中国农业大学学报 2024,29(5):115-124
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王伟,方慧,伍纲,程瑞锋,张义,袁余. 基于CFD模型的双膜大跨度拱棚热环境模拟[J]. 中国农业大学学报,2024,29(05):115-124.
WANG Wei, FANG Hui, WU Gang, CHENG Ruifeng, ZHANG Yi, YUAN Yu. Thermal environment simulation in a double-film large-span greenhouse based on CFD model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 115-124.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.11

基于CFD模型的双膜大跨度拱棚热环境模拟

王 伟[1,2] 方 慧[1,2*] 伍 纲[1,2] 程瑞锋[1,2] 张 义[1,4] 袁 余[3]

(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. 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081;
3. 广东省农业科学院 设施农业研究所,广州 510640;
4. 中国农业科学院 西部农业研究中心,新疆 昌吉 831100)

摘 要 为探明多层覆盖对大跨度拱棚典型季节热性能的影响,采用计算流体力学(CFD)方法构建双膜大跨度拱棚模型,探究夏季无风和冬季有风2种较为极端环境下拱棚内热环境的分布规律,并与单膜大跨度拱棚进行对比。结果表明:拱棚内温度模拟值与实测值的平均相对误差为1.53%,均方根误差0.75 ℃,构建的CFD模型可准确模拟双膜大跨度拱棚内的温度分布;夏季工况下双膜大跨度拱棚在缓冲区域会产生高温积聚,导致双膜大跨度拱棚平均温度比单膜大跨度拱棚高约1 ℃;冬季工况下双膜大跨度拱棚内外层空间温差较大,双膜大跨度拱棚平均温度比单膜大跨度拱棚高5.1~10.6 ℃。综上,双膜大跨度拱棚更适用于寿光地区的气候环境。

关键词 双膜大跨度拱棚; CFD模型; 热环境模拟; 冬季保温性能

中图分类号 S625 **文章编号** 1007-4333(2024)05-0115-10 **文献标志码** A

Thermal environment simulation in a double-film large-span greenhouse based on CFD model

WANG Wei[1,2], FANG Hui[1,2*], WU Gang[1,2], CHENG Ruifeng[1,2], ZHANG Yi[1,4], YUAN Yu[3]

(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 Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;
3. Institute of Facility Agriculture, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;
4. Western Agriculture Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China)

Abstract To investigate the influence of multi-layer coverage on the typical seasonal thermal performance of large-span greenhouse, a double-film large-span greenhouse model was constructed based on computational fluid dynamics (CFD) model. The distribution law of the internal heat environment in the greenhouse under two extreme environments of no wind in summer and wind in winter was investigated and were then compared and analyzed with the thermal environment distribution of a single-film greenhouse. The results show that: The constructed CFD model accurately represents the temperature distribution inside the double-film large-span greenhouse, with an average relative error of 1.53% and a root mean square

收稿日期: 2023-09-21
基金项目: 北京市科技计划(Z211100004621002);内蒙古自治区科技计划(2022YFDZ0086);中央级公益性科研院所基本科研业务费(Y2023PT22);中国农业科学院科技创新工程(CAAS-IEDA-TO7);宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01047);"天池英才"引进计划
第一作者: 王伟(ORCID: 0000-0001-6049-9649),硕士研究生,E-mail: wangwei_0537@163.com
通讯作者: 方慧(ORCID: 0000-0002-0795-5358),副研究员,主要从事设施环境模拟研究,E-mail: fanghui@caas.cn

error of 0.75. During summer conditions, the double-film large-span greenhouse shows higher temperature accumulation in the buffer area, leading to an average temperature of about 1 °C higher than that of the single-film greenhouse. Moreover, during winter conditions, the double-film large-span greenhouse achieves a larger winter difference inside and outside, with an average temperature 5.1 °C to 10.6 °C higher than that of the single-film greenhouse. To sum up, the double-film large-span greenhouse is more suitable for the climatic environment of the Shouguang area.

Keywords double-film large-span greenhouse; CFD model; thermal environment simulation; winter insulation performance

塑料大棚是我国主要的园艺设施,具有适应地域广、造价低等优点[1]。传统的单层塑料大棚单体面积较小,不利于机械化操作,促使塑料大棚逐渐向大跨度方向发展[2]。但塑料大棚的大型化使得围护结构面积增大,散失热量增加[3]。已有研究[4-6]表明,增加多层覆盖对温室的保温性能具有累加效应,能有效减少温室热量散失。因此,研究多层覆盖对大跨度拱棚典型季节热性能的影响,对该类型温室的应用性能评价具有重要参考意义。

目前关于温室热性能的研究主要以试验测试为主,测试方法是在温室内均匀布置传感器,利用采集的数据分析温室内热环境:1)杨定伟等[7]采集并对比了不同墙体材料的装配式日光温室的热环境,发现装配式土模块日光温室的保温、蓄热性能最优;2)郄丽娟等[8]通过布点测量发现,与黏土砖墙日光温室比,装配式异质复合墙体日光温室保温性优,白天升温更快;3)陈帆等[9]对外保温连栋温室进行环境数据监测分析,发现外保温连栋温室白天温升略低于文洛型连栋温室,夜间室内气温更高、分布更均匀。随着CFD技术的发展,已有研究将该技术应用于温室热环境模拟:1)于威等[10]利用CFD方法对比了两连跨和单跨日光温室热环境,发现两连跨日光温室气温波动更小,热环境调节能力具有明显的提升;2)方慧等[11]构建了不同走向的大跨度保温型温室CFD模型,研究发现在北方地区该温室南北走向温度分布优于东西走向;3)Saberian等[12]利用CFD模拟了连廊式中空PC板温室的热环境,发现该温室夏季存在过热问题,对主动通风系统依赖性较强。上述研究对不同结构温室的热环境进行了分析与评价,为新结构温室的应用提供了理论依据,但目前还缺乏双膜大跨度拱棚的典型季节热环境相关研究。

