

## 基于 CFD 的不同走向大跨度保温型温室温度场模拟

方慧<sup>1,2</sup> 杨其长<sup>1,2\*</sup> 张义<sup>1,2</sup> 程瑞锋<sup>1,2</sup> 张芳<sup>1,2</sup> 卢威<sup>1,2</sup> 刘焕<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

2. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

**摘要** 大跨度保温型温室是针对日光温室之间南北间距较大,土地利用效率不高而设计的。该温室可将日光温室南北间距缩减为 2 m 以内,同时具有日光温室的良好保温特征,但一直以来缺乏对该大跨度保温型温室的光温性能评价。本研究利用计算流体力学软件(Computational fluid dynamics,CFD)构建三维稳态温室模型,模拟不同走向对温室光温环境的影响,为温室建设提供理论依据。在模型中采用太阳射线追踪法加载太阳辐射,通过离散坐标辐射模型(Discrete ordinates,DO)模拟热辐射的影响。将模拟结果与试验测量结果进行对比,模型模拟值与实测值绝对偏差在 0.3~2.1 °C 范围内,验证了构建的 CFD 温室模型的准确性。利用已验证的模型模拟结构尺寸完全相同,走向分别为东西与南北的 2 栋温室内的温度场分布情况,比较分析不同时刻(6 个案例)温室温度场差别。模拟结果表明,在上午 10:00 和下午 14:00,2 种走向温室温度差异不明显在正午 12:00,南北走向温室温度比东西走向温室高 2.8 °C。在室温分布均匀性方面,利用 CFD 后处理软件提取 6 个案例在每一节点处的模拟值,统计 6 个案例温室温度的相对标准偏差,结果表明,在早、中、晚的 3 个时间段内,南北走向温室的 RSD 值均低于东西走向温室。综合模拟与测试结果表明,双拱大跨度保温型温室在北方地区应选用南北走向,温室的光照分布、温度分布都优于东西走向。

**关键词** 温室; 计算流体力学; 预测模型; 温度均匀性

**中图分类号** S 625.1

**文章编号** 1007-4333(2017)11-0133-07

**文献标志码** A

## Prediction model on air temperature in large-span greenhouse with different orientation based on CFD

FANG Hui<sup>1,2</sup>, YANG Qichang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, CHENG Ruifeng<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Fang<sup>1,2</sup>, LU Wei<sup>1,2</sup>, LIU Huan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agriculture Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract** In order to increase land utilization efficiency and decrease the necessary distance between two adjacent greenhouses to prevent shading, a south-north large scale greenhouse was designed to substitute conventional east-west direction greenhouse. To assess the performance of the newly designed greenhouse, a prediction model on temporal and spatial variations of air temperature based on the computational fluid dynamics (CFD) technique was established. Discrete ordinates (DO) radiation model was used to simulate the radiation heat transfer in greenhouses. Solar radiation values were calculated by solar ray tracing method. In order to validate the effectiveness of the prediction model, the spatial and temporal distribution values of air temperature were measured and compared with the simulated data. The results showed that the errors between simulated and measured air temperature at the observation points varied from 0.3 to 2.0 °C and the predicted values matched the measured values. The validated CFD model was then used to further analyze the temperature differences in new type greenhouses with south-north and east-west

收稿日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508560); 科技部“863”计划课题(2013AA102407)

第一作者: 方慧, 助理研究员, 主要从事温室环境模拟研究, E-mail: fanghui@caas.cn

通讯作者: 杨其长, 研究员, 博士生导师, 主要从事设施园艺节能研究, E-mail: yangqichang@caas.cn

direction at different time. The simulation results showed that the average indoor air temperature difference in both greenhouses was very small at 10:00 am and 14:00 pm. It was because the sun zenith angle is small during the morning and afternoon, meaning that the solar incident angle is big, and the solar radiation transmissivity is small at 12:00 am. The air temperature in south-north greenhouse was 2.8 °C higher than in the east-west greenhouse at 12:00 am. Relative standard deviation (RSD) was also used to evaluate climate uniformity based on the air temperature distribution. The RSD values of 6 combination scenarios were calculated. The study showed that the south-north greenhouse had lower RSD values compared to the east-west greenhouse meaning more climate uniformity of the south-north greenhouse.

