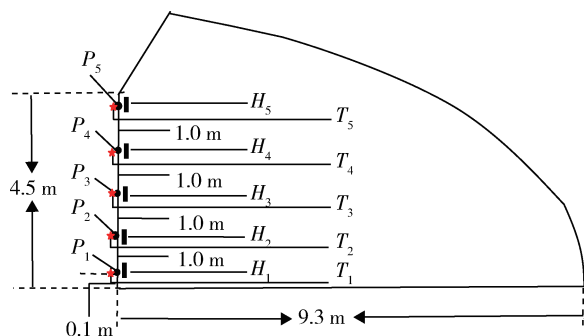


图4 日光温室夜间后墙放热驱动比例的变化

Fig. 4 Variations of the proportion of heat release driving on the back wall at night solar greenhouse

1.3 试验设计

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和热流板,温度传感器和热流板紧贴后墙表面,具体设置如图 5 所示。温度传感器测定的温度分别用 $T_1 \sim T_5$ 表示,热流板测定的热流密度分别用 $H_1 \sim H_5$ 表示。



$P_1 \sim P_5$ 为测点,★为温度传感器,■为热流板。

$T_1 \sim T_5$ 为各测点温度, $H_1 \sim H_5$ 为各测点热流密度。

$P_1 \sim P_5$ are test points,★ are temperature sensors,■ are heat flow plates.

$T_1 \sim T_5$ are temperature of test points, $H_1 \sim H_5$ are heat flow density of test points.

图5 温室结构和测点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test points of solar greenhouse

1) 本研究根据测点温度变化趋势来定性测点温度降低速率,用测定的热流密度值来定量后墙放热量,结合后墙不同高度温度差异与放热驱动差异,对后墙不同高度放热量差异进行分析。

2) 选取试验期间某一温度为示例温度,计算各测点到达示例温度时的时刻,计算该时刻各测点放热量,然后对各测点放热量进行对比。

3) 本研究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: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:热流范围 $0 \sim 2000 \text{ W/m}^2$,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 日凌晨 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;以 13 个平均温度的均值为该天夜间温度。

试验期间温室外温度差别很大,本试验选用最高夜温 ($2.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 2015-12-23) 和最低夜温 ($-13.94 \text{ }^\circ\text{C}$, 2016-01-23) 后墙温度和放热数据进行分析。

1.4 数据分析

用 Matlab 软件处理数据;用 Matlab 软件对测点温度随时间的变化进行数据拟合;用 Matlab 软件对热流密度随时间的变化进行数据拟合,并对拟合函数进行积分运算;结合温度变化拟合函数和热流密度变化拟合函数,对不同测点在示例温度时的放热量进行计算;用 Matlab 软件对测点热流密度积分值与高度之间的关系进行数据拟合,然后求解拟合函数原函数,计算后墙放热量。

2 结果与分析

2.1 夜温较高时后墙表面温度和热流密度

2.1.1 夜温较高时后墙表面温度和热流密度随时间的变化

2015-12-23 夜间后墙表面各测点温度、热流密度变化如图 6 所示。

1) 后墙释放热量后各测点温度逐渐降低(图 6(a));放热初期 $T_2 > T_3 > T_1 > T_4 > T_5$,放热期间 T_1 下降速率小于 $T_2 \sim T_5$ 下降速率,23:00 以后 $T_1 > T_3$,4:00 以后 $T_1 > T_2$,然后 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$ 。

2) 夜间各测点放热量差别很大(图 6(b)),放热初期 H_1 小于 H_2, H_3 ,大于 H_4, H_5 ,22:00 以后 H_1 大于 H_2, H_3 ,整个夜间 $H_2 > H_3 > H_4 > H_5$ 。

