

# 冷风挡帘对日光温室内气温影响的数值模拟及其结构优化

马文娟 塔娜\* 五十六 陈斌

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

**摘要** 研究冷风挡帘结构对寒冷干旱地区日光温室内温度分布的影响。以内蒙古呼和浩特近郊农户生产中使用的日光温室为研究对象,分别对具有冷风挡帘的日光温室(试验温室)和无挡帘的普通温室(对照温室)内的气温进行连续测试,建立2种日光温室在自然通风时的计算流体力学模型。结果表明:在距地面0.1 m高度(作物冠层),试验温室在0.6~7.0 m范围内的气温显著高于对照温室( $\alpha=0.05$ ),温差最大值为4.2℃,最小值为1℃。将近地表气温低于20℃的区域面积值作为评价指标,当通风口底端垂直高度为0.25 m、宽0.3 m,太阳辐射 $\geq 300 \text{ W/m}^2$ ,室外风速 $\leq 1.2 \text{ m/s}$ 时,冷风挡帘最优结构参数为迎风长度0.84 m,倾斜角度76°,此时不同进口风速能满足大部分耕作区域地表气温在12:00时高于20℃的生产要求。

**关键词** 日光温室;冷风挡帘;结构优化;CFD模型

中图分类号 S625.1; S214.3

文章编号 1007-4333(2017)05-0108-10

文献标志码 A

## Numerical simulation and verification for the effect of keep-off shade on temperature field in solar greenhouse

MA Wenjuan, Tana\*, Wushiliu, CHEN Bin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract** To explore the effect of keep-off shade on temperature field in solar greenhouse in cold-arid areas, greenhouses used universally for agricultural production in a suburb of Hohhot, Inner Mongolia are study objects. The internal temperature in greenhouses with keep-off shade (experimental group) and greenhouses without keep-off shade (control group) were investigated continuously. Numerical models based on CFD method of these two types of greenhouses in natural ventilation were built. The results showed that temperatures in experimental greenhouse at 0.1 m height (accordant to crop canopy) are higher than the control group among whole span areas, the maximum of temperature difference was 4.2℃, while the minimum was 1℃. Area scale of land surface temperature under 20℃ was regarded as evaluation index, when the vent is 0.3 m wide and the bottom is 0.25 m high, solar radiation is more than 300 W/m<sup>2</sup>, wind speed is less than 1.2 m/s, our results demonstrate that the best windward length is 0.84 m and the best oblique angle is 76° in order to ensure the land surface temperature of most arable zones are higher than 20℃ under the condition of natural ventilation.

**Keywords** solar greenhouse; keep-off shade; structure optimization; CFD model

寒冷干旱地区冬季昼夜温差较大,环境温度较低,该地区日光温室内湿度较大,需要在白天进行自然通风,以达到除湿及调控CO<sub>2</sub>浓度的作用<sup>[1-2]</sup>。然而由于过低的环境温度及寒风的侵袭,靠近通风口处的作物会出现明显的长势衰退甚至死亡的现象。

为减少因此带来的经济损失,农户们在温室内设置了一道内层膜,即冷风挡帘,来阻挡自然通风时寒冷气流对作物的伤害。冷风挡帘通常布置在通风口附近,对于挡帘的高度、倾斜角度和距通风口距离等关键结构参数通常都是依据经验选取,缺乏科

收稿日期:2016-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61364021)

第一作者:马文娟,硕士研究生,E-mail:1170797051@qq.com

通讯作者:塔娜,教授,博士生导师,主要从事力学在工程中的应用研究,E-mail:jdtana@163.com

学依据。

日光温室内湿热环境的研究普遍应用以下方法:1)三维非稳态模拟方法。通过该方法建立自然通风时室内温湿度 Simulink 仿真模型<sup>[3-4]</sup>,结果表明通风对调节室内小气候有重要作用,风口尺寸是自然通风过程中影响室内微气候的主要参数之一<sup>[5]</sup>。2)试验研究方法。针对不同地区的气候特点,对存在“透明缓冲绝热区”的具有内层膜结构的日光温室环境因子进行测试<sup>[6]</sup>,结果证明内层膜结构可在同一温室中创造出不同的局部小气候,满足植物的生长需要<sup>[7]</sup>,有效地降低 27%~29%的热量损失,节约能源<sup>[8]</sup>。3)CFD 方法。基于该方法对温室湿帘-风机系统的室内降温环境做进一步优化设计<sup>[9]</sup>。对具有内层膜结构的温室热损失率和透光率的研究表明:双层膜温室的热损失率相比单层膜结构大大降低,同时也能够获得较高的透光率<sup>[10-11]</sup>,保证作物正常的生长需求。综上,对不同地区具有内层膜结构的日光温室在挡风节能方面特性的研究内容广泛,且对于通风时的室内流场的探究方法详实<sup>[12-13]</sup>,但对于我国北方寒冷干旱地区典型的具有冷风挡帘结构的日光温室少有研究,缺乏对挡帘长度、倾斜角度等结构参数的优化设计方案。本研究旨在结合地区实际生产特点,研究具有冷风挡帘结构的日光温室内部气温分布,并对冷风挡帘迎风长度、倾斜角度进行参数优化,以期为实际生产中冷风挡帘的设置提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验测试

内蒙古自治区呼和浩特市具有典型的寒冷干旱地区气候特点,昼夜温差较大,冬季寒冷漫长<sup>[14]</sup>。测试试验在该地区最寒冷的时间段内进行,数据采集时间为 2014-11-15—2015-02-05,该时段日光温室内主要种植耐寒作物油菜。