**Keywords** greenhouse; computational fluid dynamics; prediction model; temperature uniformity

日光温室具有节能、高效、低成本等特点,是我国北方地区冬季蔬菜生产中的重要设施,面积达100.1万 $\text{hm}^2$ [1]。但日光温室也存在诸多不足之处,如为避免遮阴,相邻两温室间距较大,导致土地利用率低,仅有30%~45%[2]。此外,温室跨度小,不利于机械化操作,制约了该温室形式的快速发展[3]。

为有效解决上述生产中出现的问题,很多科研、推广单位都在积极研究和探讨提高日光温室土地利用效率和机械化操作水平的措施。崔兴林[4]针对西北气候特点,设计了一种Venlo式一跨双屋脊全PC板连栋温室,由于温室造价高,推广受到限制。周长吉等[5]设计了阴阳型日光温室,并对温室内的光、温、地温、墙体热通量进行了测试分析,确定了阴阳棚内合理的种植模式。佟国红等[6]设计建造了12 m大跨度日光温室,测试该日光温室在沈阳地区无辅助热源情况下的温、光、湿环境及各壁面蓄放热情况。保延福等[7]设计建造了半地下式大跨日光温室2,该温室造价低,提高了土地和热能资源利用率。宋继昌等[8]对半地下式大跨度日光温室进行了改进,提出了该温室的适用条件。魏晓明等[9]设计了前走道日光温室,增加了温室内有效栽培面积。目前在提高土地利用方面主要是考虑提高温室内的有效栽培面积,而温室与温室之间为了避免遮阴温室间距无法缩小,土地利用仍不高。

为进一步提高温室土地利用,周升等[10]设计了一种大跨度保温型温室,相邻温室间距仅为2 m。为测试该大跨度保温型温室的蓄热保温性能,本研究拟构建基于计算流体力学[11](Computational fluid dynamics, CFD)的三维稳态温室模型;在南北走向大跨度保温型温室进行试验测试,验证模型的准确性;利用该模型模拟大跨度温室分别为南北走向和东西走向时的温室内温度分布特点,以期温室结构优化以及温度管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

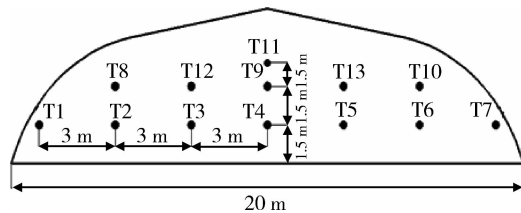
### 1.1 试验温室

试验温室位于北京市顺义区大孙各庄镇中国农业科学院试验基地(40.13°N, 116.65°E)。试验日期为2015-11-25—12-25。试验温室采用大棚型钢骨架结构,长60 m,跨度20 m,脊高5 m,覆盖塑料薄膜的厚度为0.08 mm,温室外保温材料为3 cm厚自防水保温被;温室北墙结构:内层厚24 cm的红砖与外层厚10 cm的聚苯板,温室南墙为双层阳光板。

### 1.2 试验方法

温度测量选用中国计量院生产的铜-康铜热电偶,测量精度为 $\pm 0.2$  °C。太阳辐射强度测量选用美国坎贝尔公司生产的CMP3型太阳辐射传感器,精确度为0.5%,测量范围为0~2 000  $\text{W}/\text{m}^2$ 。温度与太阳辐射数据用数据采集器Data logger (Campbell Scientific, CR1000, USA)自动采集,采集频率为10 s/次,每10 min储存1次平均值。

温室内共13个温度测点,布置于温室跨中,距离地面1.5、3和4 m高度分别布置7、5和1个测点;室外温度传感器布置于距温室北侧2.0 m处(图1)。室外太阳辐射传感器水平布置于温室南侧,距离地面2.5 m。



T1~T13 为温度测点。

T1-T13 are observation points of temperature.