3) 放热初期 H_1 小于 H_2, H_3 ,是由于放热初期 T_1 小于 T_2, T_3 的原因;22:00—23:00 尽管 $T_1 < T_3$,但 H_1 已经大于 H_3 ,这是由于 P_1 点受到的放热驱动大于 P_3 点受到的放热驱动造成的;4:00 之前尽管 T_1 一直小于 T_2 ,但 H_1 从 22:00 之后就开始大于 H_2 ,这也是由于 P_1 点受到的放热驱动大于 P_2

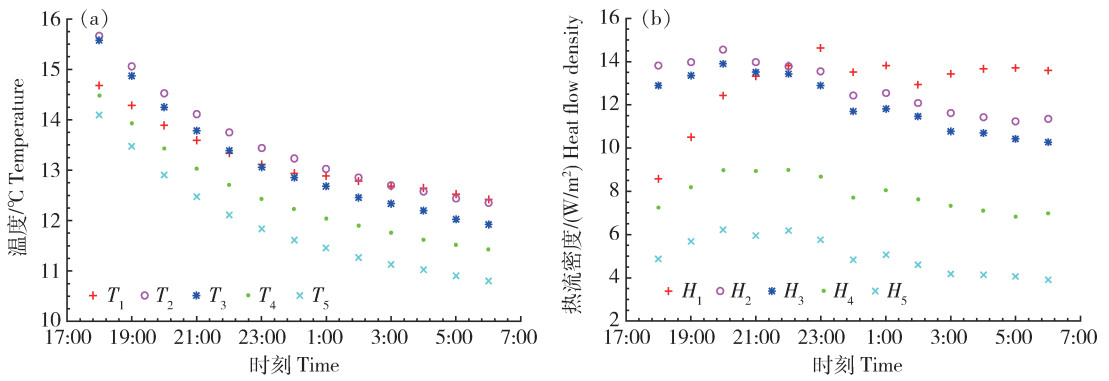


图 6 夜温较高时后墙表面各测点温度(a)和热流密度(b)的变化

Fig. 6 Temperature and heat flow density variations of the test points on the back wall of greenhouse at high temperature night

点受到的放热驱动造成的。整个夜间 $H_2 > H_3 > H_4 > H_5$ ，一方面是由于 $T_2 > T_3 > T_4 > T_5$ ，另一方面是由于 $P_2 \sim P_5$ 点受到的放热驱动逐渐减小造成的。

4) 尽管各测点温度随时间持续降低, 但各测点放热量随时间并不是逐渐降低(图 6(a)和图 6(b)), 说明测点温度对测点放热量影响不大, 进而说明各测点放热量差别较大的原因主要是由于各测点受到的放热驱动不同造成的(图 6(b))。

2.1.2 相同温度条件下各测点热流密度的计算

将 2015-12-23 夜间各测点温度、热流密度随时间的变化用 Matlab 软件进行数据拟合, 结果见表 1 和表 2。

根据各测点温度随时间变化的拟合方程(表 1)

表 1 夜温较高时各测点温度随时间变化的函数关系

Table 1 The functional relationship between temperature of test points and time at high temperature night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals
P_1	$y=0.016x^2-0.4x+15$	0.23
P_2	$y=0.022x^2-0.56x+16$	0.24
P_3	$y=0.025x^2-0.63x+16$	0.23
P_4	$y=0.020x^2-0.52x+15$	0.23
P_5	$y=0.023x^2-0.58x+15$	0.28

注:拟合函数中 y 代表温度, x 代表时间。表 3 同。

Note: In functions, y denotes temperature, x denotes time. Table 3 is same.