#### 1.1.1 试验温室

本研究以农户日常生产使用的具有冷风挡帘结构的日光温室(试验温室)和无挡帘结构的普通温室(对照温室)为研究对象,分别对这 2 种日光温室内部气温进行多点实时测试。试验及对照温室坐北朝南,长度 100 m,跨度 6.5 m,脊高 3.5 m;后墙体为夯实黏土墙,在南北方向的截面为梯形,顶厚 2.5 m,底厚 3.5 m,高 2.8 m;后坡材料为木板,8 cm 厚,仰角 20°;覆盖材料为 PE 膜,0.11 mm 厚;

保温被为草帘,6 cm 厚;通风口位于温室采光面底部 PE 膜上,沿整个东西长度方向开设,长 100 m,底端距地面竖直高度为 0.25 m,宽 0.3 m,除此之外没有设置其他通风口。试验温室内的冷风挡帘材料为 PE 膜,其底端距温室南边界 0.5 m,迎风长度(挡帘结构投影在南北方向截面上的斜线长度) $L=0.88$  m,倾斜角度(与水平面所夹锐角) $\alpha=75^\circ$ ,具体结构见图 1(a)。晴天时,日光温室通风时段为 10:00—15:30,阴天不通风。

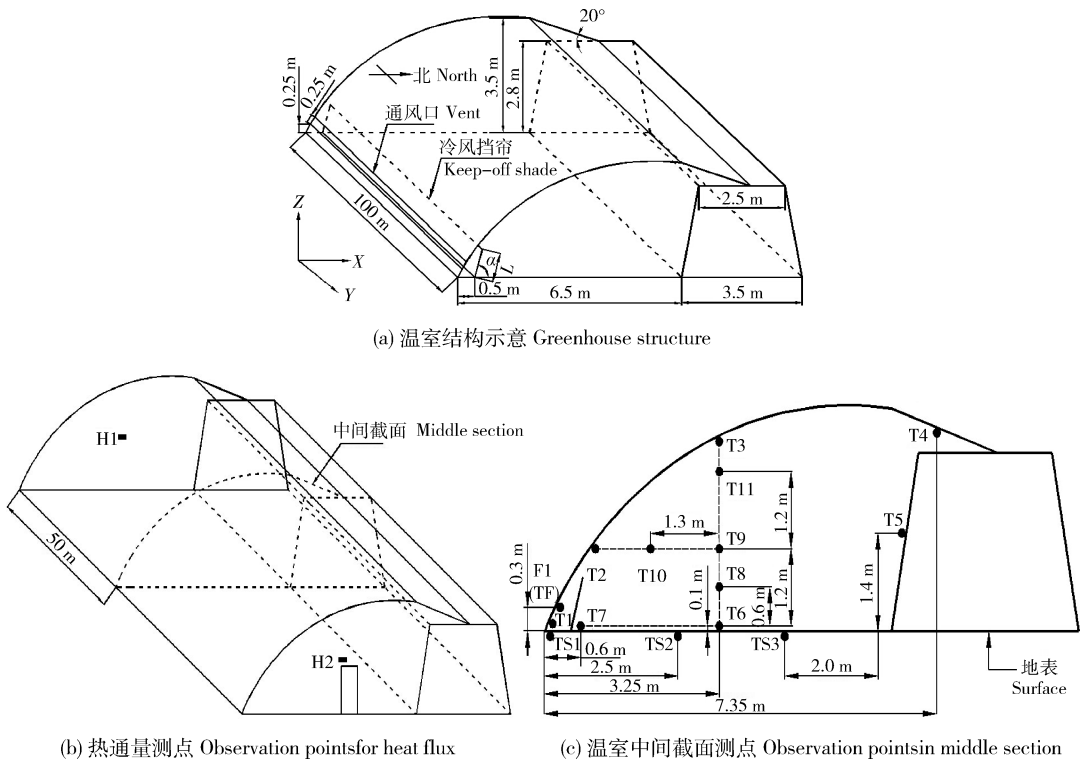
#### 1.1.2 试验方案

针对冷风挡帘的结构特点,在试验温室南北方向的中间截面上布置 11 个空气温度测点(T1~T11);东、西山墙内表面各布置 1 个热通量测点(H1 和 H2);在土壤表层沿跨度方向,布置 3 个土壤温度测点(TS1~TS3),通风口处布置 1 个空气温度测点(TF)和 1 个风速测点(F1);对照温室中部南北方向截面内的测点位置与试验温室内的完全相同(图 1(b)和(c))。室外环境气候由锦州利诚自动化设备公司的 JLC-QTJ 田间小气候气象监测站实时监测并采集记录。各测点的数据采集时间间隔为 30 min。

T1~T11 和 TF 测点的温度值采用 KZWS/BF 型温湿度传感器采集,温度测量范围: -40~100 °C,精度 $\pm 0.3$  °C;H1 和 H2 测点的墙体外表面热流采用 HF-1 型热流传感器采集,测量范围: 0~1 000 W/m<sup>2</sup>,精度 $\leq \pm 5\%$ ;TS1~TS3 测点的土壤温度采用 MS10 型土壤温度/水分传感器采集,温度测量范围: -40~80 °C,精度 $\pm 0.5$  °C;通风口风速采用 LC-F1 型风速风向传感器采集,测量范围:风速为 0~75 m/s,精度 $\pm (0.3+0.03v)$  m/s,其中  $v$  为实测风速;风向为 0~360°,精度 $\pm 3^\circ$ 。

### 1.2 CFD 模拟

工程中广泛采用 Fluent 软件,基于计算流体力学(CFD)方法,分析流体流动及传热等物理现象<sup>[15]</sup>,通过该方法建立日光温室内热环境数值模型,能够有效预测室内温度变化规律<sup>[16]</sup>。本研究利用验证后的数值模型对温室内冷风挡帘的结构进行优化,得到更为合理的结构参数。在我国北方冬季日光温室生产中,仅当天气晴朗、风力等级较低时,才对日光温室进行通风除湿,因此数值模拟选择以 2015-01-21 为代表的晴天条件下,研究试验温室内温度场及流场的分布特点,明确冷风挡帘对室内气温及流场速度的影响,为挡帘结构的优化提供理论参考。