图1 试验温室结构及温度测点分布

Fig. 1 Experimental greenhouse structure and temperature sensors location

## 2 基于 CFD 大跨度温室建模

### 2.1 建模与网格划分

本研究采用 CFD 商用软件 Fluent 15.0 及前处理软件 DesignModeler 和 ANSYS Meshing 对温室进行建模和网格划分。利用 DesignModeler 软件创建 1:1 实体温室,以整栋温室作为计算流域,将实体温室输入到 ANSYS Meshing,在 ANSYS Meshing 中采 Sweep 方法对实体模型进行网格划分,在近壁面处采用 inflation 对网格进行加密处理,共生成 1 487 000 个网格,1 549 593 个节点(图 2)。网格最大偏斜度为 0.56,最小偏斜度为 0.001。温室覆盖层、南北墙和地面均设置为壁面边界条件。试验时间为冬季,室外温度较低,温室通风口为关闭状态,温室内气流较慢,流速主要受热压的影响,因此,采用 Boussinesq 假设<sup>[12]</sup>,即在动量方程中气体的密度是固定不变的,气体热膨胀系数  $\beta$  为  $0.003\ 125\ \text{K}^{-1}$ ,黏度为  $1.789\ 4 \times 10^{-6}\ \text{kg/ms}$ 。

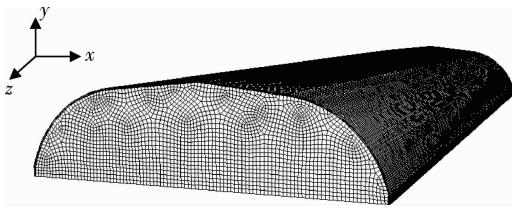


图 2 大跨度保温型温室网格划分

Fig. 2 Grid generated in large span insulation greenhouse

### 2.2 控制方程

温室内的气体流动由质量、动量和能量守恒方程描述。计算时采用标准  $k-\epsilon$  求解,控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 $k$ (湍动能方程)和  $\epsilon$ (耗散率)方程,这些方程由通用方程(1)表示<sup>[13-15]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi\vec{v}) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\vec{v}$ 为速度矢量,  $\text{m/s}$ ;  $\Gamma_{\varphi}$ 为广义扩散系数;  $S_{\varphi}$ 为源项;  $\varphi$ 为通用变量,  $\varphi=1$ 时,该方程为连续性方程(质量守恒方程),  $\varphi=\vec{v}=[uvw]$ 时,该方程为动量守恒方程,  $\varphi=T$ 时为能量守恒方程,其中  $u, v, w$ 是  $\vec{v}$ 在 3 个方向的速度标量,  $T$ 表示温度,  $\text{K}$ 。

### 2.3 辐射模型

太阳辐射为温室提供能量,是影响温室热环境的一个重要因素,在 CFD 模型中选择太阳射线跟踪算法加载太阳辐射模型。在模拟温室各结构表面的辐射强度时选用离散坐标<sup>[16-18]</sup>(Discrete ordinates, DO)辐射模型,DO 模型可以计算所有光学厚度的辐射问题,包括物体表面辐射和半透明介质辐射,在温室模型中将地面和北墙设置为非透明介质,覆盖层和南墙设置为半透明介质,计算方程如式(2):

$$\nabla \cdot (I(\mathbf{r}, \mathbf{s})\mathbf{s}) + (\alpha + \sigma_s) \cdot I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \alpha \cdot n^2 \cdot \frac{\sigma \cdot T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \cdot \phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为位置向量;  $\mathbf{s}$ 为方向向量;  $\mathbf{s}'$ 为散射方向向量;  $\alpha$ 为吸收系数;  $n$ 为折射系数;  $\sigma_s$ 为散射系数;  $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取值为  $5.672 \times 10^{-8}\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $I$ 为辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\phi$ 为相位函数;  $\Omega'$ 为辐射的立体角,  $180^2/\pi^2$ 。