可以计算出温度为 $13.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $P_1 \sim P_5$ 各测点对应的时刻分别为: 21:42、23:00、22:06、21:00、19:00。把各测点温度为 $13.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时的时刻代入各测点热流密度随时间变化的拟合方程(表 2), 计算出此时 $H_1 \sim H_5$ 分别为: 13.7、13.3、13.2、8.86、5.75 W/m^2 , 可以看出各测点温度相同时测点热流密度自上到下逐渐增大, 这种差别是由于各测点放热驱动自上到下逐渐增大造成的。

表 2 夜温较高时各测点热流密度随时间变化的函数关系

Table 2 The functional relationship between heat flow density of test points and time at high temperature night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals
P_1	$y=-0.00086x^4+0.04x^3-0.64x^2+4.1x+4.9$	1.11
P_2	$y=-0.0004x^4+0.019x^3-0.27x^2+1.1x+13$	0.64
P_3	$y=-0.00094x^4+0.035x^3-0.45x^2+1.8x+11$	0.69
P_4	$y=-0.0009x^4+0.035x^3-0.47x^2+2.3x+5.4$	0.63
P_5	$y=-0.00085x^4+0.033x^3-0.43x^2+2x+3.3$	0.59

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 denotes heat flow density, x denotes time. Table 4 is same.

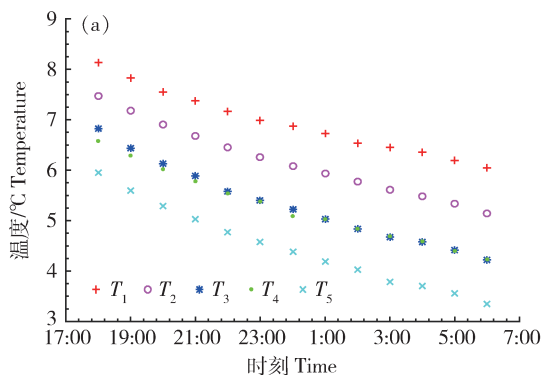
2.2 夜温较低时后墙表面温度和热流密度

2.2.1 夜温较低时后墙表面温度和热流密度随时间的变化

2016-01-23 夜间后墙表面各测点温度、热流密度变化见图 7。

1) 后墙放热后各测点温度逐渐降低(图 7(a)), 整个夜间各测点温度 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$ 。

2) 整个夜间 $H_1 > H_2 > H_3 > H_4 > H_5$ (图 7(b)),



原因是一方面 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$, 另一方面 $P_1 \sim P_5$ 各测点受到的放热驱动逐渐减小造成的。

3) 尽管各测点温度随时间持续降低, 但各测点放热量随时间并不是逐渐降低, 甚至有增大的趋势(图 7(a)和图 7(b)), 说明测点温度对测点放热量影响不大, 进而说明各测点放热量差别较大的原因主要是由于各测点受到的放热驱动不同造成的(图 7(b))。

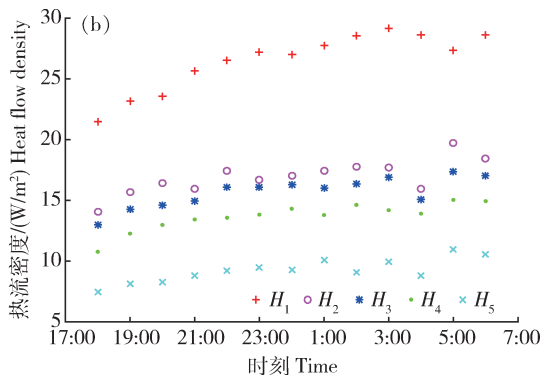


图 7 夜温较低时后墙表面各测点温度(a)和热流密度(b)的变化

Fig. 7 Temperature and heat flow density variations of the test points on the back wall of greenhouse at low temperature night

2.2.2 相同温度条件下各测点热流密度的计算

把 2016-01-23 夜间各测点温度、热流密度随时间的变化用 Matlab 软件进行数据拟合, 结果见表 3 和表 4。根据各测点温度随时间变化的拟合方程(表 3)可以计算出, 当温度为 $6\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $P_1 \sim P_5$ 各测点对应的时刻分别为: 7:42、0:30、20:36、20:09、17:39。

$H_1 \sim H_5$ 分别为: 28.2、17.1、15.1、13、7.36 W/m^2 , 可以看出各测点温度相同时测点热流密度自上到下逐渐增大, 这种差别也是由于各测点放热驱动自上到下逐渐增大造成的。