(a) 温室结构示意图 Greenhouse structure

(b) 热通量测点 Observation points for heat flux

(c) 温室中间截面测点 Observation points in middle section

$L$  为迎风长度,  $m$ ;  $\alpha$  为倾斜角度, ( $^{\circ}$ )。T1~T11、TF 为 KZWS/BF 型温度传感器的采集位置; H1 和 H2 为 HF1 型热流传感器采集位置; TS1~TS3 为 MS10 型土壤温度/水分传感器的采集位置; F1 为 LC-F1 型风速传感器采集位置。

$L$  is windward length,  $m$ ;  $\alpha$  is oblique angle, ( $^{\circ}$ ). T1~T10 and TF are locations of observation points for temperature sensors (KZWS/BF). H1~H2 is the location of observation points for heat flux sensors (HF1). TS1~TS3 are locations of observation points for soil temperature and moisture sensors (MS10). F1 is the location of observation points for anemometer (LC-F1).

图1 试验及对照温室三维结构和测点布置

Fig. 1 3D structure of experimental and control greenhouse and location of observation points

### 1.2.1 模型建立

利用前处理软件 Gambit 建立试验及对照温室在自然通风时的三维模型。日光温室内土壤温度的变化分布十分复杂, 不仅与土层深度有关, 而且土壤的含水率对其温度影响也十分显著<sup>[17]</sup>, 因此可选土壤表面作为模型边界。自然通风时, 东墙中央的木门紧闭, 其表面积占东墙表面积的比率较小, 对室内耕作区域气温的影响并不显著, 因此可以忽略木门材料及结构形式的差异, 与东墙看做一个整体, 作为模型的一个侧面边界。由于本研究重点研究的是温室内 12:00 时的气温和气流分布, 因此可将温室三维模型简化: 模拟研究的计算域为日光温室整个内部空间, 流动介质为空气; 壁面边界为日光温室覆盖膜内表面、后坡内表面、后墙体内表面及土壤表面; 挡帘为内部壁面边界; 实际中既有气流从通风口进入温室, 同时也有气流排出, 因此将通风口均分为上、下 2 个部分, 靠下的部分设置为速度进口边界,

靠上部分为自由流出口。利用 Cooper 和 Map 的划分方式对内部空间区域划分六面体网格及适当位置用部分楔形网格, 最小网格尺寸为 0.2。对照温室三维模型除了不具备内部挡帘结构外, 其他边界条件及网格划分均与试验温室模型内的一致。试验及对照温室三维模型分别生成 380 857 和 179 000 个网格单元, 且 99.1% 和 98.0% 的网格质量保持在 0.4 以内。

### 1.2.2 参数设置

模型采用稳态模型求解, 且已有的研究表明,  $k-\epsilon$  标准湍流模型适合于日光温室内气体的流动, 其计算收敛性和精确性都符合工程计算的要求<sup>[18]</sup>。白天, 日光温室主要吸收太阳辐射的热量, PE 覆盖膜属于半透明介质, Discrete Ordinates 模型 (DO 模型) 能够适用于多种辐射场合, 不仅考虑了散射的影响而且求解精度较高<sup>[16]</sup>, 因此采用 DO 辐射模型实现太阳辐射对日光温室内部温度场的影响。输入试

验温室所在地呼和浩特市地理坐标(111°E,40°N)、时区(东 8 区)以及试验日期(2015-01-21T12:00),选择 solar-calculator 中的 Fair Weather Conditions 条件。应用基于压力的求解器,压力速度的耦合选择 PISO 方法,离散格式选择 PRESTO! 压力差值算法。

日光温室三维模型的边界材料为 PE(聚乙烯塑料膜)、木板、黏土、土壤(灰褐土),介质类型为空气,各项材料热学性能参数<sup>[19-20]</sup>见表 1。

以室内测点 12:00 时的实测数据作为模型的边界条件(表 2)。室内空气进行传热时形成自然对

表 1 材料热学性能参数

Table 1 Property parameters of materials thermology

材料 Material	密度 $\rho$ / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) Density	热导率 $\lambda$ / ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) Thermal conductivity	定压比热 $C_p$ / ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ) Specific heat capacity	吸收系数 Absorption coefficient	折射率 Refractive index
聚乙烯 PE	920	0.320	2301	0.1	1.5
木板 Wood	600	0.174	2512	0.8	—
黏土墙 Wall	1 600	0.698	2010	0.9	—
土壤 Soil	1 700	0.657	2010	0.9	—
空气 Air	1.185	0.026	1007	—	1.0