### 2.4 边界条件及材料属性

试验期间,室外温度较低,温室的通风口处于常闭状态,外界边界条件包括室外环境、温室围护结构热物理参数,温室内地面硬化处理,热物理参数按混凝土砖参数设置。试验期间温室内种植番茄,形态低矮,忽略植物对温度的影响。温室覆盖层设置为半透明壁面,地面设置为非透明壁面。温室为南北走向时,北墙设置为非透明壁面,南墙设置为半透明壁面;温室为东西走向时,东、西墙均设置为非透明壁面。所有参数设置见表 1。

表 1 材料参数及边界条件设置

Table 1 Material properties and boundary conditions

材料 Material	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) Density	导热系数/ ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) Coefficient of thermal conductivity	比热容/ ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) Specific heat capacity	光学参数 Optical parameters		发射率 Internal emissivity
				散射系数 Transmissivity	吸收系数 Absorptivity	
覆盖层 Cover	923	0.380	2 300	0.8	0.10	1.0
混凝土砖 Concrete brick	1 965	0.793	1 118	—	0.90	1.0
空气 Air	1.22	0.024	1 006	—	0.02	—

## 2.5 计算方法

对构建的三维模型进行稳态求解,控制方程不考虑与时间相关的瞬态项,仅对控制体积进行空间积分。模型求解选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型,近壁面的模拟采用标准壁面函数动量和湍流动能选用一阶迎风格式。

## 2.6 室外环境

由于试验期间雾霾天气的影响,因此选取距离冬至日最近的典型晴天12月3日的数据进行分析。大跨度保温型温室上午9:00揭开保温被,下午15:30覆盖上保温被。室外温度、水平面太阳辐射强度如图3所示。可以看出,冬季室外温度较低,最

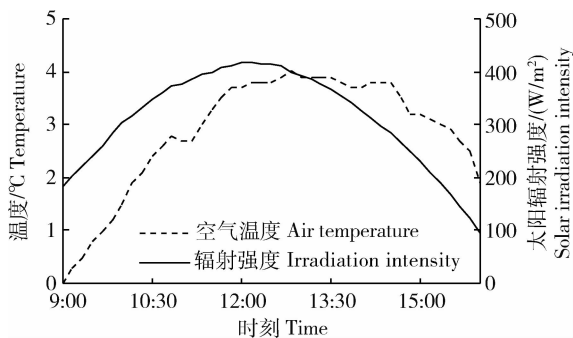


图3 温室外太阳辐射强度和温度

Fig. 3 Outsidesolar irradiation intensity and air temperature

高温出现在中午12:00至下午14:00,温度为3.8~4.0°C,在揭开保温被时间段内,室外平均温度为2.9°C。在中午12:00室外太阳辐射强度最高,达到417 W/m<sup>2</sup>,在揭开保温被时间段内,室外太阳辐射强度平均值为325.8 W/m<sup>2</sup>。在10:00时刻室外温度为1.5°C,太阳辐射强度为304.2 W/m<sup>2</sup>;12:00时刻室外温度为3.7°C,太阳辐射强度为417.1 W/m<sup>2</sup>;14:00时刻室外温度为3.7°C,太阳辐射强度为326.4 W/m<sup>2</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 CFD模型预测与验证

选取2015年12月3日正午12:00温室内实测温度值与模拟温度值进行对比,验证模型的准确性,结果见图4。试验测量值与模型模拟值的吻合程度用均方根误差(RMSE)、最大相对误差(MRE)、平均相对误差(ARE)量化表示。由图4可见模拟值与实测值吻合度较好, RMSE为1.3°C, MRE为9.6%, ARE为4.3%。模型模拟值与实测值绝对偏差为0.3~2.1°C,主要原因是大跨度保温型温室为两侧上卷式卷被模式,当保温被卷到温室顶端后,对室内有一定遮阴,而在模型中并未考虑保温被遮阴对温度的影响。