表 3 夜温较低时各测点温度随时间变化的函数关系
Table 3 The functional relationship between temperature of test points and time at low temperature night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals
P_1	$y=0.006\ 8x^2-0.26x+8.3$	0.15
P_2	$y=0.006\ 3x^2-0.27x+7.7$	0.10
P_3	$y=0.009\ 1x^2-0.33x+7.1$	0.15
P_4	$y=0.006\ 9x^2-0.29x+6.8$	0.14
P_5	$y=0.007\ 8x^2-0.32x+6.2$	0.13

表 4 夜温较低时各测点热流密度随时间变化的函数关系
Table 4 The functional relationship between heat flow density of test points and time at low temperature night

测点 Test point	拟合函数 Fitting function	残差模 Norm of residuals
P_1	$y=0.000\ 39x^4-0.009\ 8x^3-0.000\ 87x^2+1.4x+20$	1.70
P_2	$y=-0.000\ 37x^4+0.02x^3-0.31x^2+2x+13$	2.68
P_3	$y=0.000\ 83x^4-0.016x^3+0.036x^2+0.83x+12$	1.75
P_4	$y=-0.000\ 43x^4+0.02x^3-0.31x^2+2x+9.1$	0.95
P_5	$y=0.000\ 93x^4-0.02x^3+0.11x^2+0.25x+7.2$	1.54

把各测点温度为 $6\text{ }^\circ\text{C}$ 时的时刻代入各测点热流密度随时间变化的拟合方程(表 4), 计算出此时

2.3 后墙白天蓄热差异对测点夜间温度降低的影响

1)2015-12-23 夜间后墙温度高是由于白天后墙蓄热量多造成的(图 6(a))。白天后墙蓄热量多,后墙温度高于土壤温度,后墙热量向土壤流动, P_1 点紧靠地面,受到的影响最大,使得 T_1 升高缓慢, T_1 小于 T_2 、 T_3 ;夜间后墙放热后,后墙温度降低,土壤温度对 P_1 点温度变化起缓冲作用^[17],导致 T_1 下降速率小于 $T_2 \sim T_5$ 下降速率。 $P_2 \sim P_5$ 测点没有受到土壤缓冲, $T_2 \sim T_5$ 下降速率基本一致。

2)2016-01-23 夜间后墙温度低是由于白天后墙蓄热量少造成的(图 7(a))。白天后墙蓄热量少,后墙温度普遍较低,后墙与土壤之间热量流动有限,夜间土壤对 P_1 点温度变化缓冲作用也有限,因此夜间 $T_1 \sim T_5$ 下降速率基本一致。

2.4 后墙放热量的计算

用 Matlab 软件对 2015-12-23 和 2016-01-23 夜间热流密度随时间变化的拟合函数(表 2 和表 4)进

行积分运算,结果见表 5;热流密度积分值随后墙高度的变化见图 8。夜温差别较大时后墙放热量差别较大,后墙不同高度放热量也有较大差别,后墙下侧放热量是后墙上侧放热量的 2~3 倍(表 5)。

表 5 夜温较高或夜温较低时各测点热流密度积分值
Table 5 The integral value of test points at low and high temperature night W

测点 Test point	较高夜温 High temperature night	较低夜温 Low temperature night
P_1	177	330
P_2	177	232
P_3	161	186
P_4	118	178
P_5	84	106

