DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.06.008

基于CFD的双层膜日光温室冬季循环风机对温湿度分布特性影响的研究

赵盛吉[1],甄 琦[1,2],塔 娜[1,2,*],闫彩霞[1,2]
(1.内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古农业大学能源与交通工程学院,呼和浩特 010018)

摘要:冬季封闭运行的双层膜日光温室易出现上热下冷、湿度分层等问题,不利于作物生长及热量利用。本文以内蒙古呼和浩特地区双层膜日光温室为研究对象,基于实测数据建立了包含辐射、组分输运及多孔介质的三维CFD模型,模拟分析自然状态、单风机和双风机运行条件下的温湿度及流场分布特征。结果表明,温室内存在明显的热湿分层现象,安装循环风机后可有效增强室内空气流动,改善冠层区温湿度均匀性。开启1台风机时,温度极差和湿度极差分别降低约9.3%和11.5%;开启2台风机后,冠层区温度、湿度变异系数进一步下降,整体均匀性提升约15.0%。风机运行对平均温度影响较小,但有效改善了微气候分布特征。研究结果表明,内部循环风机能够在保持温室总体热环境稳定的同时有效改善微气候均匀性,可为寒区日光温室循环风机布置与运行参数优化提供理论依据。

关键词:双层膜日光温室;CFD;风机运行;冬季温湿度均匀性;内部循环
中图分类号:S626 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)06-0059-11

Effects of Circulation Fans on Temperature and Humidity Distribution Characteristics in a Double-layer Solar Greenhouse during Winter Using CFD Method

ZHAO Shengji[1], ZHEN Qi[1,2], Tana[1,2,*], YAN Caixia[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*;
2. *College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: During winter, double-layer solar greenhouses operating under closed conditions often exhibit temperature stratification and humidity layering, which adversely affect the crop growth and heat utilization. In this study, a double-layer solar greenhouse located in Hohhot, Inner Mongolia, was selected as the research object. A three-dimensional CFD model incorporating radiation, species transport, and porous media was established based on field-measured data to simulate the temperature, humidity, and airflow characteristics under three operation modes, i.e., without fans, with a single fan, and with two fans. The results showed that pronounced thermal and humidity stratification existed inside the greenhouse, while the installation of circulation fans effectively enhanced internal air mixing and improved the uniformity of temperature and humidity in the crop canopy zone. When one fan was operated, the temperature and humidity ranges decreased by approximately 9.3% and 11.5%, respectively. With two fans running, the coefficients of variation for temperature and humidity in the canopy zone further decreased, and the overall uniformity improved by about 15.0%. The fan operation had little effect on the mean temperature but significantly optimized the microclimate distribution. These findings demonstrate that internal circulation fans can effectively improve the uniformity of the greenhouse microclimate while maintaining overall thermal stability, providing a theoretical basis for optimizing the layout and operational parameters of circulation fans in solar greenhouses in cold regions.

Key words: Double-layer solar greenhouse; CFD; Fan operation; Temperature and humidity uniformity; Internal air circulation

寒旱区日光温室凭借其良好的保温能力与较低运行成本,在冬季蔬菜生产中发挥着重要作用[1-3]。然而,在长期封闭与弱自然对流条件下,温室内部常出现明显的温度与湿度空间不均匀:垂直方向上表现为上热下冷与上干下湿,水平面上则易形成靠膜、后墙等区域的高湿滞留区[4-7]。这种非均匀微气候会降低冠层叶片的有效光合温度区间,增加凝结与病害发生概率,进而影响越冬茬作物的产量与品质[8]。因此如何在不显著降低温度的前提下改善日光温室越冬生产的气流环境已成为亟待解决的问题。

通风是调控温室内部热湿分布的关键手段[9],

收稿日期:2025-10-31
基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN03058);内蒙古自治区研究生科研创新项目(KC2024038B);一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-009);内蒙古自治区中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0145)
作者简介:赵盛吉(1998—),男,硕士研究生,主要从事机械设计及理论等方面的研究,E-mail:shengjizhao1@163.com;*为通信作者,塔 娜(1967—),女,蒙古族,博士,教授,主要从事日光温室内环境因子数值模拟、谷物干燥、气力输送等方面的研究,E-mail:jdtana@163.com