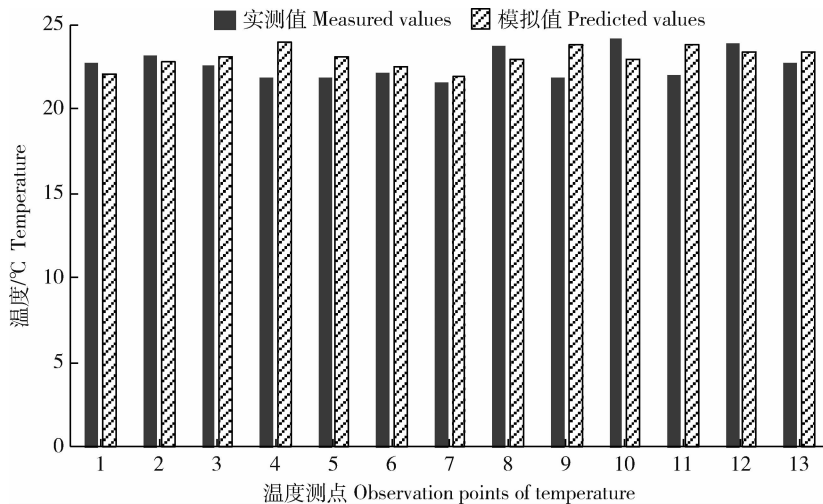


图4 温度模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of predicted and measured air temperature

## 3.2 不同走向温室气温的空间分布

### 3.2.1 不同时刻温室温度分布模拟

图5为温室纵向(Z轴)上3个典型横截面的温

度云图,分别位于温室跨中和距离跨中±25 m处。可见上午10:00和下午14:00,2种走向的大跨度温室温差较小,在正午12:00南北走向温室室内温度

均高于东西走向温室。

揭开保温被 1 h 后,即 10:00 温室内温度梯度变化不明显(图 5(a)),东西走向温室内平均温度为 18.1 °C,南北走向温室内平均温度为 18.9 °C,比东西走向温室高 0.9 °C。南北走向温室北墙内侧为 12 cm 厚砖墙,吸收太阳辐射后温度升高,墙体内侧与空气进行对流换热,导致靠近温室北侧的温度较高。

正午 12:00 时刻温室内温度明显高于 10:00 时刻(图 5(b))。太阳高度角增加,对东西走向温室内

温度分布影响较大,呈现南高北低的特点,主要原因是太阳高度角上升后温室北面接收到的直射太阳辐射减少,以散射辐射为主,此时,温室内的平均温度为 21.2 °C。南北走向温室内温度在纵轴上的变化梯度与 10:00 时刻一致,呈现北高南低的特点,温室内平均温度为 24.0 °C,比东西走向温室温度高 2.8 °C。

下午 14:00 时刻温室温度分布特点与 10:00 时刻相反(图 5(c)),东西走向温室平均温度为 20.5 °C,南北走向温室平均温度为 19 °C,比东西走向温室高 1.5 °C。

