

# 基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究

张国祥<sup>1,2</sup> 刘星星<sup>1</sup> 张领先<sup>3</sup> 傅泽田<sup>2,4</sup> 张琛驰<sup>2,3</sup> 李鑫星<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 4. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 日光温室通过在棚面上覆盖卷帘保温材料的方式,可以有效地减少日光温室在外界环境温度较低情况下的热量散失,在前期研究的改进型日光温室后置固定式卷帘装置基础上进一步研究不同卷帘开度对于日光温室内部温度变化的影响。选择保温性质较好的保温被作为卷帘材料,简化北方地区较为典型的辽沈Ⅳ型日光温室结构,通过对日光温室的散热情况分析,得到日光温室内部温度的变化与其卷帘开度导致的保温材料与卷膜的覆盖面积变化存在着一定的线性关系。并通过 CFD-Fluent 仿真软件和验证性试验进行研究验证,结果表明:覆盖卷帘可以有效地减少日光温室的热量散失,维持室内适宜温度及其均匀性,在较为理想的环境条件下,日光温室内部温度变化与卷帘开度存在一定的线性关系,且日光温室内部温度由于棚面散热速率的差异所呈现的区域性差异也进一步验证了该结论。

**关键词:** 日光温室; 温度; 卷帘开度; CFD-Fluent 仿真; 试验

**中图分类号:** S625      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0279-08

## Relationship between Indoor Temperature and Rolling Shutter Opening of Solar Greenhouse Based on CFD

ZHANG Guoxiang<sup>1,2</sup> LIU Xingxing<sup>1</sup> ZHANG Lingxian<sup>3</sup> FU Zetian<sup>2,4</sup> ZHANG Chenchi<sup>2,3</sup> LI Xinxing<sup>2,3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The solar greenhouse can effectively reduce the heat loss under the outdoor condition at low temperature by covering insulation materials. Based on the previous study of design and experiment of the rear fixed type rolling shutter device in solar greenhouse, in order to study the influence of rolling shutter opening on the temperature change in solar greenhouse, aimed at the insulation pads, the typical “Liaoshen IV” solar greenhouse structure was simplified. The result suggested that the indoor temperature of solar greenhouse can be affected by the rolling shutter opening, which changed the covering area of insulation materials and heat dissipation rate of solar greenhouse. There was a linear proportional relationship between indoor temperature of solar greenhouse and rolling shutter opening. And then this theory was verified by CFD-Fluent. The following conclusion was drawn: covering the shutter can effectively reduce the heat loss and maintain appropriate indoor temperature and its uniformity for solar greenhouse. Under ideal conditions, the rolling shutter opening would change the covering area of insulation materials and lead to the differences of heat dissipation rate for solar greenhouse, at last, lead to the regional difference of inner temperature. And the relationship between changes of inner temperature and the value of rolling shutter opening was almost linear. The study intuitively reflected the relationship between indoor temperature and roller shutter opening of solar greenhouse, and provided a theoretical basis for further strengthening the precision control of rolling shutter machines, besides it would provide effective reference for greenhouse production practice in China, and it had an important theoretical and practical significance.

**Key words:** solar greenhouse; temperature; rolling shutter opening; CFD-Fluent simulation; experiment

收稿日期: 2016-11-22    修回日期: 2017-02-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51705520)

作者简介: 张国祥(1994—),男,博士生,主要从事农业装备与机械化工程研究,E-mail: zhangguoxiang@cau.edu.cn

通信作者: 李鑫星(1983—),男,副教授,主要从事农业系统与知识工程研究,E-mail: lxxcau@cau.edu.cn

引言

日光温室通过在棚面上覆盖卷帘保温材料的方式,有效地减少日光温室在外界环境温度较低情况下的热量散失,将日光温室棚室内部温度维持在作物生长发育所需的适宜范围内,满足室内作物的生长发育需要<sup>[1-3]</sup>。

在寒冷夜间,通常会使用日光温室卷帘机在棚面上铺放覆盖卷帘用以保温,在昼间外界温度适宜时打开卷帘,使得日光温室内部的作物接受光照,且在外界光照条件较好的情况下,使得卷帘处于较大开度,有益于作物接受更多光照,但在昼间外界温度较低或光照不强的情况下,卷帘完全打开会造成日光温室的室内温度迅速降低,冻伤作物,造成严重损失,另一方面若卷帘完全覆盖棚面又会造成光照不足,影响作物生长。为解决这一问题,可通过仅打开部分卷帘,维持一定的卷帘开度,使得日光温室在满足必要的光照需求下,减少日光温室内部热量散失,维持室内适宜温度<sup>[4-5]</sup>。但对于日光温室卷帘机的使用,目前多只停留在将卷帘完全打开或是完全封闭,不对卷帘开度进行高精度控制,其操作方式过于粗糙和简单。因此,开展卷帘开度对日光温室温度的影响研究,实现日光温室卷帘机的精准化控制,具有重要的研究意义<sup>[6-7]</sup>。

在前期“改进型日光温室后置固定式卷帘装置”的研究基础上,基于计算流体动力学(CFD)的建模方法,本文提出日光温室内部温度的变化与其卷帘开度存在着一定的线性关系。并通过CFD-Fluent模型仿真的方法,选择特征平面进行针对性分析究,最后进行试验验证。