表 2 试验和对照温室的模型边界条件

Table 2 Boundary conditions of model for experimental and control greenhouse

温室 Greenhouse	边界名称 Name	材料 Material	边界类型 Boundary type	测点 Observation point	温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature	热通量/ ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) Heat flux	速度/( $\text{m}/\text{s}$ ) Velocity	发射率 Internal emissivity
试验温室 Experimental greenhouse	覆盖膜	PE	Wall	T1	12.1	—	—	0.8
				T2	23.5			
				T3	30.4			
	后坡	木板	Wall	T4	19.2	—	—	0.8
	墙体内部表面	黏土	Wall	T5	31.2	—	—	0.9
	土壤表面	土壤	Wall	TS1	6.33	—	—	0.9
				TS2	8.85			
				TS3	9.16			
	下部通风口	—	Velocity inlet	TF/F1	12	—	0.6, 方向水平	0.8
	上部通风口	—	Out flow	—	—	—	—	1.0
东山墙	黏土	Wall	H1	—	40	—	0.9	
西山墙	黏土	Wall	H2	—	74	—	0.9	
对照温室 Control greenhouse	覆盖膜	PE	Wall	T1	12.9	—	—	0.8
				T2	25.5			
				T3	31.1			
	后坡	木板	Wall	T4	19.8	—	—	0.8
	墙体内部表面	黏土	Wall	T5	31.4	—	—	0.9
	土壤表面	土壤	Wall	TS1	6.2	—	—	0.9
				TS2	8.75			
				TS3	9.13			
	下部通风口	—	Velocity inlet	TF	18	—	0.6, 方向水平	0.8
	上部通风口	—	Out flow	—	—	—	—	1.0
东山墙	黏土	Wall	H1	—	44	—	0.9	
西山墙	黏土	Wall	H2	—	71	—	0.9	

流,由浮力驱动的自然对流采用 Boussinesq 模型<sup>[16]</sup>;操作条件考虑重力作用,室内环境初始温度 25 °C。室外环境温度为-6 °C,太阳总辐射 381 W/m<sup>2</sup>,风速 1.2 m/s,风向 269°。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

经迭代计算后分别得到试验及对照温室在 2015-01-21T12:00 的室内气温和流场速度分布规律。将试验及对照温室内测点 T6~T11 的实测数据(表 3)

作为检验标准,与同一时刻同一位置处的模拟结果(表 3)进行对比,配对  $t$  检验的检验结果见表 4。由此可知,对于给定的显著性水平  $\alpha=0.05$ 、自由度  $df$  为 5,试验温室和对照温室的  $t$  检验值  $t=0.476$ 、 $-1.857$ ,其绝对值均小于  $t_{\alpha/2}$ ,且 2 种日光温室内的气温模拟值与实测值最大偏差不超过 4%,说明模拟温度与实测温度不存在显著性差异,数值模型与实际情况吻合度较高,证明了 CFD 模型的准确性。表 3 中,T6 测点的模拟值与实测值偏差最大,主要是因为油菜作物的生命活动对地表附近微气候产生的影响。

表 3 试验和对照温室内温度模拟值与实测值

Table 3 Experimental and simulated temperature in experimental greenhouse

测点 Measuring point	试验温室 Experimental greenhouse			对照温室 Control group greenhouse		
	实测值/°C Measured value	模拟值/°C Simulated value	相对偏差/% Relative deviation	实测值/°C Measured value	模拟值/°C Simulated value	相对偏差/% Relative deviation
	T6	22.6	23.2	2.7	20.3	21.0
T7	20.9	21.1	1.0	19.6	19.9	1.5
T8	23.8	23.4	1.7	21.6	22.1	2.3
T9	24.4	24.3	0.4	23.6	24.0	1.7
T10	21.5	21.1	1.9	25.1	24.6	2.0
T11	27.8	27.4	1.4	27.2	27.7	1.8

表 4 试验和对照温室内温度模拟值与实测值的  $t$  检验结果

Table 4  $T$ -test for experimental and simulated temperature in experimental and control greenhouse

温室类型 Greenhouse	平均偏差 Arithmetic mean	标准差 Standard deviation	检验值 $t$ Test value	临界值 $t_{\alpha/2}$ Critical value
试验温室 Experimental greenhouse	0.08	0.412	0.476	2.571
对照温室 Control greenhouse	-0.32	0.422	-1.857	2.571

### 2.2 室内温度和流场速度分布

图 2 示出试验和对照温室内气温分布云图:试验温室内部气温最高值在墙体内表面附近,达 32.2 °C;沿跨度方向距后墙越远,气温越低。地表附近气温沿跨度正向逐渐上升:最高值为 26.5 °C,靠近后墙体;最低值为 12.7 °C,靠近温室南侧边际;且在冷风挡帘两侧出现气温突变。沿覆盖膜内法线方向,室内温度梯度下降:距覆盖膜越远,温度越低,跨度等于 3.5 m 处气温为 23.2 °C。后坡附近最低气温为 21.1 °C,低于后墙体及土壤表面气温。对照

温室内气温的变化趋势与试验温室内的的大致相同,但沿跨度方向,地表附近气温逐渐上升,没有突变现象,且在 0.5~6.7 m 范围内的气温值明显低于试验温室内的。

寒冷气流自覆盖膜底部的通风口进入试验温室后,将会沿着覆盖膜向上运动,到达后坡及后墙壁面时,由于不存在其他通风口,气流将继续沿墙面及土壤表面运动,最终在试验温室内形成顺时针环流,且内部空间的气流速度很小,气体湍动强度很低;此时,在通风口上方的覆盖膜与挡帘形