本研究拟构建双膜大跨度拱棚CFD模型,模拟该拱棚热环境分布特点,并通过与单膜拱棚热环境的对比,评价夏季降温、冬季保温性能以及温度分布均匀性情况,以期为该拱棚在山东寿光地区的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 双膜大跨度拱棚结构参数

双膜大跨度拱棚(简称双膜拱棚)位于山东省寿光市现代农业高新产业园(36°90′(N),118°85′(E))。该拱棚为南北走向,长度为280 m,外棚跨度20 m,脊高6 m,加上顶部通风口总高7 m,内棚跨度18 m,脊高5 m,内棚膜与外棚膜间距为1 m。由于拱棚面积较大,在仿真计算时为减少计算量,选取拱棚中间45 m长度区域作为计算流域。对照单膜拱棚结构参数与双膜拱棚的外棚参数相同。

1.2 数值模拟设置

1.2.1 模型构建及网格划分

运用Workbench软件Space Claim模块构建双膜拱棚几何模型。以拱棚的东南角为模型原点O(0,0,0),正西方向为x轴正向,正北方向为z轴正向,垂直向上为y轴正向,同时选取拱棚模型5倍大小的空间区域作为计算外流域(250 m×100 m×35 m)[11]。利用Workbench Mesh模块进行网格划分,对拱棚区域进行网格加密,网格总单元数为132万,按照EquiAngle Skewness标准对网格质量进行控制,符合计算要求,可以进行后续模拟。

1.2.2 边界条件设置

设置外流域的东面和南面为速度入口(velocity-inlet),西面和北面为压力出口(pressure-outlet),顶面设置为对称面(symmetry),地面和温室棚膜设置为壁面(wall)边界条件,其中地面为对流换热壁面(convection),棚膜为耦合传热壁面(coupled),温室通风口设置为内部面(interior)。材料属性设置见表1[13-14]。

表 1　拱棚内材料的热物性参数

Table 1　Thermal physical parameters of greenhouse materials

材料 Material	比热容/(J/(kg·K) Specific heat capacity	导热系数/(W/(m·K)) Coefficient of thermal conductivity	吸收系数 Absorption coefficient	散射系数 Scattering coefficient	发射率 Emissivity
空气 Air	1 006.43	0.024 2	0.2	0	—
土壤 Soil	2 200	2	0.5	1	0.9
薄膜 Plastic film	1 465	0.34	0.2	0	0.85

1.2.3　模型求解

求解器选择ANASYS FLUENT 2021R2，进行三维稳态求解，离散格式为二阶迎风格式，湍流模型选用标准k-epsilon模型，开启能量模型，为了加载太阳辐射对拱棚热环境的影响，选用DO辐射模型和Solar Ray Tracing模型，考虑空气热浮升力的影响，采用Boussinesq模型[15]，设置操作温度为外界环境温度，使用SIMPLE算法进行求解，求解时能量残差收敛标准设为10^{-6}，其他变量残差收敛标准设为10^{-4}，已有研究[16]表明，此收敛标准下的仿真结果具有可靠的准确度。

CFD模型求解时遵循基本控制方程，即连续性方程、动量方程和能量方程[17]。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u_i)=0$$

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u v)=\mathrm{div}(\mu \mathrm{grad} u)-\frac{\partial p}{\partial x}+S_u$$

$$\frac{\partial(\rho \nu)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \nu v)=\mathrm{div}(\mu \mathrm{grad} \nu)-\frac{\partial p}{\partial y}+S_\nu$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \omega v)=\mathrm{div}(\mu \mathrm{grad} \omega)-\frac{\partial p}{\partial z}+S_\omega$$

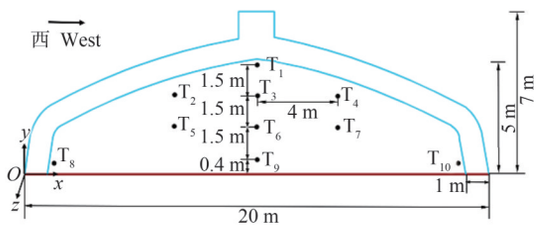
能量方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho v T)=\mathrm{div}\left(\frac{k}{C_p}\mathrm{grad}\, T\right)+\frac{S_T}{C_p}$$

式中：ρ为空气密度，kg/m^3；t为时间，s；v为速度矢量，m/s；u,ν,ω分别速度在x,y,z方向上的分量，m/s；μ为空气湍流粘度，kg/(m·s)；C_p为空气比热容，J/(kg·K)；T为空气温度，℃；k为空气的导热率，W/(m·K)；S_T为能量源项，W。

1.3　环境数据测量

试验中选取拱棚z=22.5 m截面，在y=4.9 m高度布置1个测点T_1，在y=0.4、1.9、3.4 m高度各布置3个测点，共9个测点$T_2,T_3,\cdots,T_{10}$，具体布置见图1。



$T_1,T_2,\cdots,T_{10}$为气温测点。

$T_1,T_2,\cdots,T_{10}$ are the measurement points of air temperature.

图 1　双膜拱棚z=22.5 m截面气温测点布置

Fig. 1　Layout of air temperature measurement points of z=22.5 m section in double-film greenhouse

室内环境数据采用美国Onset公司生产的HOBO U14-001型温度记录仪测量，空气温度测量范围为−20～70 ℃，精度±0.35 ℃。室外气象数据采用美国Onset公司生产的HOBO U30小型自动气象站测量，空气温度测量范围为−40～75 ℃，测量精度±0.35 ℃；风速测量范围为0～45 m/s，测量精度±1.1 m/s；太阳辐射测量范围为0～1 280 W/m^2，测量精度10 W/m^2。