相较于冬季开窗式自然通风（易造成大量热损失），内部循环式风机通过组织室内空气再分配、削弱热湿层化，可以在较小能量损失代价下提升冠层区的热湿均匀性。然而，现有相关研究多聚焦于夏季降温、湿帘-风机系统优化等问题展[10]，如：Tokairin等[11]针对湿帘-风机温室的研究发现，调整循环风机出风速度可获得区域内适宜的气流速度；Zhuang等[12]通过分析温室内循环风机安装高度，证实合理的风机系统设计有助于提升空间温湿度的均匀性；Tsafaras等[13]通过调整风机布置，实现了试验温室内蒸发冷却用水量的降低，为建造更节水的蒸发冷却温室提供了明确的科学依据。目前涉及循环风机在冬季封闭温室内部热湿循环场景的系统性验证研究相对较少[14-15]，尤其在双层膜结构下，膜层间气隙、后墙蓄放热与室内气流的耦合特性更为复杂，循环风机对冠层区的影响仍缺乏清晰的工程化结论。

基于此，本研究以内蒙古农业大学海流图科技园区双层膜日光温室为研究对象，在前期完成温湿度空间分布评估的基础上[16-18]，通过构建冬季封闭日光温室CFD模型，对比分析冬季双层膜日光温室封闭生产情况下，开启内部循环风机对温湿度分布的影响，并分析循环风机不同风口布置方式对温室内流场的影响，以便为温室结构改进以及温室内部温湿度均匀性调控提供更可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验温室

试验温室位于内蒙古农业大学海流图科技园区（111°22′30″E，40°41′30″N）。如图1所示，双层膜日光温室坐北朝南，东西长50.00 m，南北跨度8.50 m，后墙高3.50 m，脊高4.75 m。内外膜为两层聚乙烯薄膜，安装于两层钢结构棚架上，其间形成0.4 m~1.0 m的空气隔热层。温室正中央截面处安装聚乙烯薄膜将整体分为东西两侧温室，并阻止气流扰动。试验期间温室进行正常生产活动，定植作物为‘津南实芹1号’。试验时间为2024年12月1日至2025年3月11日。

室内循环风机的设计风量由温室的占地面积而定。一般情况下，每平米温室面积所需气流量约为36 m^3/h。风机的叶片直径通常为0.3~0.9 m，可依据室内作物的种植密度进行调整。本试验温室占地面积212.5 m^2，按经验公式计算所需风量约为7 650 m^3/h。由于研究对象为冬季工况，为避免风量过大导致室内温度骤降，适当降低设计风量。综合运行环境与噪声控制等因素，风机拟选购华胜公司生产的SF-4-4型低噪声环流通风机，其技术参数如表1所示。



图1 试验温室

Fig. 1 Experimental solar greenhouse

表1 SF-4-4型风机技术参数

Table 1 Technical parameters of SF-4-4 circulation fan

功率	频率	全压	风叶直径	电压	风量	转速
550 W	50 Hz	149 Pa	400 mm	380 V	5 870 m^3/h	1 450 r/min

1.2 数据获取

温室内温湿度数据的采集使用山东仁科测控技术有限公司生产的485型太阳总辐射二氧化碳温湿度变送器，实时记录相应传感器采集到的环境数据。为获取日光温室内整体空间水热系统的温湿度分布特征，试验温室与对照温室分别设置3个截面（图2）进行传感器布置，每个面布置17个，分别采集距地面0.2 m、0.8 m、1.8 m、2.8 m处温室内环境因子，共计102个温湿度传感器。数据采集间隔时间10 min，具体布置位置如图3所示。

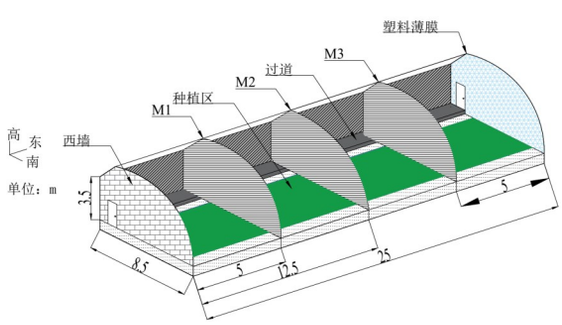


图2 试验温室传感器监测面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor monitoring sections in the experimental greenhouse