成的夹层间出现回流,在挡帘与地面间的北侧交角处形成涡流(图 3(a))。寒冷气流进入不具有挡帘结构的对照温室后,首先沿着地面向内运动,到

达后墙壁面后继续向上,沿后坡及覆盖膜运动,最终形成逆时针环流;在温室南侧底脚形成涡流(图 3(b))。

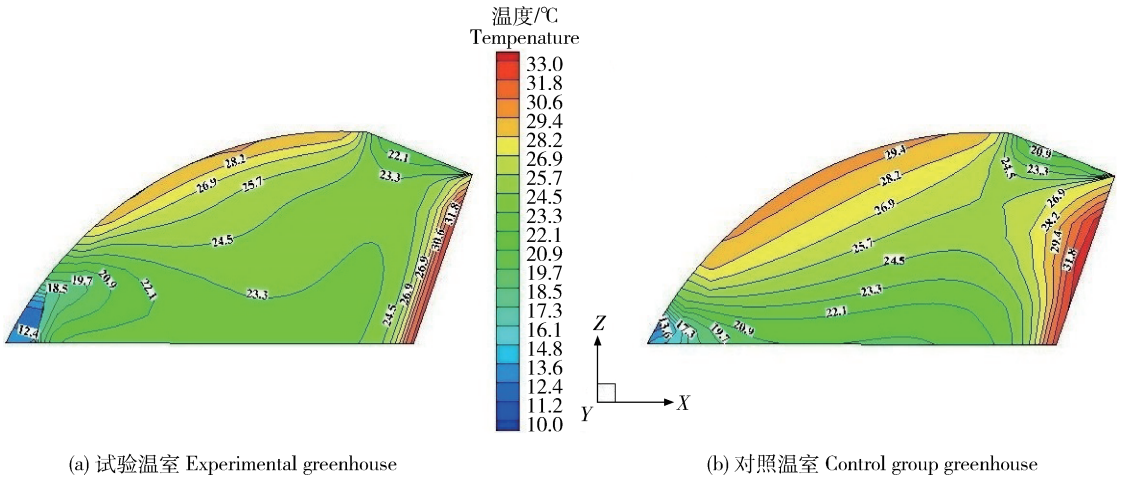


图 2 试验和对照温室内气温分布云图

Fig. 2 Air temperature field in experimental greenhouse

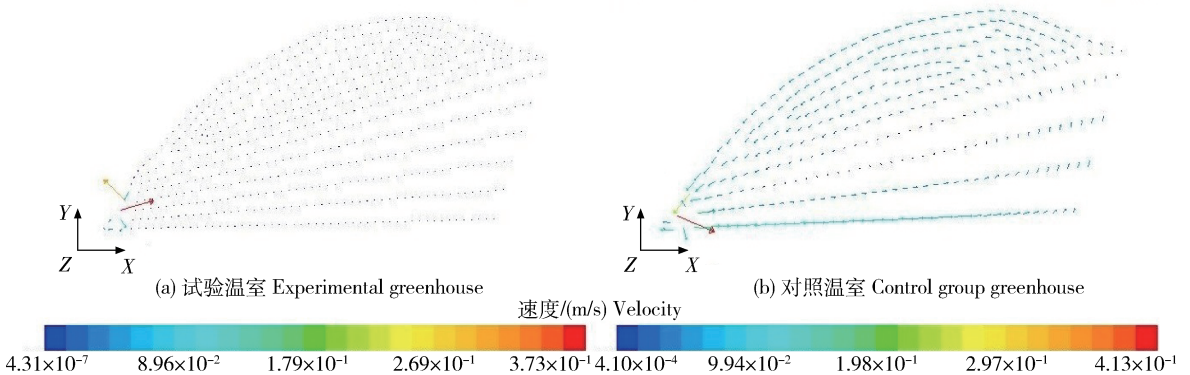


图 3 试验和对照温室内流场速度矢量图

Fig. 3 Velocity vectors in experimental and control group greenhouse

冷风挡帘起到了导流的作用,使得进入日光温室的寒冷气流向上运动;同时将日光温室分为 2 个部分,外部直接迎风区域和流场相对稳定的内部区域。寒冷气流进入室内时,迎风区域湍动强度较大,气体交换迅速,热量损失较多,温度降低。迎风区域构成的这个缓冲带,使内部区域的气流运动和气体交换相对平缓,换热过程也进行的比较缓慢,相同时间内的热量损失较少,起到了挡风保温作用。而对照温室在自然通风时,寒冷气流直接吹向地面作物,与室内空气进行热量交换,气流湍动较强,对流换热效果明显,损失的热量较多,因此地表附近气温较低。

### 2.3 日光温室作物冠层处的气温分布

为了分析挡帘结构对日光温室内作物冠层处气

温的影响,利用 origin 8.0 软件绘出试验和对照温室在距地面 0.1 m 处气温变化曲线,见图 4。

试验温室在沿跨度方向 0.6~7.0 m 范围内的气温均高于对照温室,在 0.8 m 处的温差最大,可达 4.2 °C;7.0 m 处的温差最小,为 1.0 °C。在 0~0.6 m 范围内,两温室内气温差异并不显著,但对照室内气温沿跨度正向逐步上升,而试验温室在挡帘结构两侧出现明显的气温突变。在 0.6~6.7 m 范围内,两温室间温差较为明显,而 6.7~7.0 m 范围内两日光温室内气温差异逐渐减小,主要因为该区域距通风口较远,流场相对稳定,有无冷风挡帘结构对该区域的近地表气温影响相对较小。

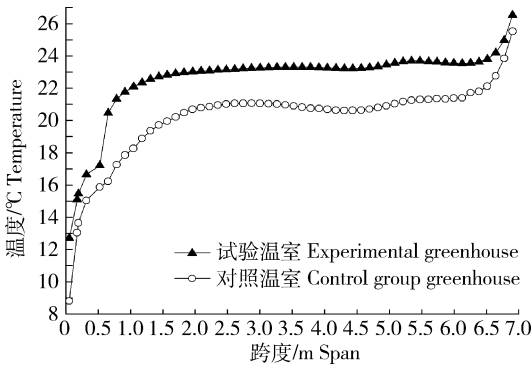


图4 试验和对照温室距地面0.1 m处室内气温变化

Fig. 4 Changes of air temperature above the ground 0.1 m in experimental and control greenhouse