1 卷帘开度对日光温室温度的影响

1.1 日光温室保温覆盖材料

日光温室所采用的棚面保温覆盖材料,目前多为人造纤维材料的保温被或是简单的温室草帘,草帘属于比较传统的日光温室保温材料,因为取材方便,价格低廉,在日光温室普及之初就已被广泛使用,但因为草帘的质量较差,寿命短,而且随着保温被生产成本的降低,且保温被具有防水、防风、寿命长、适用于卷帘机械等特点,保温被已经得到普遍的使用。目前市场上保温效果较好的保温被主要有防水布、化纤喷胶棉、薄膜等材料组成,且在使用时通常会在日光温室棚面内层覆盖一层卷膜,以加强其保温效果<sup>[8-9]</sup>。因为材料性质的差异,草帘和保温被在保温性质上也存在着较大的差异,如表1所示<sup>[9]</sup>。

表 1 日光温室卷铺介质的保温性质差异  
Tab.1 Insulation property differences between straw curtains and insulation pads

| 保温材料 | 厚度/<br>mm | 单位面积质量/<br>(kg·m <sup>-2</sup> ) | 传热系数/<br>(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 传热阻/<br>(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> ) |
|------|-----------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 草帘   | 30        | 1.425                            | 4.564                                          | 0.219 1                                      |
| 保温被  | 21        | 1.230                            | 0.928                                          | 1.078 0                                      |

由表1可知,保温被的传热系数远小于草帘,且其传热阻较大,反映保温被的保温效果明显优于草帘,且单位面积的保温被的质量小于草帘,能够减轻日光温室棚面负载,也更适合于日光温室的机械卷帘作业。基于以上考虑,选择保温被作为模型仿真及试验中的日光温室保温覆盖材料。

1.2 日光温室温度与卷帘开度关系

选择北方地区较为典型的辽沈Ⅳ型日光温室作为仿真研究对象<sup>[10]</sup>,为方便研究计算,将其日光温室棚面简化成一段圆弧,整体结构被简化为简单的几何模型,如图1所示<sup>[10]</sup>。

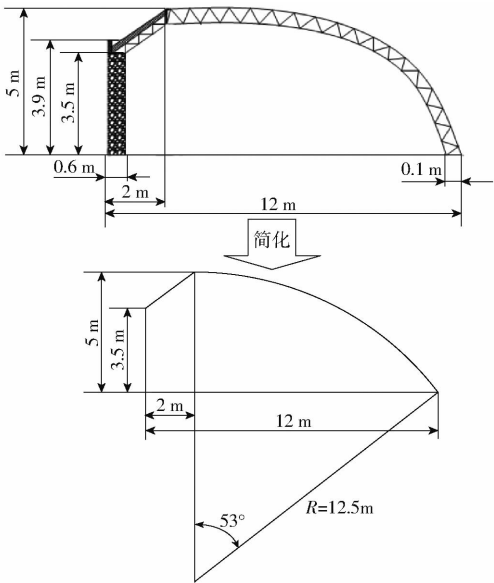


图 1 辽沈Ⅳ型日光温室的图形简化  
Fig.1 Graphic simplification of “Liaoshen IV” solar greenhouse

选择0、20%、40%、60%、80%、100% 6个开度作为仿真验证试验中日光温室的卷帘开度测量位置,棚室长度设定为60 m,通过计算可以得到日光温室内部的空间体积 $V_a$ 为2 593.85 m<sup>3</sup>,假设室内外空气温度分别分布均匀,卷膜处于完全关闭状态,忽略自然通风对室内外温度的影响,日光温室的覆盖材料表面温度分布均匀,则此时日光温室内部热量的散失主要为室内空气与覆盖材料接触(卷膜+卷帘、卷膜)的对流热换能量,如图2所示。

基于所简化的辽沈Ⅳ型日光温室模型,通过计

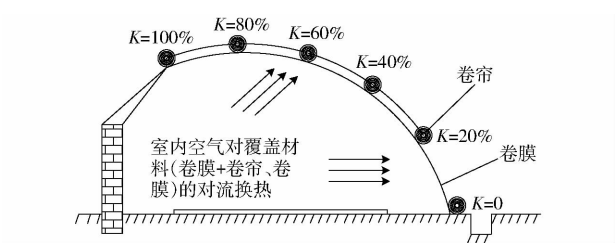


图 2 日光温室室内空气与覆盖材料的对流换热

Fig.2 Convective heat transfer of indoor air and covering materials in solar greenhouse

算得到不同卷帘开度  $K$  所对应的圆心角度和材料覆盖面积如表 2 所示。

表 2 不同卷帘开度对应的圆心角度和卷铺材料覆盖面积

Tab.2 Central angle and covering area at different roller openings

| 卷帘开度<br>$K/\%$ | 对应的圆心<br>角/ $(^\circ)$ | 覆盖材料(卷膜+<br>卷帘)面积 $A_1/\text{m}^2$ | 覆盖材料(卷膜)<br>面积 $A_2/\text{m}^2$ |
|----------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 0              | 0                      | 693.42                             | 0                               |
| 20             | 10.6                   | 554.74                             | 138.68                          |
| 40             | 21.2                   | 416.05                             | 277.37                          |
| 60             | 31.8                   | 277.37                             | 416.05                          |
| 80             | 42.4                   | 138.68                             | 554.74                          |
| 100            | 53.0                   | 0                                  | 693.42                          |