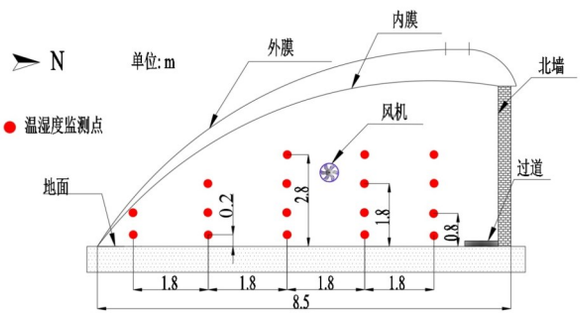


图3　温室内截面测点布置示意图

Fig. 3　Layout of measurement points on vertical sections inside the greenhouse

温室外气象环境因子采用美国Onset公司生产HOBO U30 NRC便携式小型自动气象站进行采集，通过USB通信接口传输数据，监测站可在-40~60 ℃的环境下工作。本研究气象数据采集间隔时间与室内环境因子采集频率相同，传感器参数如表2所示。

表2　HOBO U30-NRC气象站传感器主要技术参数

Table 2　Main technical parameters of HOBO U30-NRC weather station sensors

气象要素	量程	分辨率	精度
气温/℃	-40.00~75.00	0.02	±0.21
相对湿度/%	0~100	0.10	±2.50
风速/(m/s)	0~45.00	0.38	±1.10
风向/(°)	0~358.00，2.00死角	1.40	±5.00
总辐射/(W/m^2)	0~1 280.00	1.25	±10.00
光合有效辐射/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	0~2 500.00	2.50	±5.00
气压/mbar	660.00~1 070.00	0.10	±3.00
雨量	0~127.00 cm/h	0.20 mm	±1.00%

为充分体现双层膜温室在极寒天气下的保温性能，验证开启风机是否对温室内环境有强降温影响，本研究在西侧温室开展试验，选取监测期内日均温度最低的2025年2月7日开展试验。当天西芹平均株高约0.6 m，室外温度最高为-12 ℃。

1.3　温湿度均匀性评价指标

为更直观表示风机对温室内温湿度均匀性变化的影响，本文以变异系数C作为评价指标，变异系数越大对应的温湿度均匀性越差，变异系数越小说明所有监测点距离平均值越近，温湿度均匀性越好。均匀性系数计算公式如下：

$$C=\frac{\sum_{n=1}^{N}\left(T_n-\overline{T}\right)^2}{N} \tag{1}$$

式中，n为监测点序号，N为总体监测点数，T_n为第n个监测点温度或湿度值，$\overline{T}$为所有监测点的温湿度平均值。

为反映作物生长区域温湿度均匀性情况，本文分别计算高度为0.25 m、0.50 m、0.75 m、1.00 m水平截面处温湿度的变异系数，以4个截面的变异系数平均值作为温室作物区域温湿度进行均匀性情况评判。

2　CFD仿真与建模

2.1　CFD控制方程与物理模型

2.1.1　基本控制方程

温室内部空气流动缓慢，在浮力的作用下，在高度方向上形成温度梯度，因此空气被认为是一种理想的不可压缩气体。基于此建立了以质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程为基础的三维稳态湍流模型[19]，采用SST k-ω湍流模型模拟流场湍流特性。其满足的控制方程的一般表述形式如下：

$$\frac{\partial\left(\rho\varphi\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_j\varphi\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varphi\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right)+S_\varphi \tag{2}$$

式中：φ为无量纲传输量，即动量、质量（空气与水蒸气的质量分数）和能量；ρ表示流体密度，kg/m^3；t为时间，s；S_φ为能量源项，W/m^3；u_j是流体速度矢量，m/s；x_j为空间坐标，m；Γ_φ为输运量的等效扩散系数，Pa·s。