1.4　拱棚热环境评价参数

1.4.1　夏季评价参数

由于夏季工况通风口全开启，利用自然通风进行降温，因此选用降温需求和温度均匀性作为拱棚内热环境的评价参数。降温需求计算公式[18]如下：

$$Y_c=\frac{100(T_i-T_0)}{A} \tag{1}$$

式中：Y_c为降温需求，℃/m^2；T_i为作物冠层平均温度，℃；T_0为室外温度，℃；A为通风面积，m^2。

温度均匀性采用温度不均匀度[19]评估：

$$\theta=\frac{1}{\bar{t}}\sqrt{\frac{1}{n_1-1}\sum_{1}^{n_1}(t_i-\bar{t})^2} \tag{2}$$

式中：θ 为温度不均匀度；$\bar{t}$ 为各测点温度算术平均值，℃；t_i 为各测点温度，℃，$i=1,2,\cdots,n_1$，n_1 为测点个数。

为客观、准确的评价温度均匀性，本研究在拱棚 $y=1$ m 截面上均匀选择 1 000 个取样点，用于温度不均匀度计算。

1.4.2 冬季评价参数

仿真计算中，单、双膜拱棚热源相同，都来自于相同强度的太阳辐射，因此造成两者温度环境差异较大的原因应该同热量流失途径有关，为进一步探究双膜拱棚与单膜拱棚的保温性能差异，选用单、双膜拱棚种植区域在棚膜处的失热量，以及温度不均匀度作为拱棚热环境评价参数。

单膜拱棚围护结构处热通量计算公式[20]为：

$$\varphi=A'K(T_{in}-T_{out}) \tag{3}$$

式中：φ 为拱棚内空气与围护结构交换的热量，W；A' 为围护结构的面积，m²；K 为围护结构的传热系数，W/(m²·K)；T_{in} 为拱棚内气温，℃；T_{out} 为室外气温，℃。

双膜拱棚围护结构处热通量分为 2 部分：一部分是内层拱棚种植区域（简称种植区域）在内层棚膜处的热交换；另一部分是两层棚膜之间的区域（缓冲区域）在外层棚膜处的热交换。计算公式为：

$$\varphi_{in}=A'_{in}K(T_{in}-T_{mid}) \tag{4}$$

$$\varphi_{out}=A'_{out}K(T_{mid}-T_{out}) \tag{5}$$

式中：φ_{in} 为种植区域空气与缓冲区域空气在内层棚膜处交换的热量，W；A'_{in} 为内层棚膜的面积，m²；T_{mid} 为缓冲区域的气温，℃；φ_{out} 为缓冲区域空气与外界空气在外层棚膜处交换的热量，W；A'_{out} 为外层棚膜的面积，m²。

2 结果与分析

2.1 初始条件选择及 CFD 模型验证

本研究利用 Meteonorm 气象站[21]中寿光地区 2000—2019 年的环境数据整理得到图 2。该地区一年中气温最高月份为 6—8 月，这 3 个月平均风速较低，其中 8 月份平均风速最低，仅为 2.0 m/s。实际生产中，双膜拱棚夏季降温措施为自然通风，受外界风速影响较大，在外界风速较低时，会影响双膜拱棚的通风降温效果，造成室内高温，因此夏季工况选择无风情况对双膜拱棚进行模拟。冬季则更关注双膜拱棚的保温性能，12 月—次年 2 月该地区温度最低，其中冬至日为一年中太阳高度角最低、日照时长最短的一天，冬季工况选择冬至日对双膜拱棚进行模拟。

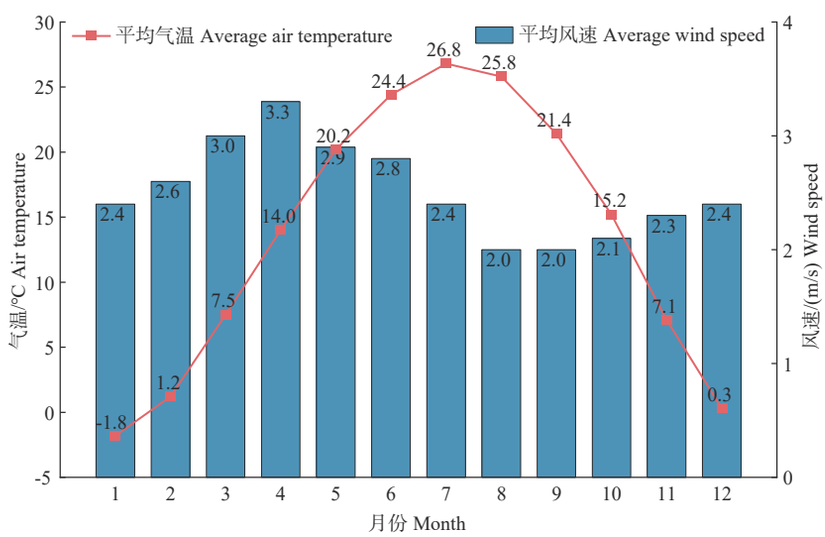


图 2 寿光地区月平均气温和风速

Fig. 2 Monthly average air temperature and wind speed in Shouguang region

拱棚外气象数据由 HOBO U30 小型自动气象站测量采集，结果见表 2。8 月 4 日 8:00 时刻外界风速为 0 m/s，为检验模型能否准确计算空气热浮升力驱动下的拱棚内热环境分布，选择此时刻的环境数据进行仿真计算和模型验证。由于冬至日 8:00 和 16:00 外界太阳辐射值较低，只有不到 30 W/m²，

选取冬至日9:00、12:00和15:00进行仿真计算。

各测点温度模拟值与测量值对比结果见图3：绝对误差为0.35～1.84 ℃，均方根误差0.75 ℃，最大相对误差5.03%，平均相对误差1.53%。总体看，CFD温度模拟值与实测值吻合度良好，模型可准确模拟双膜拱棚内温度分布情况。

表2　拱棚外气象数据

Table 2　Meteorological data outside the greenhouse

日期 Date	时刻 Time	温度/℃ Temperature	风速/(m/s) Wind speed	风向/(°) Direction	太阳辐射/(W/m²) Solar radiation
8月4日	8:00	32.3	0	—	333.8
	12:00	35.5	1.1	270	546.7
	16:00	37.2	1.0	225	158.0
12月22日	9:00	−4.2	2.0	157	212.9
	12:00	−2.3	2.9	157	433.2
	15:00	−2.6	3.3	157	216.6