由表 2 可知覆盖材料(卷膜+卷帘,卷膜)面积  $A_1$ 、 $A_2$  与卷帘开度呈线性比例关系。假设在一个标准大气压下,日光温室内、外部温度分布均匀,基于研究实验条件需要,将日光温室内部空气温度  $t_i$  设定为  $27^\circ\text{C}$  ( $300\text{ K}$ ),日光温室棚面覆盖材料的温度设定为  $0^\circ\text{C}$  ( $273\text{ K}$ )。由此可以得到的热平衡微分方程为

$$V_a C \rho_a \frac{dt_i}{dt} = Q - Q_1 - Q_2 \tag{1}$$

其中

$$Q_1 = A_1 \alpha_1 (t_i - T_1) \tag{2}$$
$$Q_2 = A_2 \alpha_2 (t_i - T_2) \tag{3}$$

式中  $V_a$ ——日光温室内部的空间体积,  $\text{m}^3$   
 $C$ ——空气比热容,取  $1\,006.43\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   
 $\rho_a$ ——日光温室内空气密度,取  $1.225\text{ kg}/\text{m}^3$   
 $Q$ ——单位时间内除去室内空气与棚面覆盖材料对流换热能量外的日光温室其他能量变化,包括室内空气与墙体的对流换热能量等,  $\text{W}$   
 $Q_1$ ——单位时间内日光温室内部通过与覆盖材料(卷膜+卷帘)的自然对流换热能量,  $\text{W}$   
 $Q_2$ ——单位时间内日光温室内部通过与覆盖材料(卷膜)自然对流换热能量,  $\text{W}$

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——覆盖材料(卷膜+卷帘,卷膜)与室内空气之间对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

$T_1$ 、 $T_2$ ——覆盖材料(卷膜+卷帘,卷膜)与室内空气接触的表面温度,  $\text{K}$

由以上理论研究分析得到,日光温室内部温度的变化与其卷帘开度导致的覆盖材料(卷膜+卷帘,卷膜)面积  $A_1$ 、 $A_2$  变化存在着一定的线性关系,基于以上考虑,本文将通过 CFD-Fluent 模型仿真的方法进一步研究验证<sup>[11-15]</sup>。

## 2 不同卷帘开度下日光温室温度变化的 CFD-Fluent 仿真

### 2.1 网格划分和边界条件

基于 ANSYS Workbench CFD 仿真分析软件,模拟冬季夜间日光温室的热量散失情况,建立不同卷帘开度的日光温室三维仿真模型,为日光温室的构造面进行命名,设置合适的网格单元尺寸 ( $0.3\sim 0.5\text{ m}$ ),采用 Tetrahedrons 模式进行模型网格划分,得到的网格划分结果如图 3 所示。

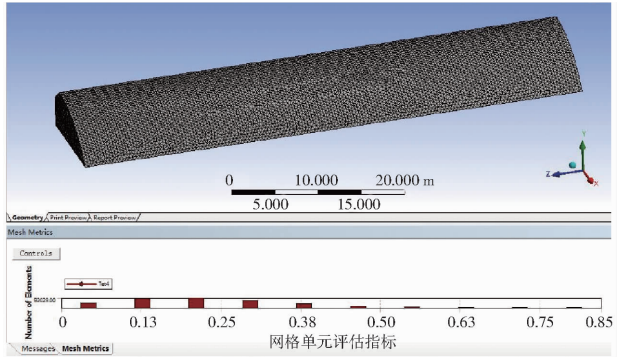


图 3 日光温室模型的 Tetrahedrons 网格划分结果

Fig.3 Results of Tetrahedrons mesh generation about solar greenhouse model

由图 3 网格划分结果可看出,网格质量评估参数 Skewness(不能高于 0.95,最好在 0.90 以下;其值越小表示划分的网格质量越好)的最大值仅为 0.8 左右,且超过 90% 的网格的 Skewness 值小于 0.5,网格划分质量较为良好,不同卷帘开度的日光温室模型划分的网格数量均达到 360 000 左右,精度较高,且未出现“负网格”等错误情况,能够满足 Fluent 模拟仿真实验的需要。由于所需仿真结果为单位时间后的瞬态环境状态值,所以选择瞬态模型 Transient,启动能量模型 Energy,选择湍流模型为 Realizable  $k-\varepsilon$  模型,进入边界条件设置。对日光温室的建筑材料及其覆盖材料的边界类型、厚度、对流系数、边界温度进行了设定<sup>[16-19]</sup>,其设定参数如表 3 所示<sup>[9,13]</sup>。