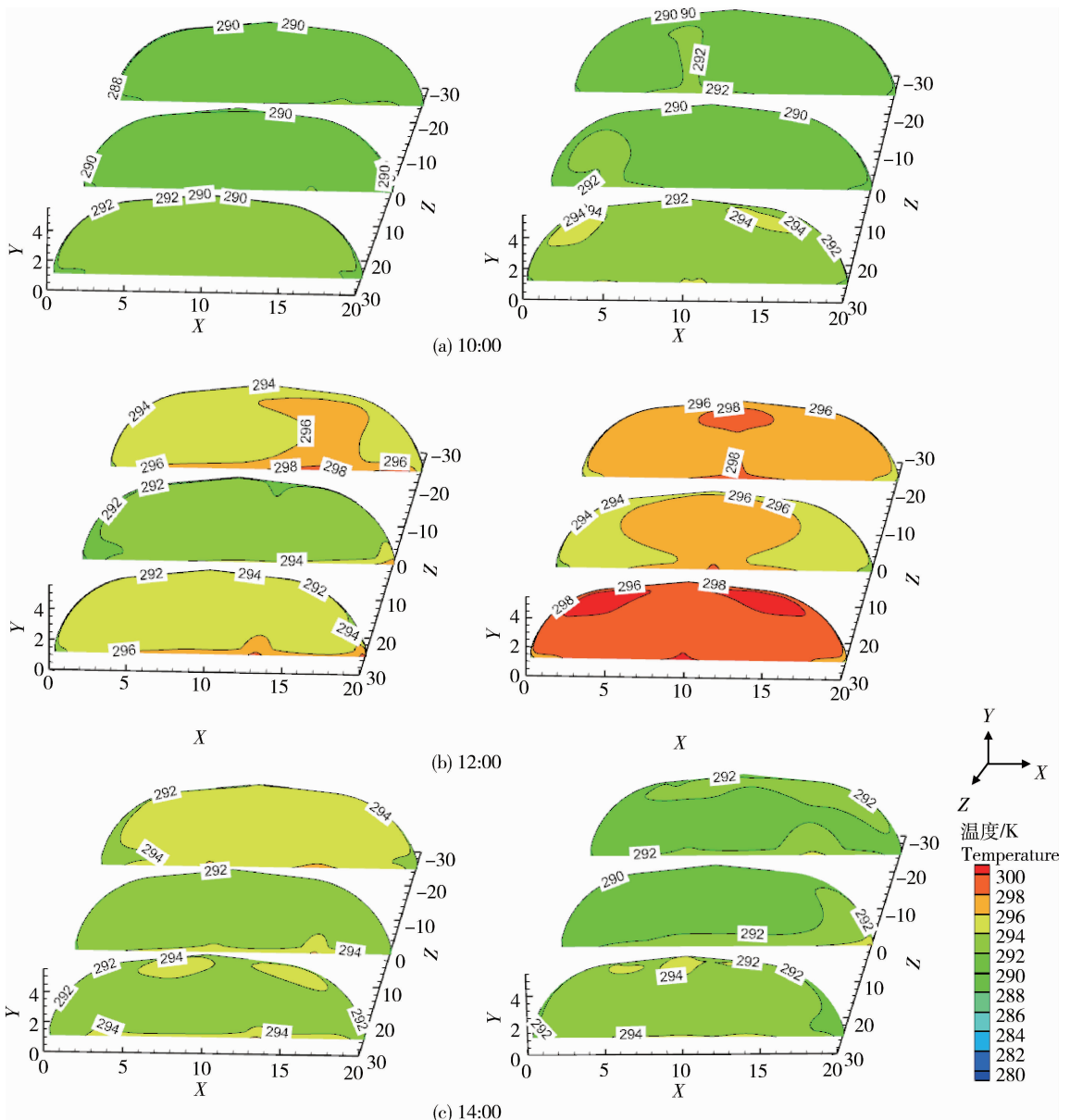


图 5 不同时刻 Z=0、-25、25 m 截面处温室温度分布云图

Fig. 5 Air temperature contours at Z=0, -25 and 25 m sections at different time, respectively

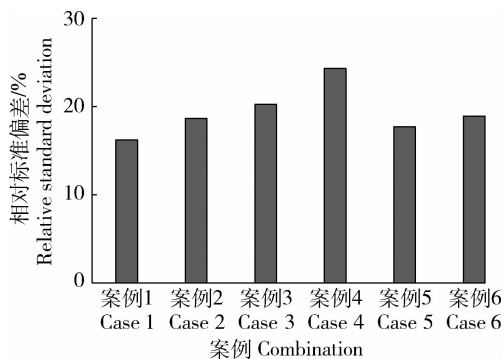
### 3.2.2 温度分布均匀性分析

相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD),也称变异系数,是标准偏差与计算结果算术平均值的比值,广泛用于分析气候的均匀性<sup>[19]</sup>,其值能反应所有观测点的均匀特性,值越小说明越均匀。

$$RSD = \left[ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}})^2}{n-1}} / \overline{\text{OBS}} \right] \times 100\%$$