2.1.2　湍流模型

本研究采用SST k-ω湍流模型对温室内部的复杂流动进行模拟。该模型融合了k-ε模型在自由流区域的优势与k-ω模型在近壁面区的精度，特别适用于存在多孔介质冠层、低雷诺数自然通风、强逆压梯度和边界层分离的温室环境。与部分研究中采用的Realizable k-ε模型相比，SST k-ω在近壁面分辨能力和分离涡模拟能力方面更具优势，能更准确地捕捉风机驱动下的微气候扰动。因此，本文采用SST k-ω模型求解湍动能与比耗散率，兼顾壁面与自由剪切层特征[20]，网格划分过程中对壁面第一层网格高度进行了控制，使无量纲壁面距离y^+保持在1~5范围内，其控制方程如下所示：

$$\frac{\partial\left(\rho k\right)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho k\mu\right)=P_k-\beta^*\rho k\omega+\nabla\cdot\left[\left(\mu+\sigma_k\mu_t\right)\nabla k\right] \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\omega u)=\alpha\frac{\omega}{k}P_k-\beta\rho\omega^2+\nabla\cdot\left[(\mu+\omega_k\mu_t)\nabla\omega\right]+2(1-F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega^2}}{\omega}\nabla k\cdot\nabla\omega \quad (4)$$

式中:ρ为流体密度,kg/m^3;k为湍流动能,m^2/s^2;ω为湍流频率,1/s;u是流体速度矢量,m/s;P_k为湍流动能生成项,W/m^3;μ_t为湍流黏度,Pa·s;μ为分子动力黏度,Pa·s;t为时间,s;α、β、β^*为湍流模型常数,取值分别为0.520、0.075、0.090;σ_k为湍流普朗特常数,取值为0.850;σ_{ω^2}为第二湍流普朗特常数,取值为0.856。

2.1.3 辐射模型

太阳辐射是日光温室的主要热源,且对温室内部的微气候分布有着重要影响。因此本文使用DO辐射模型对辐射强度的方向进行离散化处理[21-22],对离散后整体空间上各质点的辐射方程进行求解。本文通过Solar Calculator设定试验温室地理位置(111°E,40°N)和时区(+8),模型以温室西北角与地面交界处为原点,北方为y轴方向,东方为x轴方向,天空为z轴方向建立笛卡尔坐标系,计算太阳总辐射强度。

2.1.4 多孔介质模型

为了模拟芹菜冠层对气流的阻力效应及其蒸腾引起的水汽释放作用,本研究将作物区域简化建模为各向同性多孔介质。作物冠层内气流通过叶片间隙时会动量显著损失,且由于叶面蒸腾作用不断释放水汽,局部空气湿度分布改变。为此,在CFD中引入多孔介质水蒸气源项,以表征冠层对水汽传输的影响。该方法能够在保证计算效率的前提下较真实地反映作物层的通风阻力特性和蒸腾贡献[23]。

2.2 日光温室CFD模型

2.2.1 几何模型

为节省计算资源,本文对日光温室做如下简化:定植的西芹均简化为多个具有相同高度的长方体,忽略温室内骨架结构。利用Solid Works对整个温室进行建模,计算过程中因模拟时间为冬季,日光温室多进行封闭生产,内外膜均处于全覆盖状态。多孔介质模型高度为0.6 m。循环风机初步安装在温室西墙侧垂直面的正中央位置,距墙体0.5 m处,具体模型如图4所示。

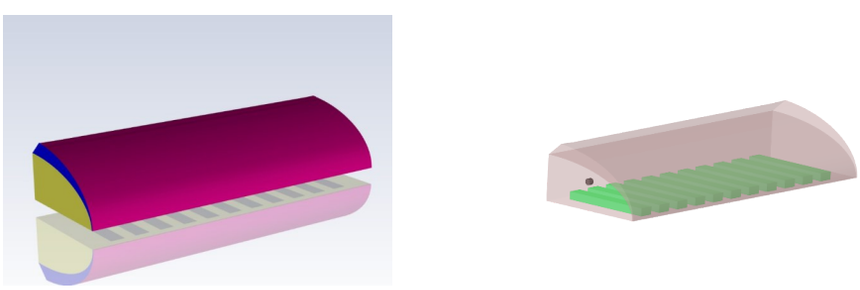


图4 温室几何模型及透视图

Fig. 4 Geometric model and perspective view of the greenhouse

2.2.2 网格划分

利用Ansys Meshing模块划分计算域网格,如图5所示。结构化网格适用范围较窄,而三维非结构化网格有四面体和六面体,它取消了结构化网格的节点限制,可进行不规则的连接,能够更好地处理复杂模型的边界问题[24-25]。因此本文网格划分方法选择为非结构化网格,并对靠近膜面、后墙与风机周围的网格进行局部加密。在划分完成后验证网格质量,进行网格独立性检验。