表 3 Fluent 日光温室仿真模型的边界条件

Tab. 3 Boundary conditions for solar greenhouse simulation model of Fluent

| 边界名称  | 边界类型 | 厚度/mm | 边界材质                    | 对流换热系数/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 边界温度/K |
|-------|------|-------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|
| 后墙    | WALL | 400   | 内表面抹灰砖墙,49 墙            | 1.270                                                     | 273    |
| 东墙    | WALL | 200   | 普通砖墙                    | 4.400                                                     | 273    |
| 西墙    | WALL | 200   | 普通砖墙                    | 4.400                                                     | 273    |
| 地面    | WALL | 2000  | 土壤                      | 1.270                                                     | 273    |
| 保温后坡面 | WALL | 20    | 中空 PC 板 10 mm + FRP 瓦楞板 | 2.100                                                     | 273    |
| 保温被   | WALL | 10    | 复合材料                    | 0.928                                                     | 273    |
| 卷膜    | WALL | 0.8   | 聚氯乙烯                    | 21.12                                                     | 273    |

2.2 Fluent 仿真结果

初始化设定完成后,在 Patch 设定中将日光温室内部的初始温度设定为 300 K,将仿真模拟的时间步长设定为 60 s,总的时间步数设定为 10,两者乘

积即可得到仿真时间,为 10 min。基于以上所设定的相同边界条件、初始条件和仿真时间,对不同卷帘开度下日光温室模型的温度变化情况进行模拟仿真,得到的仿真结果如图 4 所示。

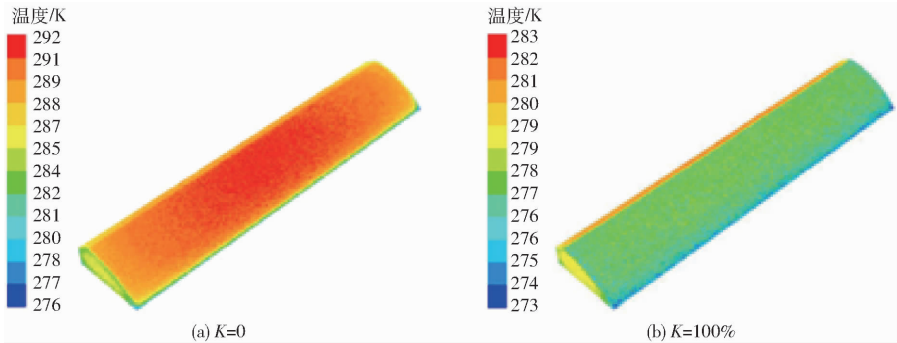


图 4 不同卷帘开度 CFD-Fluent 整体温度云图对比

Fig. 4 CFD-Fluent contrast testing of whole temperature clouds with  $K=0$  and  $K=100\%$

由图 4 可得在棚面上铺放卷帘和未铺放卷帘(仅覆盖卷膜)对日光温室内部整体温度变化的影响,从整体温度变化来看,卷帘的保温效果明显。为研究铺放卷帘开度对于日光温室内部温度分布影响

情况,通过 Plane Surface 的“三点建面”方法在日光温室模型内部建立  $Y=1\text{ m}$  平面与  $Z=30\text{ m}$  平面,对其在卷帘开度  $K=20\%$  时的平面温度分布情况进行比较,如图 5 所示<sup>[20]</sup>。

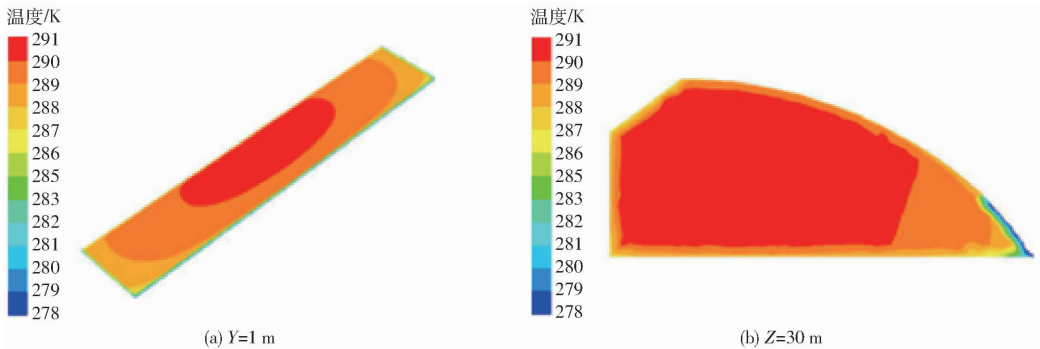


图 5 卷帘开度  $K=20\%$  的  $Y=1\text{ m}$  平面与  $Z=30\text{ m}$  平面温度云图对比

Fig. 5 CFD-Fluent contrast of temperature clouds of plane  $Y=1\text{ m}$  and  $Z=30\text{ m}$  with 20% opening

由图 5 可知其日光温室内部的温度分布存在一定的层次性,且在  $Z$  轴方向和  $Y$  轴方向上都有所体现,但在  $Y$  轴方向上层次感和规律性较强,且考虑到  $Z=30\text{ m}$  的平面更多反映温室内部整体情况,且日光温室内部种植作物一般处于温室下部区域,所以选择  $Y=1\text{ m}$  平面作为研究特征平面,观察其温度云图变化,更能反映不同卷帘开度对于日光温室种