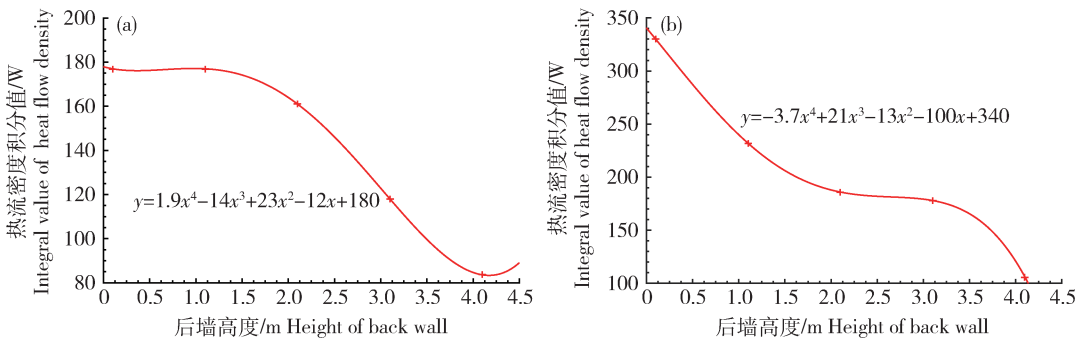


图 8 夜温较高(a)和夜温较低(b)时热流密度积分值随后墙高度的变化

Fig. 8 Relationships between integral value of heat flow density and height of the back wall at high temperature night and low temperature night

夜温较高时后墙放热量 Φ_1 为:

$$\Phi_1 = \int_0^{4.5} (1.9x^4 - 14x^3 + 23x^2 - 12x + 180) dx \tag{12}$$

求解方程(12),得 $\Phi_1 = 653$ W。夜温较低时后墙放热量 Φ_2 为:

$$\Phi_2 = \int_0^{4.5} (-3.7x^4 + 21x^3 - 13x^2 - 100x + 340) dx \tag{13}$$

求解方程(13),得 $\Phi_2 = 910$ W。

1)后墙温度较高时后墙放热量受后墙温度和后墙放热驱动共同作用,后墙中部放热量也很大;后墙

温度较低时后墙放热量主要受后墙放热驱动作用(图 8)。

2)本试验中尽管 2015-12-23 后墙温度较高、蓄热量多,但由于外界温度较高,后墙受到的放热驱动小,后墙放热量并不多;2016-01-23 后墙温度较低、蓄热量少,但由于外界温度较低,后墙受到的放热驱动大,后墙放热量较多;对比两日后墙放热量,也可以看出后墙放热驱动在后墙放热中起主要作用。

3 讨论

非金属固体(土墙、土壤、建筑物等)主要依靠晶格震动传递能量^[13],空气分子之间通过分子碰撞进行能量传递。由于受到保温被覆盖面遮挡,使得后

墙放热过程与直接暴露在外界环境中的放热过程具有不同特点,本研究引入驱动力概念是为了更好地描述外界低温通过覆盖面对后墙放热的影响,进而阐明后墙放热机理,但驱动力是不存在的。热量从温度高的地方向温度低的地方流动,对于热源(燃煤、燃气等)引起的主动传热,热源是决定因素,通过控制热源可以对传热过程进行调控;对于后墙放热等被动传热,外界温度是决定因素,通过控制外界温度(如通过内保温、多层覆盖等减弱外界低温作用)可以对传热过程进行调控;因此使用驱动力概念描述外界低温对后墙放热作用具有一定合理性。

本试验中水平驱动力大小、水平驱动力密度以及后墙放热驱动是使用特定温室覆盖面曲线(图2)计算出来的。日光温室结构差别较大,覆盖面曲线拟合方程会有不同,外界低温在后墙形成的放热驱动也会不同,但后墙放热驱动符合自上而下逐渐增大的规律。原因是生产中日光温室跨度均大于脊高,采光面呈半抛结构,通过计算后的后墙放热驱动都会是自上而下逐渐增大。

后墙被动放热特性说明后墙温度始终高于温室空气温度,因此当遭遇寒潮、连阴天时,后墙温度低,温室空气温度会更低,日光温室在抵御寒潮、连阴天等不良天气方面具有局限性;日光温室在遭遇寒潮、连阴天等不良天气时需要热量补充。从试验中可以看出,夜温较低时后墙下部放热量是后墙上部放热量的3倍多,因此后墙下部是补充热量的理想部位。张传坤等^[22]在日光温室加温辅助墙体制备中提出,为应对不良天气情况,日光温室建造时在后墙上设置火道进行热量补充,火道位置在后墙高度0.5 m处,但加温辅助墙体产生的温室热环境有待于进一步研究。