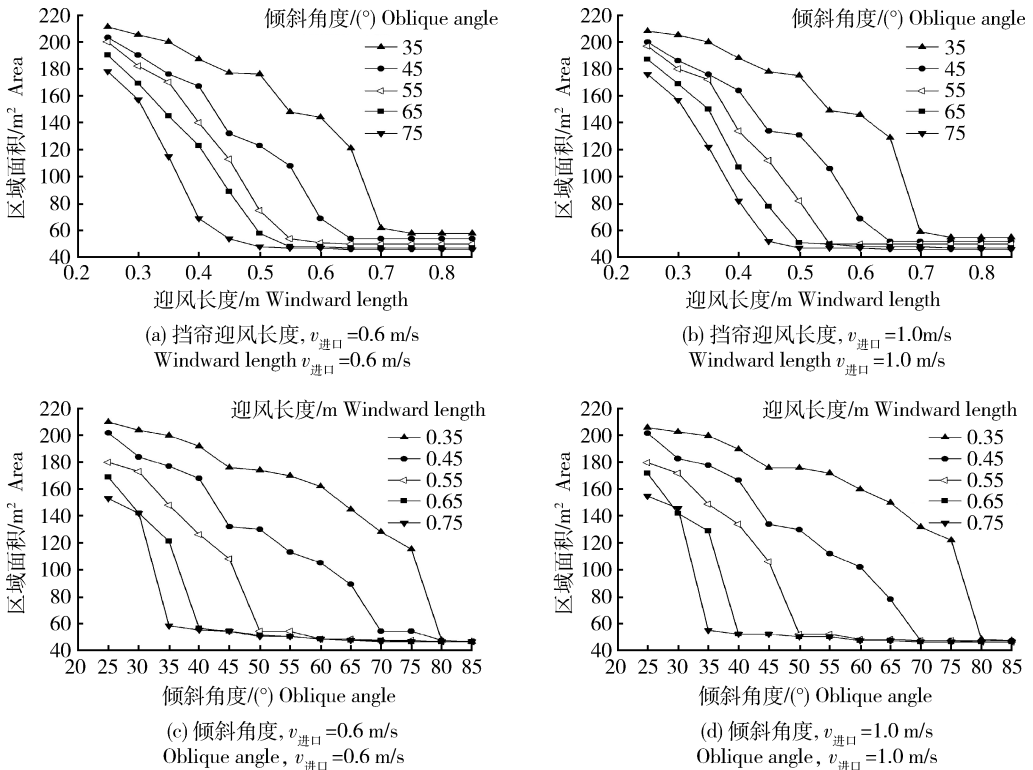
### 2.4 结构优化

#### 2.4.1 冷风挡帘结构参数对地表气温的影响

每种作物每个生长期的最低、最适和最高值温度均不同。在最适温度时作物的生长速度最快，在最高和最低温度基点时，其生长发育将停止。本试

验及对照温室内主要种植耐寒作物油菜，其最适生长温度为20~25℃，最低温度基点为4~5℃，最高温度基点为30℃<sup>[21]</sup>。由于对照温室内没有挡帘结构，白天通风时寒冷气流直接吹向作物区域，因此靠近通风口处的油菜作物出现了长势衰退的现象。

由于挡帘的导流作用，试验温室内近地表气温显著提高。不同的冷风挡帘结构参数对气温的影响程度不同，主要影响因素包括冷风挡帘的迎风长度和倾斜角度。在北方寒冷干旱地区，当天气晴朗、风力等级较低时才会对日光温室进行通风，由室外小气候气象监测站连续测得的数据可知，该天气条件下中午12:00太阳辐射>300 W/m<sup>2</sup>，风速较为稳定，且最大值不超过1.2 m/s。因此，将近地表气温低于20℃的区域面积值作为评价指标，对挡帘迎风长度和倾斜角度逐一进行单因素分析，探究在自然通风条件下，对应不同进口风速边界条件( $v_{进口}=0.6$ 和1.0 m/s)，不同的冷风挡帘结构对耕作区域近地表气温的影响见图5。



室内环境温度 25℃，土壤初始温度 9℃；室外环境温度 -6℃，太阳辐射 381 W/m<sup>2</sup>，风速 1.3 m/s，风向 269°，水平方向。  
Indoor operating temperature is 25℃; Initial soil temperature is 9℃; Outside environmental temperature is -6℃; Solar radiation is 381 W/m<sup>2</sup>; Velocity is 1.3 m/s, 269°, horizontal direction.

图5 地表气温低于20℃的区域面积值随挡帘迎风长度和倾斜角度的变化

Fig. 5 Changes of land surface area below 20℃ accompanying with windward length and oblique angle

由图 5(a)和(b)可以看出,进口风速  $v_{\text{进口}}$  为 0.6 m/s 时,对应不同的倾斜角度,冷风挡帘迎风长度越大,近地表气温低于 20 °C 的区域面积值越小,且倾角越小,挡帘迎风长度对面积值的影响越显著。冷风挡帘倾角越大,近地表气温低于 20 °C 的区域面积达到稳定时的值越小,对应的迎风长度越小;面积达稳定时的最小值为 46 m<sup>2</sup>,此时对应的倾角为 75°,迎风长度 0.55 m。进口风速  $v_{\text{进口}}$  为 1.0 m/s 时,其面积曲线的变化规律与图 5(a)一致,近地表气温低于 20 °C 的区域面积最大值为 208 m<sup>2</sup>,小于  $v_{\text{进口}}$  为 0.6 m/s 时的最大面积值。

图 5(c)和(d)示出对应不同的冷风挡帘迎风长度,近地表气温低于 20 °C 的区域的面积值随挡帘倾斜角度的变化。由图 5(c)可以看出,随着冷风挡帘倾斜角度的增加,近地表气温低于 20 °C 的区域面积逐渐减小,且迎风长度越小,挡帘倾角对面积值的影响越显著。迎风长度越大,近地表气温低于 20 °C 的区域面积值达稳定时对应的倾角越小。当倾角  $\geq 80^\circ$ ,不同的冷风挡帘迎风长度下的面积值均不再随倾角的变化而改变,稳定在 47 m<sup>2</sup>。进口风速为 1.0 m/s 时,其面积曲线的变化规律与图 5(c)基本一致,近地表气温低于 20 °C 的区域面积最大值为 206 m<sup>2</sup>,小于  $v_{\text{进口}}$  为 0.6 m/s 时的最大面积值。