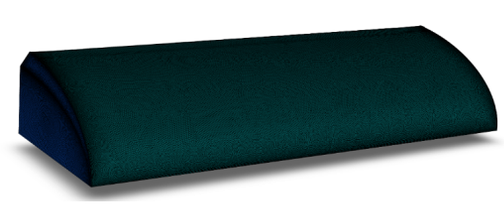


图5 网格划分

Fig. 5 Mesh generation

在日光温室内部选取距离地面高度2.0 m、距西墙12.5 m、南北向的一条直线。在该直线上等距选取100个测量点,对不同网格数量计算该测量点温度[26]。结果如图6所示,较少网格数量会使仿真结果误差偏大,在网格数量为262万时,温度变化幅度相较于315万小于5%。此时网格最大偏度为0.701,最小正交质量为0.298,网格质量处于可接受范围内。因此考虑计算成本及有效性,最终选择2 620 522个网格用来此次仿真。

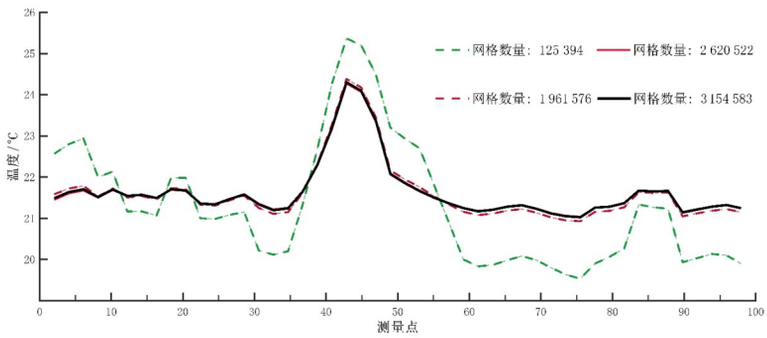


图6　网格无关性验证

Fig. 6　Mesh independence verification

2.2.3　边界条件

将采集到的室内外实时温度湿度数据导入模型中，作为边界条件和初始条件。温室外表面与土壤边界按传导边界处理，顶部与天窗在封闭运行假设下设为绝热壁面，风机用FLUENT自带的风扇边界进行模拟。温室后墙、东西侧墙、土壤等材料按其密度、比热、导热系数赋值，内外膜按半透明处理。温室围护结构各材料参数如表3所示。

表3　日光温室内各材料热物性参数

Table 3　Thermal physical parameters of materials in the solar greenhouse

材料	密度/（kg·m^{-3}）	比热容/（J·kg^{-1}·K^{-1}）	导热系数/（W·m^{-1}·K^{-1}）
内外膜	420.000	1 380.000	0.140
空气	1.225	1 005.000	0.023
土壤	1 500.000	1 970.000	0.900
北墙	2 200.000	880.000	0.200
作物	1 070.000	2 800.000	0.090
东西侧墙	1 860.000	1 240.000	0.800

3　结果与讨论

3.1　CFD模型验证

为验证该CFD模型的准确性，本研究对温室正中央截面处17个监测点的实测数据与仿真数据进行对比，结果如图7—图8所示。两者整体趋势一致，局部差异主要出现在靠近风机出口的中部区域。这一现象可能与温室骨架遮挡、局部紊流及传感器测量偏差有关。通过误差分析，温度场的均方根误差（E_{RMS}）为1.15 ℃，平均绝对误差（E_{MA}）为0.97 ℃；湿度场的E_{RMS}为2.69%，E_{MA}为2.18%。这些误差均在温室微气候CFD模拟的可接受范围内，表明模型能够在风机扰动条件下较准确地再现温湿度分布特征。

3.2　自然状态下

在冬季封闭生产条件下，双层膜日光温室内部温湿度空间分布呈现明显的分层与不均特征，由南向北温度逐层递减趋势明显，湿度与之相反。仿真结果如图9—图10所示，温室平均温度约23.25 ℃，