4 结 论

本研究选用试验期间夜温较高(2015-12-23)和夜温较低(2016-01-23)的试验数据,对后墙不同高度放热量差异进行研究,主要结论如下:

- 1) 推导出的后墙放热机理能够解释后墙不同高度放热量差异。
- 2) 夜间后墙不同高度放热量差异主要是由于外界低温通过覆盖面在后墙产生的放热驱动不同造成的,后墙放热驱动随后墙高度降低而增大。
- 3) 后墙放热是外界低温驱动下的被动放热。
- 4) 后墙温度较高时,后墙放热量受后墙温度和

后墙放热驱动共同作用,温室中部放热量也会很多;后墙温度较低时,后墙放热量主要受后墙放热驱动作用。

参考文献 References

- [1] 李明,周长吉,周涛,尹义蕾,富建鲁,王志强,齐长红.日光温室土壤传热特性及轻量化路径的理论分析[J].农业工程学报,2016,32(3):175-181
Li M,Zhou C J,Zhou T,Yin Y L,Fu J L,Wang Z Q,Qi C H. Heat transfer process of soil wall in Chinese solar greenhouse and its theoretical simplification methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3):175-181 (in Chinese)
- [2] 马承伟,卜云龙,籍秀红,陆海,邹岚,王影,李睿.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
Ma C W,Bu Y L, Ji X H, Lu H,Zou L,Wang Y,Li R. Method for calculation of heat release at night and evaluation for performance of heat preservation of wall in solar greenhouse [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2008, 26(5):411-415 (in Chinese)
- [3] Yamaguchi T, Kuroyanagi T, Chen Q Y. Studies on thermal environment of the sunlight greenhouse (Part 1): Basic experiment to analyze thermal environment of the sunlight greenhouse [J]. *Journal of the Society of Agricultural structures*, 2003, 34(1):31-37
- [4] 邴伟,董仁杰,汤楚宙,张淑敏.日光温室的热环境理论模型[J].农业工程学报,1997,13(2):160-163
Li W,Dong R J,Tang C Z,Zhang S M. A theoretical model of thermal environment in solar plastic greenhouses with one slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 13(2):160-163 (in Chinese)
- [5] 白青,张亚红,刘佳梅.日光温室土质墙体内温度与室内气温的测定分析[J].西北农业学报,2009,18(6):332-337
Bai Q,Zhang Y H,Liu J M. Determination and analysis of the temperature in soil wall and solar greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6):332-337 (in Chinese)
- [6] 温祥珍,李亚灵.日光温室砖混结构墙体内冬春季温度状况[J].山西农业大学学报:自然科学版,2009,29(6):525-528
Wen X Z, Li Y L. Analysis of temperature within north composite wall of solar greenhouse [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2009, 29(6):525-528 (in Chinese)
- [7] 刘淑梅,薛庆禹,李春,王铁,黎贞发,官志宏.天津地区不同墙体处理对日光温室保温性能影响初探[J].中国农学通报,2012,28(35):170-179
Liu S M,Xue Q Y,Li C,Wang T,Li Z F,Gong Z H. Effects of different wall treatments on thermal insulation of solar greenhouse in Tianjin area [J]. *Chinese Agricultural Science*