植作物所处环境温度的直接影响,不同卷帘开度对应的  $Y=1\text{ m}$  平面温度云图如图 6 所示。

3 CFD-Fluent 仿真结果分析

3.1 日光温室卷帘保温效果和分析

通过图 4 中在棚面上完全铺放卷帘( $K=0$ )和未铺放卷帘(仅覆盖卷膜, $K=100\%$ )的日光温室整

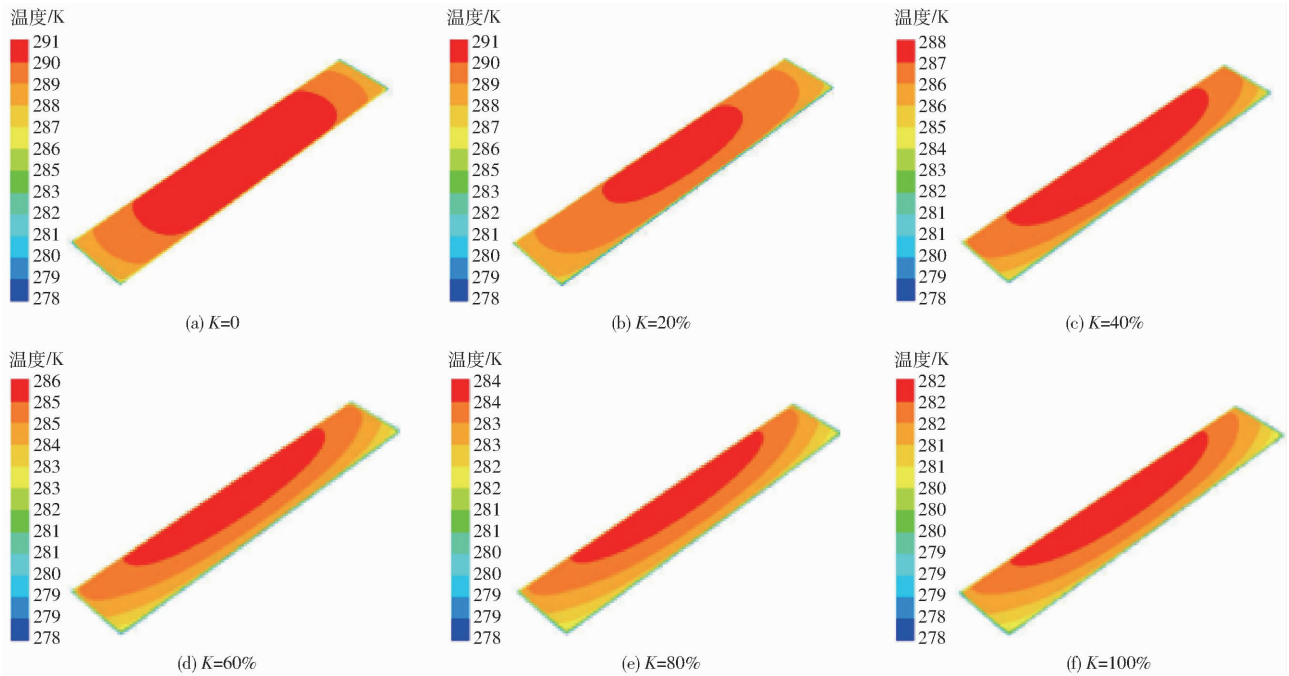


图 6 不同卷帘开度日光温室内  $Y=1\text{ m}$  等高面的温度云图

Fig. 6 Temperature clouds based on  $Y=1\text{ m}$  contour plane with different openings

体温度云图变化对比可以发现,在棚面上铺放卷帘可以有效地减小日光温室棚面的热量散失速率,卷帘对于日光温室具有良好的保温效果。且由图 6 中具体的日光温室内  $1\text{ m}$  等高面( $Y=1\text{ m}$  平面)温度云图来看,在棚面上完全铺放卷帘( $K=0\%$ )和未铺放卷帘(仅覆盖卷膜, $K=100\%$ )的日光温室室内温度在相同区域内提升近  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

由图 4、图 6 中的温度分布情况可以发现,日光温室的建造及覆盖材料保温性质的差异会导致其内部空间区域散热速率出现明显的不同,由此会导致日光温室内部温度的区域性差异,且这种差异性存在一定的规律性,散热速率较快的材料周围区域温度降低速度较快。这反映到日光温室温度变化,在图 4 中有所体现,日光温室后墙体和卷帘相比较其他材料具有较好的保温性质,东西墙体次之,卷膜的保温性质最差,也由此导致在卷帘未打开( $K=0\%$ )时,在日光温室内  $1\text{ m}$  等高面上,温度从温室中间区域往两边墙体基本呈由高到低的阶梯状分布;当卷帘打开后,也基本呈现由温室后墙体向外的扩散式

阶梯状分布。

这种分布规律对于日光温室作物种植具有极其重要的指导作用,卷帘未打开( $K=0\%$ )时,室内  $1\text{ m}$  等高面温度云图中的高温区域集中于日光温室中间的大部分区域,这部分也多为日光温室种植作物区域,区域温度分布也较为均匀,而卷帘打开后,室内  $1\text{ m}$  等高面温度云图的温度则呈现由墙体向外的扩散式阶梯状分布,这对于种植区域内作物影响明显,会导致种植区域尤其是其外围区域内的种植作物出现严重冻伤、冻死等灾害,影响作物产量与品质。由此可知,在棚面上铺放卷帘能够有效地保证日光温室内部种植区域的温度均匀性,有益于种植作物的生长和发育<sup>[21]</sup>。