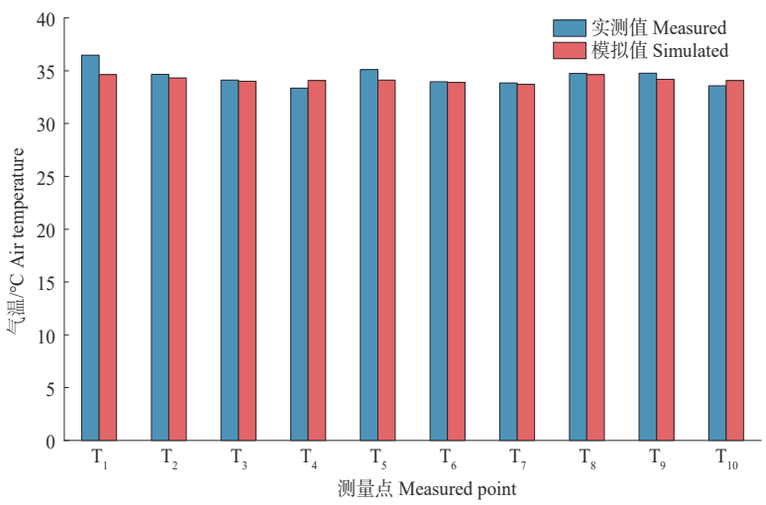


图3　双膜拱棚内气温实测值与模拟值

Fig. 3　Measured and simulated air temperature in double-film greenhouse

2.2　夏季单、双膜覆盖对拱棚温度场的影响

为探究夏季双膜拱棚热环境分布规律，选取z=22.5 m、x=10 m和y=1 m截面进行分析，结果见图4。3个时刻温度分布均为东高西低，缓冲区域出现了明显的高温积聚现象，高温面积随时间变化呈现先增加后减少的趋势，12:00高温面积少量扩散到种植区域。在双膜拱棚高度方向上，温度分布呈现低高低的规律，按照热空气上升原理，温度最高区域应该出现在双膜拱棚的顶部，但是由于此区域离顶部东西侧通风口较近，空气与外界较冷空气进行替换，导致此区域温度不是最高温度。在y=1 m高度平面上，相比于南北两侧，中间位置的低温区域面积更小，说明越靠近中间位置，拱棚内温度越高。

由单、双膜拱棚夏季温度云图(图4和图5)对比可知，3个时刻双膜拱棚高温区域面积均大于单膜拱棚，利用CFD软件计算空间平均温度，发现3个时刻双膜拱棚平均温度比单膜拱棚分别高0.6、0.7和0.6 ℃，说明双膜拱棚在自然通风情况下，散热能力弱于单膜拱棚，更容易造成热量积聚。

夏季热环境评价结果见图6。双膜拱棚3个时刻的降温需求均高于单膜拱棚，降温需求分别高0.04、0.07、0.04 ℃/m²。这是由于双层棚膜覆盖增加了空气流通阻力，阻碍了冷热空气交换，导致在夏季产生更多的降温需求。单、双膜拱棚温度不均匀度在12:00时刻最大，温度不均匀度分别为1.1×10^{-2}和1.4×10^{-2}，表明此时刻的拱棚内温度分布最不均匀，并且3个时刻双膜拱棚温度不均匀度均大于单膜拱棚。

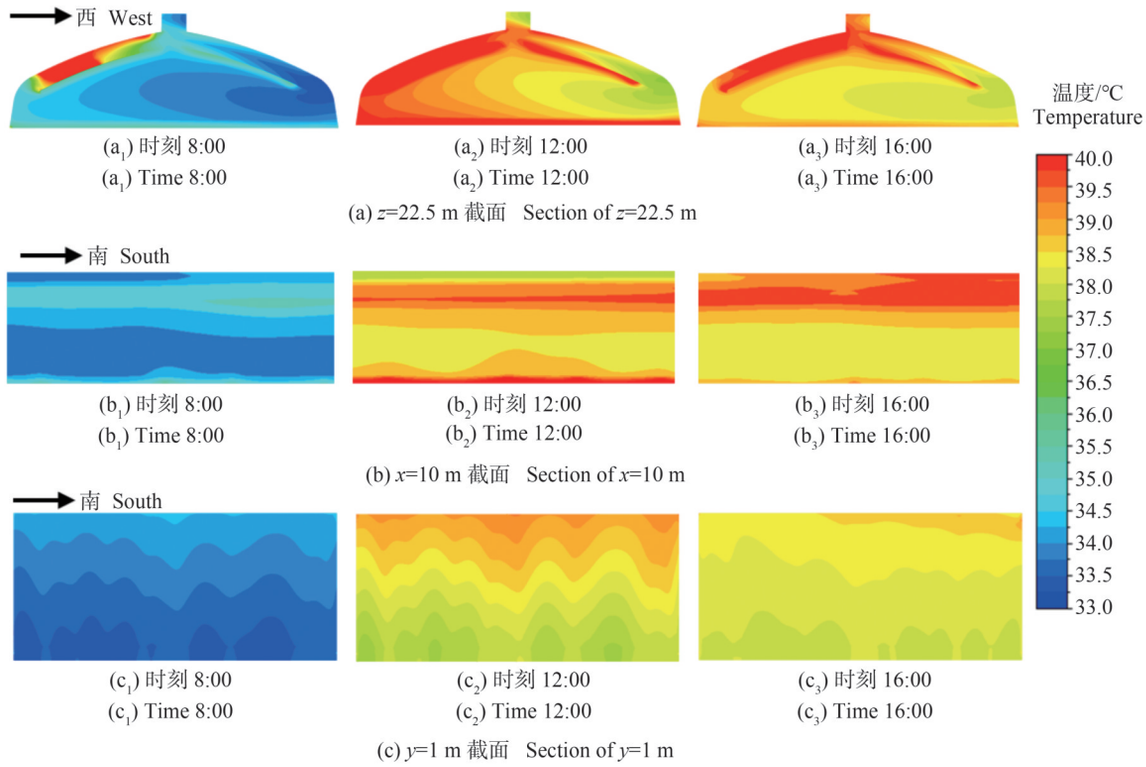


图 4 夏季双膜拱棚不同截面及不同时刻温度分布云图

Fig. 4 Cloud chart of temperature distribution of double-film greenhouse with different sections and different times in summer