- Bulletin, 2012, 28(35):170-179 (in Chinese)
- [8] 马承伟,徐凡,赵淑梅,李睿,刘洋.日光温室热环境分析及设计方法研究[C]//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.北京:中国农业科学技术出版社,2011:70-79
Ma C W, Xu F, Zhao S M, Li R, Liu Y. Study on thermal environment analysis and design method in solar greenhouse [C]. In: *Innovation and Development of Protected Horticulture: The Second China · Shouguang Symposium of the International High-Level Academic Forum on Protected Horticulture in 2011*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011:70-79 (in Chinese)
- [9] 彭东玲,杨其长,魏灵玲,张义,方慧.日光温室土质墙体热流测试与分析[J].中国农业气象,2014,35(2):168-173
Peng D L, Yang Q C, Wei L L, Zhang Y, Fang H. Measurement and heat flux analysis on north earthen wall in Chinese solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2):168-173 (in Chinese)
- [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
Li J S, Bai Q, Zhang Y H. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4):231-236 (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 张传坤,徐平丽,魏珉,刘福胜,郭洪恩,杨宁.日光温室墙体非稳态导热过程的理论分析[J].农业工程技术:温室园艺,2018,38(25):57-60
Zhang C K, Xu P L, Wei M, Liu F S, Guo H E, Yang N. Theoretical analysis on unsteady heat conduction process of wall in Solar greenhouse[J]. *Agricultural Engineering Technology: Greenhouse Horticulture*, 2018, 38(25):57-60 (in Chinese)
- [13] 张靖周,常海萍.传热学[M].2版.北京:科学出版社,2015:60-61,81,97,2
Zhang J Z, Chang H P. *Heat Transfer* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015:60-61,81,97,2 (in Chinese)
- [14] 梁浩,方慧,杨其长,张义,孙维拓.日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试[J].农业工程学报,2013,29(12):187-193
Liang H, Fang H, Yang Q C, Zhang Y, Sun W T. Performance testing on warming effect of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12):187-193 (in Chinese)
- [15] 郭建业,秦贵,张艳红,刘晓明.日光温室水循环增温蓄热系统应用效果研究[J].中国蔬菜,2016(9):65-70
Guo J Y, Qin G, Zhang Y H, Liu X M. Studies on application effects of water circulating, warming and heat storing system in solar greenhouse[J]. *China Vegetables*, 2016(9):65-70 (in Chinese)
- [16] 张勇,高文波,邹志荣.日光温室主动蓄热后墙传热CFD模拟及性能试验[J].农业工程学报,2015,31(5):203-211
Zhang Y, Gao W B, Zou Z R. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):203-211 (in Chinese)
- [17] 张传坤,魏珉,刘福胜,徐平丽.日光温室后墙夜间非稳态导热特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2019,47(2):1-11
Zhang C K, Wei M, Liu F S, Xu P L. Unsteady heat conduction characteristics of back wall of solar greenhouse at night[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2019, 47(2):1-11 (in Chinese)
- [18] 李式军,郭世荣.设施园艺学[M].2版.北京:中国农业出版社,2011:142-144
Li S J, Guo S R. *Protected Horticulture* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 2011:142-144 (in Chinese)
- [19] 刘春泽,李国斌.热工学基础[M].3版.北京:机械工业出版社,2015:127
Liu C Z, Li G B. *Thermal Engineering Foundation* [M]. 3rd ed. Beijing: Mechanical Industry Publishing Press, 2015:127 (in Chinese)
- [20] 徐丰,崔会敏.侧加热腔内的自然对流[J].力学进展,2014,44(3):98-136
Xu F, Cui H M. Natural convection in a differentially heated cavity[J]. *Advances in Mechanics*, 2014, 44(3):98-136 (in Chinese)
- [21] 曹学成,武秀荣.普通物理学[M].北京:中国农业出版社,2013:117-120
Cao X C, Wu X R. *General Physics* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 2013:117-120 (in Chinese)
- [22] 张传坤,郭洪恩,魏珉,刘永志,刘波,王晓.日光温室加温辅助墙体:中国,2015203656421[P].2015-5-30
Zhang C K, Guo H E, Wei M, Liu Y Z, Liu B, Wang X. Heating auxiliary back wall in solar greenhouse: China, 2015203656421 [P]. 2015-05-30 (in Chinese)