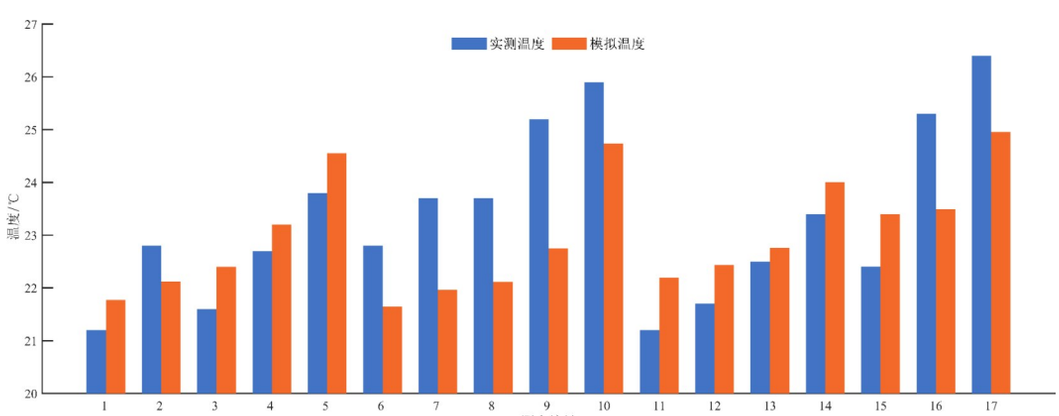


图7　温度仿真与实测值对比

Fig. 7　Comparison between simulated and measured temperature

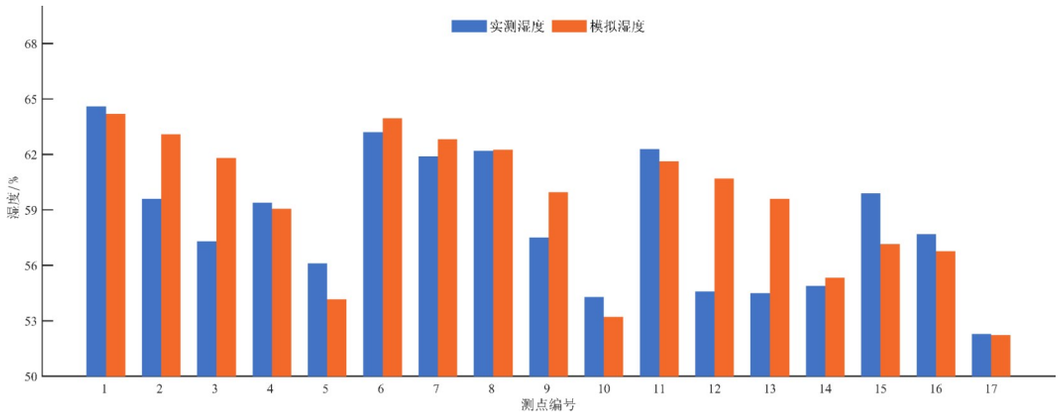


图8 湿度仿真与实测值对比

Fig. 8 Comparison between simulated and measured humidity

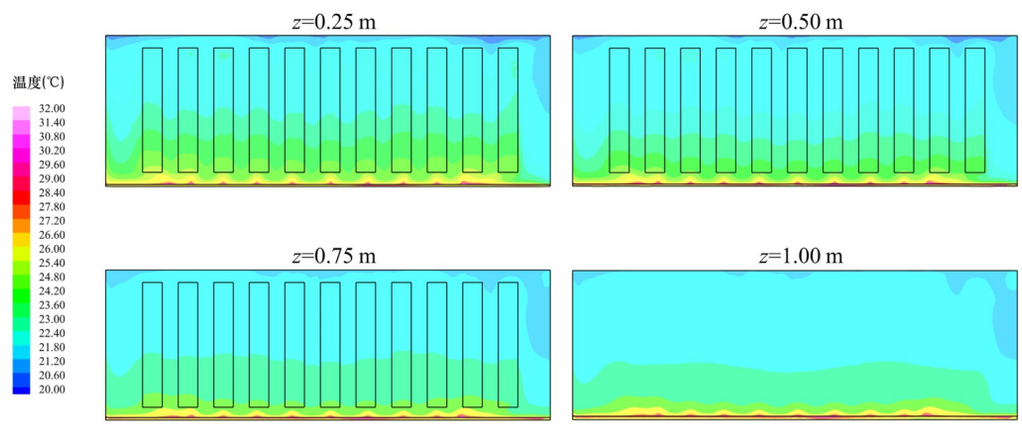


图9 自然状态下不同截面温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at different sections under natural (non-fan) condition