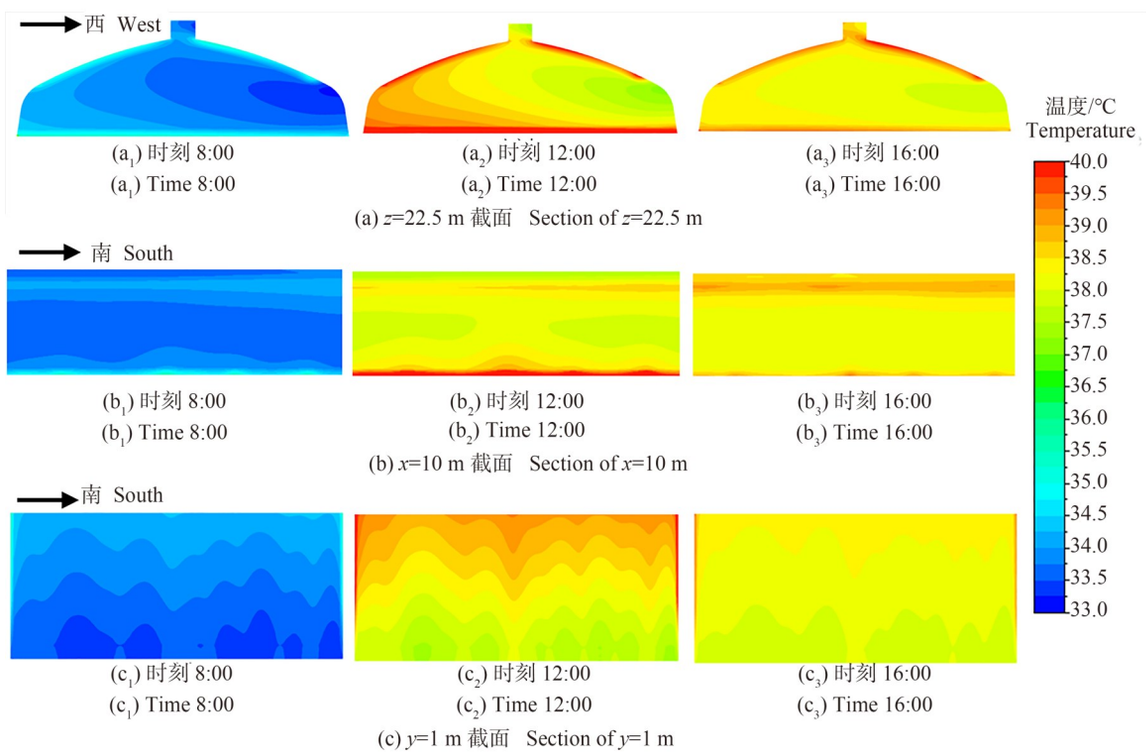


图 5 夏季单膜拱棚不同截面及不同时刻温度分布云图

Fig. 5 Cloud chart of temperature distribution of single-film greenhouse with different sections and different times in summer

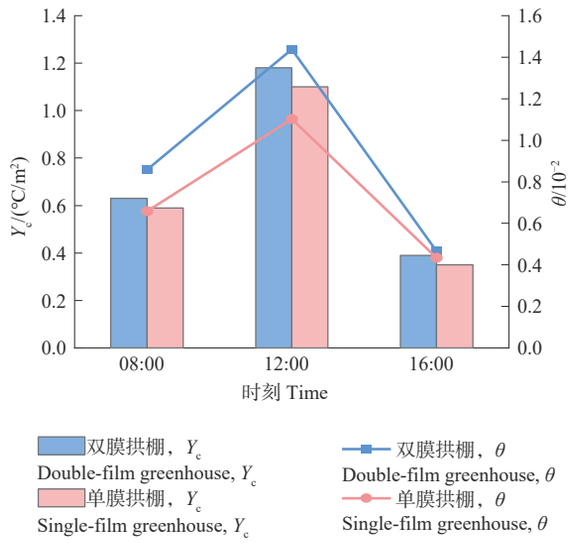


图 6　夏季单、双膜拱棚降温需求(Y_c)及温度不均匀度(θ)

Fig. 6　Cooling demand (Y_c) and temperature unevenness (θ) of single-film greenhouse and double-film greenhouse in summer

2.3　冬季单、双膜覆盖对拱棚温度场的影响

冬季温度云图截面选取与夏季相同。从冬季双膜拱棚温度云图(图 7)可以看到，12:00时刻拱棚内温度最高达到约 30 ℃，而 9:00 和 15:00 拱棚内温度最高只有不到 20 ℃，一天中不同时刻温差较大。缓冲区域温度低于种植区域温度，两者之间以内层棚膜为界，3 个时刻均在边界两侧具有明显的温度梯度。在水平方向上，拱棚内温度沿四周向中间逐渐升高，温度最高区域出现在拱棚中间位置，温度最低区域出现在拱棚南北两侧。

由单、双膜拱棚冬季温度云图(图 7 和图 8)对比可知，单膜拱棚温度环境与双膜拱棚的缓冲区域相似，但明显低于双膜拱棚的种植区域温度，3 个时刻双膜拱棚种植区域平均温度比单膜拱棚分别高 6.5、12.2 和 6.9 ℃，冬季双膜拱棚的温度环境明显优于单膜拱棚。