### 2.4.2 优化方案

为了探究冷风挡帘迎风长度和倾斜角度对近地表气温低于 20 °C 的区域面积的综合影响,利用 origin 8.0 软件进行数据拟合,对应不同的进口风速(0.6 和 1.0 m/s),得到面积值随迎风长度  $L$  和倾斜角度  $\alpha$  变化的方程:

$$Z_1 = 588.76 - 820.89L - 5.97\alpha + 427.79L^2 + 0.031\alpha^2 + 1.54\alpha L \quad (1)$$

$$Z_2 = 594.91 - 795.12L - 6.48\alpha + 411.19L^2 + 0.036\alpha^2 + 1.41\alpha L \quad (2)$$

方程(1)和(2)的拟合度分别为 0.91 和 0.90,说明拟合结果吻合度较高。

近地表气温低于 20 °C 的区域面积值越小,对油菜生长越有利。因此分别对式(1)和(2)求极小值,  $v_{\text{进口}}$  为 0.6 m/s:  $\alpha_1 = 75.8^\circ, L_1 = 0.823$  m;  $v_{\text{进口}}$  为 1.0 m/s:  $\alpha_2 = 73.4^\circ, L_2 = 0.841$  m。考虑到生产成本及实际操作,为实现冷风挡帘在常规天气条件下的作用,将计算结果圆整,最终确定最优结构参数为迎风长度 0.84 m,倾斜角度 76°。

利用数值模型对优化方案进行模拟验证,冷风挡帘取最优结构参数时的日光温室室内气温分布见图 6(b)。优化温室近地表气温分布更均匀,温度高于试验温室(图 6),更能满足油菜生长对温度的要求,从而证明优化方案的有效性。

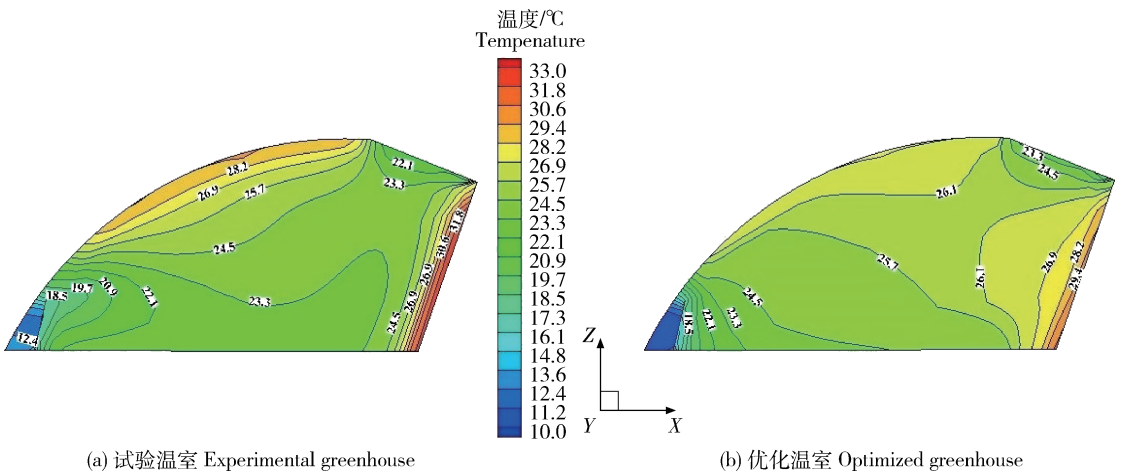


图 6 试验及冷风挡帘参数优化后温室内部气温分布云图

Fig. 6 Distribution of temperature in experimental and optimized greenhouse

## 3 结论

1)在自然通风条件下,试验温室内部气温最高值在墙体内表面附近,可达 32.2 °C;沿跨度方向距

后墙越远,气温越低;地表附近气温沿跨度正向逐渐上升,且在冷风挡帘两侧出现气温突变。对照温室内部气温的变化趋势与试验温室内的基本相同,但沿跨度方向,地表附近气温逐渐上升,没有突变现象。



在作物冠层距地面 0.1 m 的高度,跨度方向 0.5~6.7 m 范围内,试验温室内的气温高于对照温室内的,温差最大值为 4.2 °C,在跨度为 0.8 m 处;温差最小值为 0.1 °C,在跨度为 0.1 m 处。

2) 寒冷气流进入试验温室后,将会沿着覆盖膜向上运动,到达后坡及后墙壁面后,继续沿墙面及土壤表面运动,最终在试验温室内部形成顺时针环流,且内部空间气流速度很小,气体湍动强度很低。寒冷气流进入对照温室后,首先沿着地面向内运动,到达后墙壁面后继续向上,沿后坡及覆盖膜运动,最终形成逆时针环流;在温室南侧底脚形成涡流。

3) 配对  $t$  检验表明,由数值模拟得到的试验及对照温室室内温度分布与试验测试的结果吻合度较高,两组数据不存在显著性差异,证明 CFD 模型准确。

4) 将沿跨度方向近地表气温低于 20 °C 区域的面积值作为评价指标,对冷风挡帘迎风长度和倾斜角度逐一进行单因素分析得出,当通风口底端垂直高度为 0.25 m、宽 3 m,太阳辐射  $\geq 300 \text{ W/m}^2$ ,室外风速  $\leq 1.2 \text{ m/s}$  时,对应不同的进口风速边界条件(0.6 和 1.0 m/s),能保证大部分耕作区域地表气温在 12:00 时高于 20 °C 的生产要求的冷风挡帘最优结构参数为:迎风长度 0.84 m,倾斜角度 76°。