3.2 不同卷帘开度下温度变化结果与分析

针对于卷帘开度对于日光温室内部整体温度影响的分析,将各个卷帘开度下的  $Z=30\text{ m}$  平面和  $Y=1\text{ m}$  平面的温度分布情况以 XYplot 图的方式展现,如图 7 所示。

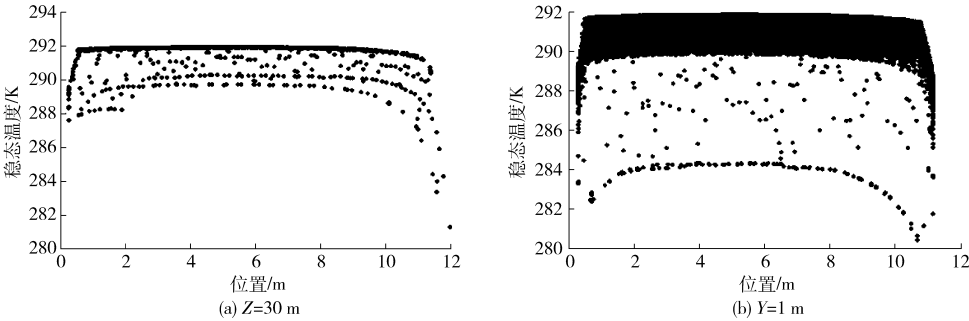


图 7 卷帘开度  $K=0$  时  $Z=30\text{ m}$  平面与  $Y=1\text{ m}$  平面温度 XYplot 图对比

Fig. 7 Contrast of temperature XYplot of plane  $Y=1\text{ m}$  and  $Z=30\text{ m}$  with 0 opening

将 plot 图中的温度数据导出后,处理后得到各个卷帘开度下  $Z = 30\text{ m}$  平面和  $Y = 1\text{ m}$  平面的温度平均值,这也可以被视为不同卷帘开度下,整个日光温室内部的平均温度的反映,对其结果进行统计,如图 8 所示。

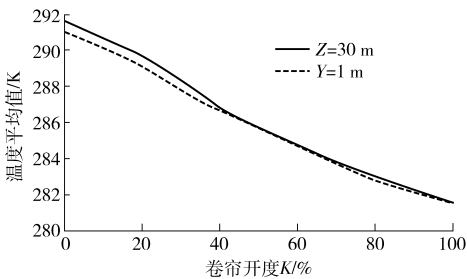


图 8 平面  $Z = 30\text{ m}$  和  $Y = 1\text{ m}$  平均温度与卷帘开度关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of average temperature on  $Z = 30\text{ m}$  and  $Y = 1\text{ m}$  planes and opening

由图 8 可以看出, $Z = 30\text{ m}$  平面和  $Y = 1\text{ m}$  平面的温度平均值随着卷帘开度的增大基本呈线性递减,其最大非线性误差分别小于  $0.5\%$  和小于  $0.35\%$ 。

图 6 中,卷帘开度  $40\% \sim 100\%$  时,在日光温室  $1\text{ m}$  等高面温度云图的温度分布在不考虑其所代表的温度的情况下,具有极高的相似度,基于这种共性,将其温度云图进行分区和标注处理,其结果如图 9 所示。

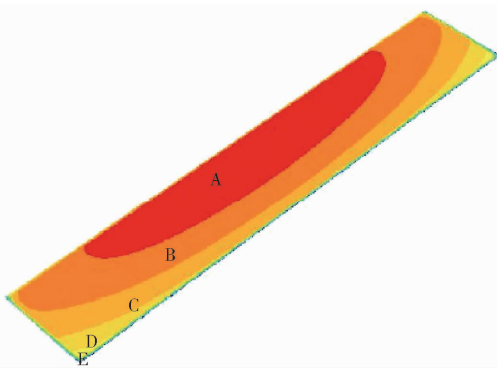


图 9 温度云图的分区处理

如图 9 所示,从 A 区到 E 区其温度递减,绘制各区域温度变化与卷帘开度关系曲线如图 10 所示。由图 10 区域温度与卷帘开度关系曲线可以发

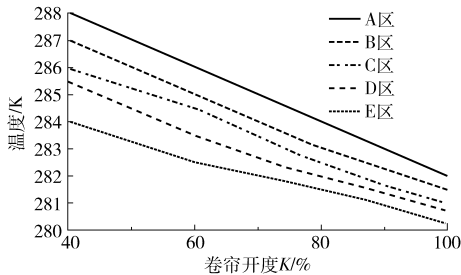


图 10 区域温度与卷帘开度关系曲线

Fig. 10 Relationship curves of zone temperature and opening

现,在相同的温度分区内,其温度随着卷帘开度的增大而逐渐减小,且这种递减趋势与卷帘开度存在一定的线性关系,其最大非线性误差小于  $0.45\%$ ,由此可以进一步验证日光温室其内部温度变化与其卷帘开度存在一定的线性关系。