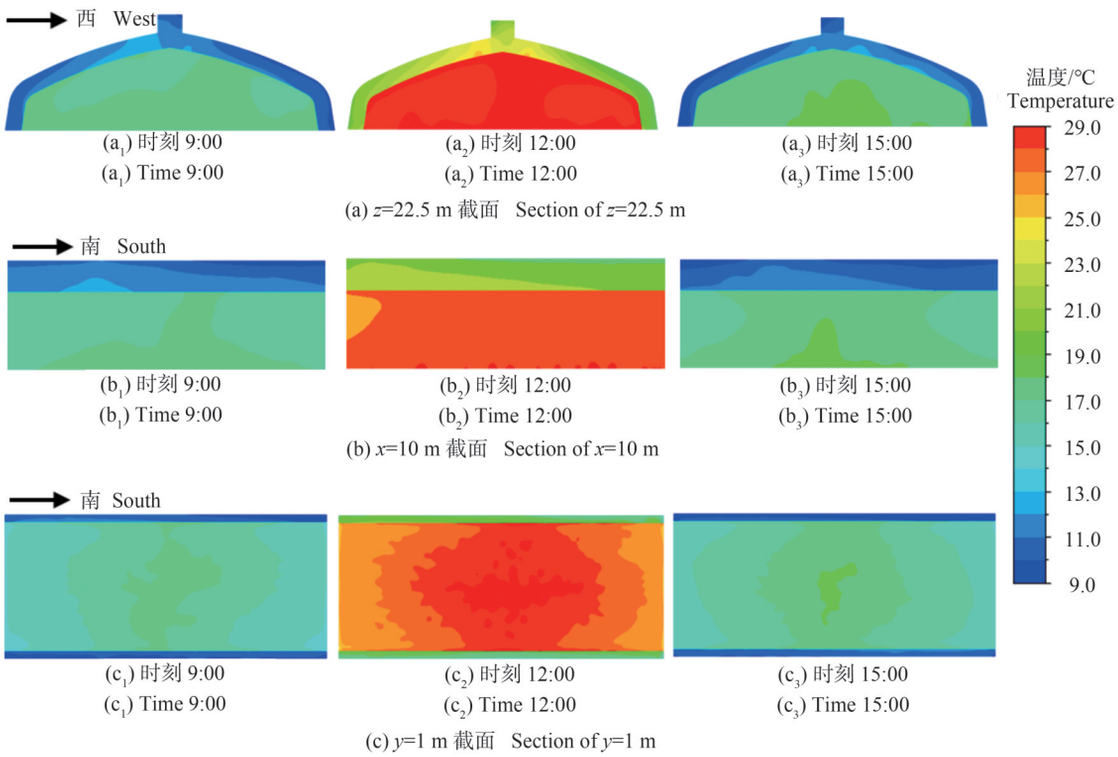


图 7　冬季双膜拱棚不同截面及不同时刻温度分布云图

Fig. 7　Cloud chart of temperature distribution of double-film greenhouse with different sections and different times in winter

冬季热环境评价结果见图 9。双膜拱棚种植区域失热量大约只有单膜拱棚失热量的 1/3，说明采用双层棚膜覆盖，在冬季可以减少拱棚种植区域的热量流失，达到提高拱棚保温性能的效果。温度均匀度方面，与夏季相反，单、双膜拱棚温度不均匀度在 12:00 最低，分别为 6.3×10^{-2} 和 2.7×10^{-2}，这说明过热和过冷的外界环境都会导致拱棚温度分布不均匀。3 个时刻双膜拱棚温度不均匀度均小于单

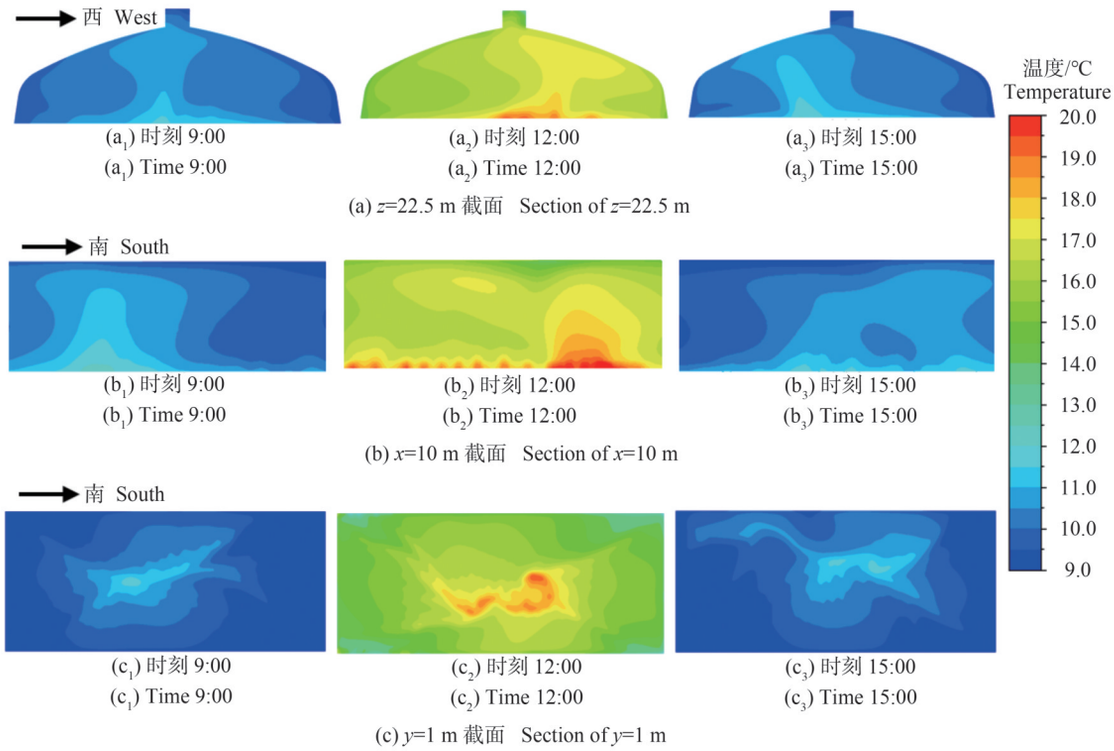


图 8 冬季单膜拱棚不同截面及不同时刻温度分布云图

Fig. 8 Cloud chart of temperature distribution of single-film greenhouse with different sections and different times in winter