## 参考文献 References

- [1] 周长吉. 现代温室工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009  
Zhou C J. *Modern Greenhouse Engineering* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese)
- [2] 毕玉革, 麻硕士, 崔红梅, 朱军. 北方干寒地区日光温室 CO<sub>2</sub> 预测模型建立与冬季试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 183-189  
Bi Y G, Ma S S, Cui H M, Zhu J. Forecasting model of CO<sub>2</sub> concentration of solar greenhouse in the northern drought cold area and experimental verification in winter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 183-189 (in Chinese)
- [3] 周伟, 汪小岳, 李永博. 可变边界条件下的 Venlo 温室温度场非稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 304-310  
Zhou W, Wang X C, Li Y B. Unsteady temperature simulation under variable boundary conditions for Venlo type greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 304-310 (in Chinese)
- [4] 葛建坤, 罗金耀. 基于自然通风的日光温室室内温湿度仿真模型[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 61-64  
Ge J K, Luo J Y. Simulation model of temperature and

- humidity in Chinese solar greenhouse with natural ventilation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(1): 61-64 (in Chinese)
- [5] 付卫红, 由世俊. 自然通风条件下草莓日光温室风口尺寸对温室微气候影响的实验研究[J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(3): 52-56  
Fu W H, You S J. The influence of intake size of strawberry solar greenhouse on the microclimate in natural ventilation: An experimental study [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2013, 42(3): 52-56 (in Chinese)
- [6] Vardiasvili A B, Temurkhanov A, Kim V D. Experimental investigation of the thermal processes in the transparent buffer insulation of a solar greenhouse[J]. *Applied Solar Energy: English Translation of Geliotekhnika*, 1981, 17(6): 40-43
- [7] 王宇欣, 陈端生, 张天柱, 李鸿. 高寒地区充气膜温室局部环境调控分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 167-171  
Wang Y X, Chen D S, Zhang T Z, Li H. Double skin inflated greenhouse inner local climate control characteristics in higher cold area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(4): 167-171 (in Chinese)
- [8] 周长吉. 双层充气塑膜温室经济技术评价[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 159-163  
Zhou C J. Economic and technical assessment on double inflated plastic house[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(1): 159-163 (in Chinese)
- [9] 胥芳, 蔡彦文, 陈教科, 张立彬. 湿帘-风机降温下的温室热/流场模拟及降温系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 201-208  
Xu F, Cai Y W, Chen J L, Zhang L B. Temperature/flow field simulation and parameter optimal design for greenhouses with fan-pad evaporative cooling system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 201-208 (in Chinese)
- [10] Marucci A, Monarca D, Cecchini M, Colantoni A, Allegrini E, Cappuccini A. Use of semi-transparent photovoltaic films as shadowing systems in Mediterranean greenhouses[J]. *Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2013, 7972(2): 231-241
- [11] Ismanzhanov A I, Murzakulov N A, Ismanzhanova A K. The development and study of a two-layer clear coat with improved heat-insulating properties for solar greenhouses[J]. *Applied Solar Energy: English Translation of Geliotekhnika*, 2014, 50(2): 81-83
- [12] Al-Attar F, Al-Karaghoul A, Shakir A. Heat loss and overall heat loss coefficients calculation in single and double glazed polyethylene greenhouses [J]. *Magallat Buhut Al-taqat Al-Samsiyyat*, 1988, 6(1): 21-47
- [13] 杨振超, 邹志荣, 陈双臣, 王军. 西北型日光温室室内风速分布及其与室外风速和通风面积的关系[J]. 西北农林科技大学学报:

- 自然科学版,2006,34(9):36-40
- Yang Z C, Zou Z R, Chen S C, Wang J. Distribution law of inside wind speed and relationship between wind speed inside and outside and ventilation area ratio in northwest type sunlight greenhouse [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(9): 36-40 (in Chinese)
- [14] 李瑛. 呼和浩特市志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1999: 170-171
- Li Y. *Chorography of Huhot* [M]. Huhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1999 (in Chinese)
- [15] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011
- Li P F, Xu M Y, Wang F F. *Proficient in CFD Engineering Simulation* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011 (in Chinese)
- [16] 佟国红, 李保明, David M, 山口智治. 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, David M C, Tomoharu Y. 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 (in Chinese)
- [17] 塔娜, 五十六, 马文娟, 陈斌, 朱英开. 不同含水率下日光温室土壤温度变化规律的峰拟合法拟合[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 204-210
- Tana, Wushiliu, Ma W J, Chen B, Zhu Y K. Peak-fitting based prediction of soil temperature according to soil moisture content in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 204-210 (in Chinese)
- [18] 张起勋, 于海业, 张忠元, 董良杰, 张秋元, 邵承会, 杨坤, 王雪. 利用 CFD 模型研究日光温室内的空气流动[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 166-171
- Zhang Q X, Yu H Y, Zhang Z Y, Dong L J, Zhang Q Y, Shao C H, Yang K, Wang X. Airflow simulation in solar greenhouse using CFD model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 166-171 (in Chinese)
- [19] 朝木日勒格. 寒冷干旱地区温室室内温度环境测试分析及模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011
- Chaomurilege. Analysis and simulation of greenhouse temperature environment in cold-arid areas[D]. Huhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [20] 马庆芳. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986
- Ma Q F. *Handbook for Thermophysical Properties* [M]. Beijing: China Agricultural Machine Press, 1986 (in Chinese)
- [21] 冯秀藻, 邓根云, 刘汉中. 中国农业百科全书农业气象卷[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- Feng X Z, Deng G Y, Liu H Z. *China Agricultural Encyclopaedia for Agrometeorology* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春