#### 4 验证性试验结果与分析

为研究卷帘开度对日光温室的影响,通过建立日光温室等比例  $1:40$  模型(图 11),内部均匀布置温度传感器,共计 15 个,采集其内部温度参数,模型内部两边山墙放置暖风机(额定电压  $12\text{ V}$ ,额定功率  $150\text{ W}$ ),在其后墙安装散热片(额定电压  $12\text{ V}$ ,额定功率  $100\text{ W}$ ),以提高模型内部空气温度,借助暖风机气流,加强空气流动与能量交换,提高其内部空气温度均匀性,使其接近与仿真理想环境。



图 11 日光温室等比例  $1:40$  模型

模型外侧共有 5 组温度计显示屏,每组示数分别代表模型内部由内向外的 3 个位置点温度,试验时的室外环境为  $15^\circ\text{C}$ ,封闭卷膜、卷帘,将模型内温度升高至  $40^\circ\text{C}$  左右,将暖风机和散热片元件断电,将试验时间设定为  $10\text{ min}$ ,在不同卷帘开度下观察温室模型的内部温度变化情况,以此研究相同时间内,卷帘开度对于日光温室温度的影响。其结果如表 4 所示。

表 4 在相同试验时间后的不同卷帘开度模型内部温度变化

Tab. 4 Temperature variation of different roller openings after the same test time

| 卷帘开度/ $\%$ | 室外温度/ $^\circ\text{C}$ | 起始室内平均温度/ $^\circ\text{C}$ | 10 min 后的室内平均温度/ $^\circ\text{C}$ | 温度降幅/ $^\circ\text{C}$ |
|------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 0          | 15                     | 41.59                      | 39.32                             | 2.27                   |
| 20         | 15                     | 42.39                      | 35.02                             | 7.37                   |
| 40         | 15                     | 41.59                      | 33.81                             | 7.78                   |
| 60         | 15                     | 41.41                      | 32.24                             | 9.17                   |
| 80         | 15                     | 41.55                      | 30.72                             | 10.83                  |
| 100        | 15                     | 41.54                      | 27.59                             | 13.95                  |

由表 4 可以看出,相同试验时间内,日光温室模型内部平均温度随着卷帘开度的增大而减小,且其降幅基本呈现线性递增变化,且其最大非线性误差

小于 4.00%。对于卷帘开度对日光温室内部温度分布的影响,以 100% 为例,试验时间(10 min)后模型内部温度分布如图 12 所示。

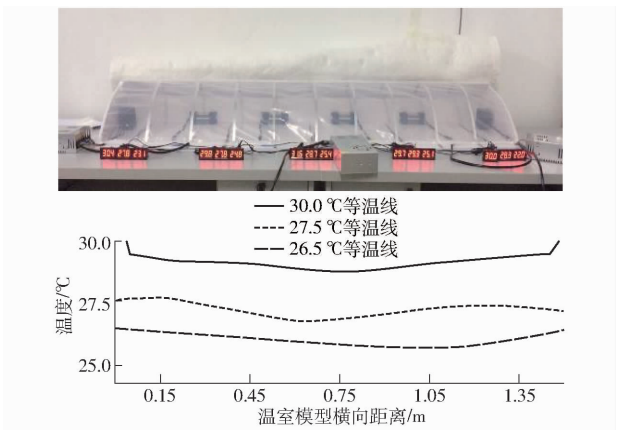


图 12 100% 卷帘开度模型内部温度分布

Fig.12 Temperature distribution of 100% model opening

由图 12 可看出日光温室不同卷帘开度下的温度分布基本呈现由内向外的阶梯状分布,与所得到的 CFD-Fluent 模型仿真结果相似,图中因受暖风机的余温影响,温室模型两端的分布温度略高。

由以上验证性试验结果可以进一步确定日光温

室的温度变化与卷帘开度存在线性关系,由此验证本文的研究结果。

5 结论

(1)以辽沈Ⅳ型日光温室作为研究对象,进行了结构简化,选择保温被作为模型仿真及试验中的日光温室保温覆盖材料,通过分析提出日光温室内部温度的变化与其卷帘开度导致的保温材料与卷膜的覆盖面积变化存在着一定的线性比例关系的理论分析结果,并通过 CFD-Fluent 软件进一步研究验证,选择特征平面进行针对性的研究与分析。

(2)通过 CFD-Fluent 仿真模拟得到:日光温室通过在棚面上覆盖卷帘保温材料的方式,可以有效地减少日光温室在外界环境温度较低情况下的热量散失,维持室内适宜温度及其均匀性,且在较为理想的环境条件下,日光温室卷帘开度的不同,棚面保温材料和卷膜的覆盖面积变化会导致日光温室棚面散热速率的差异,由此导致日光温室内部温度呈现区域性差异。且这种差异存在一定的规律性,反映日光温室内的温度变化与卷帘开度存在一定的线性关系,并通过模型验证性试验进一步验证该研究结论。

参 考 文 献

1 丁小明.我国日光温室卷帘机技术现状分析[J]. 农机化研究,2011(12):217-222.  
DING Xiaoming. Research and development on exterior cover-rolling machine of solar greenhouse in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2011(12):217-222. (in Chinese)