膜拱棚，这是因为双膜拱棚在棚膜处失热量更少，棚内热环境变化更为缓慢。以上结果表明在冬季采用双膜棚膜覆盖，不仅提高了拱棚的保温性能，

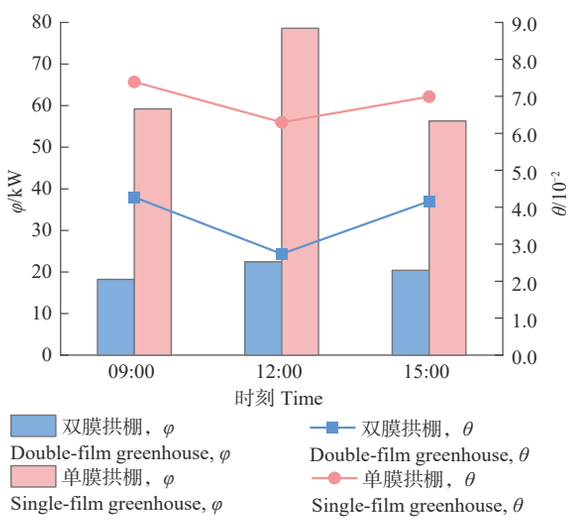


图 9 冬季单、双膜拱棚种植区域失热量(φ)及温度不均匀度(θ)

Fig.9 Heat loss in planting area (φ) and temperature unevenness (θ) between single-film greenhouse and double-film greenhouse in winter

还使冠层温度分布更均匀。

3 讨论与结论

双膜大跨度拱棚采用双层棚膜覆盖，主要目的是增强温室的保温性能[22]，宋明军等[23]通过对单层膜和双层膜组装式日光温室环境进行监测，发现双层膜日光温室保温性能较单层膜日光温室明显提高，冬季较单层膜日光温室最低温度提高 4.2 ℃，降温速度较单层膜日光温室低 0.39 ℃/h，这与本研究对双膜拱棚和单膜拱棚的研究结果相符。

本研究以双膜拱棚为研究对象，利用 CFD 软件对双膜拱棚冬夏季热环境特点进行仿真计算，并对比单膜拱棚热环境，对双膜拱棚的性能进行评价，得出以下结论：

1）双膜拱棚内温度实测值与模拟值均方根误差为 0.75 ℃，平均相对误差为 1.53%，证明该模型可准确计算双膜拱棚内温度分布情况。

2）夏季工况下双膜拱棚平均温度比单膜拱棚高 0.6～0.7 ℃，双层棚膜结构在夏季造成了热量的积聚，增加了拱棚的降温需求，但双膜拱棚热量积聚主要发生在缓冲区域，对种植区域温度环境影响

较小。

3)冬季工况下双膜拱棚种植区域平均温度比单膜拱棚高6.5～12.2 ℃,采用双层棚膜覆盖减少了棚内热量的流失,双膜拱棚保温性能更好,室内温度更均匀。综合考虑,双膜拱棚在实际生产中更适用于山东寿光的气候环境。

参考文献　References

[1] 周长吉. 周博士考察拾零(七十五)大跨度保温塑料大棚的实践与创新(上)[J]. 农业工程技术, 2017, 37(34): 20-27
Zhou C J. Notes on Dr. Zhou's investigation (75): Practice and innovation of large-span insulated plastic greenhouses (Part I) [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(34): 20-27 (in Chinese)

[2] 狄政敏, 聂承华, 宫彬彬, 郄东翔, 张建峰, 靳昌霖. 装配式钢结构塑料大棚优化技术规范[J]. 河北农业, 2023(9): 54-56
Di Z M, Nie Z H, Gong B B, Xi D X, Zhang J F, Jin C L. Technical specification for optimization of prefabricated steel structure plastic greenhouses[J]. *Hebei Agricultural*, 2023 (9): 17-26 (in Chinese)

[3] 武莹, 李建明. 典型季节大跨度非对称塑料大棚内温光性能分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 125-135
Wu Y, Li J M. Analysis on temperature and light variation properties of large-span asymmetric plastic greenhouses in typical seasons[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(10): 125-135 (in Chinese)

[4] 李胜利, 霍颖君, 孙治强. 不同层次简易覆盖的巨型塑料大棚温度特征研究[J]. 河南农业大学学报, 2008,42(6): 621-624
Li S L, Huo Y J, Sun Z Q. Study on the temperature characteristics in super-span plastic covered tunnel greenhouse with simple thermal screen of different layers[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2008, 42(6): 621-624 (in Chinese)

[5] 李萍萍, 胡永光. 冬季塑料大棚多重覆盖及电加热增温效果研究[J]. 农业工程学报, 2002,18(2): 76-79
Li P P, Hu Y G. Thermal preservation effect of multi-film covering and heating wire in plastic greenhouses in winter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18 (2): 76-79 (in Chinese)

[6] 王吉庆, 赵月平, 张百良. 温室采用多层内覆盖保温节能效果研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 118-121
Wang J Q, Zhao Y P, Zhang B L. Effect of heat preservation and energy-saving by applying multi-layer thermal screen in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 118-121 (in Chinese)

[7] 杨定伟, 荆海薇, 景炜婷, 何斌, 邹志荣, 鲍恩财, 曹晏飞. 不同墙体材料的装配式日光温室的热性能对比分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 194-205
Yang D W, Jing H W, Jing W T, He B, Zou Z R, Bao E C, Cao Y F. Comparative analysis of thermal performance of fabricated solar greenhouses with different wall materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 194-205 (in Chinese)