式中: $n$ 为样本数; $\text{OBS}_i$ 为观测值; $\overline{\text{OBS}}$ 为 $\text{OBS}_i$ 的平均值。

通过CFD中自带的后处理软件选取温室内部空气域每一节点的温度值,共1 048 571个节点,计算其RSD值,模拟6种案例下温室RSD统计结果见图6。南北走向和东西走向温室RSD值在10:00、12:00和14:00分别为16.3%和18.7%、20.3%和24.3%、17.7%和19.0%。温室为南北走向时的RSD值小于东西走向温室,说明南北走向温室温度分布均匀性优于东西走向温室。



案例1:南北走向温室,10:00;案例2:东西走向温室,10:00;案例3:南北走向温室,12:00;案例4:东西走向温室,12:00;案例5:南北走向温室,14:00;案例6:东西走向温室,14:00。

Case 1, greenhouse in north-south direction at 10:00; Case 2, greenhouse in east-west direction at 10:00; Case 3, greenhouse in north-south direction at 12:00; Case 4, greenhouse in east-west direction at 12:00; Case 5, greenhouse in north-south direction at 14:00; Case 6, greenhouse in east-west direction at 14:00.

图6 6种案例温度分布均匀性分析

Fig. 6 Analysis of temperature uniformity with 6 combinations

## 4 结论

1)利用CFD建模方法,结合室外环境参数,建立了大跨度保温型温室三维数值模型,在北京地区

南北走向的大跨度保温型温室内进行了现场试验,对模型的有效性和可靠性进行了验证。试验结果表明,模拟值与实测值均方根误差为1.3℃,最大相对误差为9.6%,平均相对误差为4.3%,模型模拟值与实测值绝对偏差为0.3~2.1℃,所建立的模型能准确地预测温室内温度。

2)该模型模拟了南北走向和东西走向温室分别在10:00、12:00和14:00时刻温室内的温度分布。在10:00和14:00,2种走向温室内温度差异不明显。在12:00,南北走向温室内平均温度比东西走向温室高2.8℃。3个时间点南北走向温室温度均匀性均优于东西走向温室。

本研究所建立的CFD模型不仅能预测不同室外环境条件下温室内气温空间分布,而且能预测温室不同走向时室内气温空间分布,对大跨度保温型温室的建造具有一定的参考价值。由于该模型并未考虑作物蒸腾,因此,需进一步研究典型园艺作物的蒸腾作用对温室内温度空间分布的影响,优化CFD数值模型,使模拟结果更加精确。

## 参考文献 References

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2013  
Editorial Board of China Agriculture Yearbook. *China Agriculture Yearbook* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese)
- [2] 周长吉,刘晨霞. 提高日光温室土地利用效率的方法评析[J]. 中国果菜,2009(5):16-20  
Zhou C J, Liu C X. Analysis on the methods of improving the land use efficiency in solar greenhouse [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2009(5):16-20 (in Chinese)
- [3] 周升,张义,程瑞锋,杨其长,方慧,周波,卢威,张芳. 大跨度主动蓄能型温室温湿环境监测及节能保温性能评价[J]. 农业工程学报,2016,32(6):218-225  
Zhou S, Zhang Y, Cheng R F, Yang Q C, Fang H, Zhou B, Lu W, Zhang F. Evaluation on heat preservation effects in micro-environment of large-scale greenhouse with active heat storagesystem [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(6):218-225 (in Chinese)
- [4] 崔兴林,陈学红,刘峰. 西北 Venlo 式一跨双屋脊全 PC 板智能化连栋日光温室建造技术[J]. 现代农村科技,2011(16):50-52  
Cui X L, Chen X H, Liu F. Construction technology of Venlo type solar greenhouse covered by PC material with single span and double ridge [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2011(16):50-52 (in Chinese)
- [5] 苏东屏,王铁良,李明,孟少春. 阴阳结合型日光温室的规划与