2 刘晨霞,马承伟,王平智,等.日光温室保温被传热的理论解析及验证[J]. 农业工程学报,2015,31(2):170-176.  
LIU Chenxia, MA Chengwei, WANG Pingzhi, et al. Theoretical analysis and experimental verification of heat transfer through thick covering materials of solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(2): 170-176. (in Chinese)

3 刘明国,王玉华,叶秋楠.卷帘机在辽宁设施农业中的应用研究[J]. 农业科技与装备,2012(4):66-67.  
LIU Mingguo, WANG Yuhua, YE Qiunan. Research on the application of rolling machine in installation agriculture in Liaoning[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2012(4):66-67. (in Chinese)

4 董向辉,樊禹铭.设施农业中卷帘机的发展应用研究[J]. 农业科技与装备,2012(10):84-86.  
DONG Xianghui, FAN Yuming. Research on the development and application of shutter machine in installation agriculture[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2012(10):84-86. (in Chinese)

5 王俊衡,李莉,穆永航,等.日光温室光照强度测量系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(增刊):194-200. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S032&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S032&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.032  
WANG Junheng, LI Li, MU Yonghang, et al. Measurement system of light intensity in solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(Supp.):194-200. (in Chinese)

6 佟国红,CHRISTOPHER D M,李天来,等.日光温室保温被卷放位置对温度环境的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(10):253-258.  
TONG Guohong, CHRISTOPHER D M, LI Tianlai, et al. Influence of thermal blanket position on solar greenhouse temperature distributions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 253-258. (in Chinese)

7 张国祥,傅泽田,李鑫星,等.改进型日光温室后置固定式卷帘装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):299-308. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161237&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161237&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.037.  
ZHANG Guoxiang, FU Zetian, LI Xinxing, et al. Design and experiment of rear fixed type rolling shutter device in solar greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(12):299-308. (in Chinese)

8 王云冰,邹志荣,杨建军,等.高效保温材料在日光温室后屋面中的应用研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,

2010,38(1):173-180.

WANG Yunbing, ZOU Zhirong, YANG Jianjun, et al. Application research of highly effective thermal insulation materials on solar greenhouse back—roof [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010,38(1):173-180. (in Chinese)

9 姜鲁艳,马艳,吐尔逊娜依·热依木江,等. 几种温室覆盖材料的保温性能测试与分析[J]. 中国农机化学报,2015,36(1):119-123.

JIANG Luyan, MA Yan, TUERXUNNAYI·Reyimujiang, et al. Testing and analysis of several heat preservation prop-erty of greenhouse covering materials [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1):119-123. (in Chinese)

10 魏晓明,周长吉,曹楠,等. 中国日光温室结构及性能的演变[J]. 江苏农业学报,2012,28(4):855-860.

WEI Xiaoming, ZHOU Changji, CAO Nan, et al. Evolution of structure and performance of Chinese solar greenhouse [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2012,28(4):855-860. (in Chinese)

11 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.

12 周伟,李永博,汪小岳. 基于 CFD 非稳态模型的温室温度预测控制[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(12):335-340. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141248&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141248&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.048.

ZHOU Wei,LI Yongbo, WANG Xiaochan. Model predictive control of air temperature in greenhouse transactions of the based on CFD unsteady model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(12):335-340. (in Chinese)

13 TONG G, CHRISTOPHER D M, LI B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 68(1):129-139.

14 ZHANG X, WANG H, ZOU Z, et al. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese solar greenhouse temperature distribution[J]. Biosystems Engineering, 2016, 142:12-26.

15 LIU Y, CHEN J, TENG G, et al. 3D-CFD method driven with the dynamic data using real-time online monitoring for temperature simulation of greenhouse[J]. Sensor Letters, 2011, 9(3):947-957.

16 塔娜,陈斌,五十六,等. 基于 CFD 的寒冷干旱地区日光温室温度场模拟分析[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2015,36(1):77-81.

TA Na,CHEN Bin,WU Shiliu. The simulation analysis of solar greenhouse in cold arid area base on CFD [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition,2015,36(1):77-81. (in Chinese)

17 蒋国振,胡耀华,刘玉凤,等. 基于 CFD 的下沉式日光温室保温性能分析[J]. 农业工程学报,2011,27(12):275-281.

JIANG Guozhen, HU Yaohua, LIU Yufeng, et al. Analysis on insulation performance of sunken solar greenhouse based on CFD [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):275-281. (in Chinese)

18 GB/T 19561—2004 寒地节能日光温室建造规程[S]. 2004.

19 NY/T 1451—2007 温室通风设计规范[S]. 2007.

20 王新忠,张伟建,张良,等. 基于 CFD 的夏季屋顶全开型玻璃温室自然通风流场分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):332-337. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161042&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161042&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.042.

WANG Xinzhong, ZHANG Weijian, ZHANG Liang, et al. Analysis of flow field for full open-roof glass greenhouse with nature ventilation in summer based on CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):332-337. (in Chinese)

21 李永博,周伟,李鹏飞,等. 基于 CFD 模拟模型的温室温度场均匀性控制[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):156-161. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120429&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120429&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.029.

LI Yongbo, ZHOU Wei, LI Pengfei, et al. Temperature homogeneity control of greenhouse based on CFD simulation model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):156-161. (in Chinese)