[8] 郄丽娟, 韩建会, 李永. 装配式异质复合墙体日光温室热性能分析与评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4): 159-169
Qie L J, Han J H, Li Y. Thermal performance analysis and evaluation on solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28 (4): 159-169 (in Chinese)

[9] 陈帆, 孙维拓, 禹文雅, 魏晓明, 周宝昌, 李友丽, 郭文忠. 外保温连栋温室光热环境及保温性能分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 194-203
Chen F, Sun W T, Yu W Y, Wei X M, Zhou B C, Li Y L, Guo W Z. Analyzing light and thermal environment and insulation performance of a multi-span greenhouse with external insulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(6): 194-203 (in Chinese)

[10] 于威, 刘文合, 白义奎, 丁小明. 基于CFD的两连跨日光温室热环境模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 215-222
Yu W, Liu W H, Bai Y K, Ding X M. Simulating thermal environment in a two-span solar greenhouse using CFD [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 215-222 (in Chinese)

[11] 方慧, 杨其长, 张义, 程瑞锋, 张芳, 卢威, 刘焕. 基于CFD的不同走向大跨度保温型温室温度场模拟[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 133-139
Fang H, Yang Q C, Zhang Y, Cheng R F, Zhang F, Lu W, Liu H. Prediction model on air temperature in large-span greenhouse with different orientation based on CFD [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(11): 133-139 (in Chinese)

[12] Saberian A, Sajadiye S M. The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation [J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 722-737

[13] 赵融盛, 蔡泽林, 杨志, 洪婷婷, 张智. 侧通风口高度对塑料温室气流及温湿度的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 105-114
Zhao R S, Cai Z L, Yang Z, Hong T T, Zhang Z. Effect of side vent height on airflow, temperature and humidity in plastic greenhouse [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26 (3): 105-114 (in Chinese)

[14] Xu K, Guo X, He J M, Yu B, Tan J L, Guo Y. A study on temperature spatial distribution of a greenhouse under solar load with considering crop transpiration and optical effects[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115277

[15] 赵娜, 李明, 赵淑梅, 宋卫堂, 石谓. 管道送风系统对塑料大棚气流场和温度场影响的CFD模拟[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 272-281
Zhao N, Li M, Zhao S M, Song W T, Shi W. CFD simulation on the influences of pipe air supply system on airflow field and temperature field in plastic tunnel [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 272-281 (in Chinese)

[16] Nebbali R, Roy J C, Boulard T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse [J]. *Renewable Energy*, 2012, 43: 111-129

[17] 吴晨溶, 程瑞锋, 方慧, 杨其长, 张晨. 基于CFD的植物工厂管道通风模拟及优化[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 78-87
Wu C R, Cheng R F, Fang H, Yang Q C, Zhang C. Simulation and optimization of air tube ventilation in plant factory based on CFD [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26 (1): 78-87 (in Chinese)

[18] 王传清, 倪秀男, 魏珉, 李清明, 王少杰, 曹欣. 基于CFD的不同通风方式塑料大棚降温效果研究[J]. 农业机械学报, 2023, (1): 351-356, 439
Wang C Q, Ni X N, Wei M, Li Q M, Wang S J, Cao X. Cooling effect of plastic greenhouse with different ventilation modes based on CFD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 351-356, 439 (in Chinese)

[19] 高振军，司长青，何芬，张彦萍，朱立保．热风管道加温下日光温室根区温度场的CFD模拟[J]．中国农业大学学报，2022，27(11)：207-216
Gao Z J, Si C Q, He F, Zhang Y P, Zhu L B. CFD simulation of temperature field in root zone of solar greenhouse under the heating by hot air duct [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(11): 207-216 (in Chinese)

[20] 陆清清．内遮阳保温幕在冬夏季对温室内部环境影响的研究[D]．上海：东华大学，2022
Lu Q Q. Study on the effect of internal thermal screens on the internal environment of greenhouse in winter and summer [D]. Shanghai: Donghua University, 2022 (in Chinese)

[21] Xie M X, Jia T, Dai Y J. Hybrid photovoltaic/solar chimney power plant combined with agriculture: The transformation of a decommissioned coal-fired power plant[J]. *Renewable Energy*, 2022, 191: 1-16

[22] 张义，马承伟，刘艺伟，韩静静．温室多层覆盖传热的数值模拟与验证[J]．农业工程学报，2010，26(4)：237-242
Zhang Y, Ma C W, Liu Y W, Han J J. Numerical simulation and experimental verification of heat transfer through multi-layer covering of greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 237-242 (in Chinese)

[23] 宋明军，赵鹏，张斌祥，赵树春，张建金．单层和双层膜组装式日光温室环境性能比较分析[J]．中国农机化学报，2018，39(5)：68-73
Song M J, Zhao P, Zhang B X, Zhao S C, Zhang J J. Comparative analysis on environmental performance of assembled solar greenhouse with single layer and double layer shed film [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(5): 68-73 (in Chinese)

责任编辑：刘迎春

第一作者简介：王伟，硕士研究生，就读于中国农业科学院农业工程与信息技术专业，主要从事农业建筑环境工程，设施园艺环境工程研究。曾作为课题负责人成功申请2018年度山东省大学生科研项目；获第二届山东省大学生智能控制大赛《机器人创新创业赛》壹等奖。参加北京市科技计划(Z211100004621002)和内蒙古自治区科技计划(2022YFDZ0086)。

通讯作者简介：方慧，中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所副研究员。主要从事设施节能技术、设施环境模拟方面的研究工作。先后主持和参加国家自然科学基金项目、国家重点研发计划、公益性行业(农业)科研专项、“十二五”863计划、农业科技成果转化等项目10余项。累计发表论文40余篇，参编著作1部，获授权专利20余件，获全国农牧渔业丰收奖、中华农业科技奖、中国农业科学院科学技术成果奖等奖励5项。