- 设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 138-141
- Su D P, Wang Y L, Li M, Meng S C. Design of solar greenhouse of type combining light with shade[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(2): 138-141 (in Chinese)
- [6] 佟国红, 李天来, 王铁良, 山口智治, 白义奎. 大跨度日光温室室内微气候环境测试分析[J]. 华中农业大学学报, 2004, 12(35): 67-73
- Tong G H, Li T L, Wang Y L, Tomoko Y O, Bai Y K. Experimental research on microclimate environment in a large-scale sunlight greenhouse [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2004, 12(35): 67-73 (in Chinese)
- [7] 保延福, 陈来生. 青海高原大跨度半地下式日光温室建造技术及效果评价[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(34): 13421-13422
- Bao Y F, Chen L S. Construction technology and effect evaluation of large span and semi underground solar greenhouse in Qinghai [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2013, 41(34): 13421-13422 (in Chinese)
- [8] 宋继昌. 半地下式大跨度日光温室建造中存在的问题与改进措施[J]. 现代农业科技, 2013(18): 199
- Song J C. Problems and improvements of construction technology about semi underground large span solar greenhouse[J]. *Modern Agriculture Science and Technology*, 2013(18): 199 (in Chinese)
- [9] 魏晓明, 槽楠. 非耕地日光温室的建筑设计[J]. 温室园艺, 2014(2): 36-37
- Wei X M, Cao N. Solar greenhouse construction and design technology in non-arable land [J]. *Greenhouse and Horticulture*, 2014(2): 36-37 (in Chinese)
- [10] 周升, 张义, 程瑞锋, 杨其长, 方慧, 周波, 卢威, 张芳. 大跨度主动蓄能型温室温湿环境监测及节能保温性能评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 218-225
- Zhou S, Zhang Y, Cheng R F, Yang Q C, Fang H, Zhou B, Lu W, Zhang F. Evaluation on heat preservation effects in micro-environment of large-scale greenhouse with active heat storage system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 218-225 (in Chinese)
- [11] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- Wang F J. *Computational Fluid Dynamics Analysis: the Principle and Application of CFD Software* [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004 (in Chinese)
- [12] 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 陈教料, 陈晓. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 153-158
- Wu F Q, Zhang Z, Xu F, Chen J L, Chen X. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 153-158
- [13] 程秀花. 温室环境因子时空分布 CFD 模型构建及预测分析研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011
- Cheng X H. Prediction and CFD modeling for greenhouse microclimates temperature distributions[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011 (in Chinese)
- [14] 程秀花, 毛罕平, 倪军. 风速对温室内气流分布影响的 CFD 模拟及预测[J]. 农机化研究, 2010, 32(12): 15-18
- Cheng X H, Mao H P, Ni J. CFD simulations and predicts for effect of external airflow speeds on airflow profiles inside venlo glasshouse [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(12): 15-18 (in Chinese)
- [15] 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 倪军, 李本卿. 栽有番茄的玻璃温室内气流场分布 CFD 数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(5): 510-514
- Cheng X H, Mao H P, WU D L, Ni J, Li B Q. CFD simulations of airflow distributions inside glasshouse with tomato crops [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2010, 31(5): 510-514 (in Chinese)
- [16] Bournet P E, Ould Khaoua S A, Boulard T. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in multi-span glasshouse using a bi-band radiation model [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(2): 224-234
- [17] Fidasos D K, Baxevanou C A, Bartzanas T, Kittas C. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(7): 1380-1386
- [18] Kim K, Yoon J, Kwon H, Han J, Son J E, Nam S, Giacomelli G, Lee I. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(2): 245-255
- [19] Dodge Y. *The Oxford Dictionary of Statistical Terms* [M]. New York: Oxford University Press, 2003

责任编辑: 刘迎春