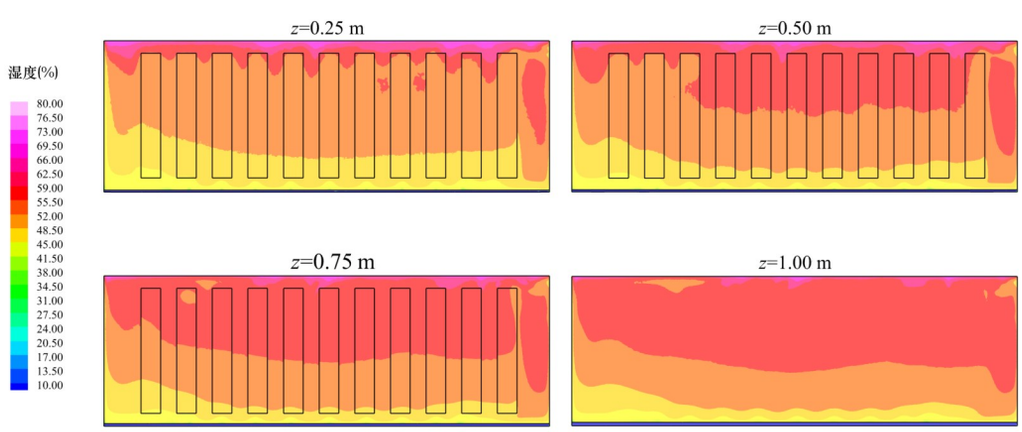


图10 自然状态下不同截面湿度分布

Fig. 10 Humidity distribution at different sections under natural (non-fan) condition

在20.10~27.60 ℃范围内变化，极差7.50 ℃。温度沿南北向呈“前低后高”分布，垂直方向上表现为“上热下冷”，形成明显热分层。这主要与温室顶部受太阳辐射及后墙蓄热强化有关，下部空气受限于自然对流，热量积聚不足。

湿度分布则表现出“上干下湿”的趋势。整体相对湿度在45.0%~70.0%之间波动，平均湿度约59.0%，极差27.9%。湿度高值主要分布在靠近地面和冠层下方区域，说明在封闭生产条件下，下部空气湿度滞留明显，水汽分布异质性较强。

风速分布特征显示，自然状态下温室内平均风速仅 0. 08 m/s，最大值 0. 12 m/s，最小值接近 0 m/s。温室绝大部分空间处于低速静滞状态，热浮力引起的空气流动极为有限，难以形成大尺度循环。冠层区域的风速较低，空气更新缓慢，导致热湿交换效率低。

进一步量化分析冠层生长区（0. 25~1. 00 m）4 个水平截面，温度均值分别为 23. 6 ℃、23. 3 ℃、23. 8 ℃、23. 9 ℃，各层温差分别为 4. 98 ℃、4. 64 ℃、4. 95 ℃、7. 56 ℃。湿度均值分别为 63. 1%、64. 6%、63. 8%、64. 1%，相应湿度极差为 29. 8%、27. 9%、22. 9%、26. 1%。综合来看，冠层区温度变异系数 0. 38，湿度变异系数 0. 34，均匀性较差。此状态下，温室内部呈现明显的热湿分层结构，空气滞留易导致局部结露及冠层区湿度过高，严重影响作物生理稳定性。因此，自然状态下温室气候特征可总结为：温度上聚、湿度下滞、流场静弱、均匀性差。这为后续通风优化与风机布置提供了物理基础。

3. 3　单台风机工况

相较于自然状态下，温室西墙侧增设 1 台风机，形成单侧送风循环，由图 11—图 12 可知，风机开启后，温室内部温湿度场得到改善，温湿度西侧分层现象改善较东侧显著，最低温度区域明显缩小。整体温室平均温度 23. 20 ℃，与自然状态相比基本持平（波动不足 0. 2 ℃），说明风机运行不会造成明显散热。剔除出风口附近局部高温区后，温度区间稳定在 20. 50~27. 30 ℃，极差减小至 6. 80 ℃，温度分布趋于均匀。

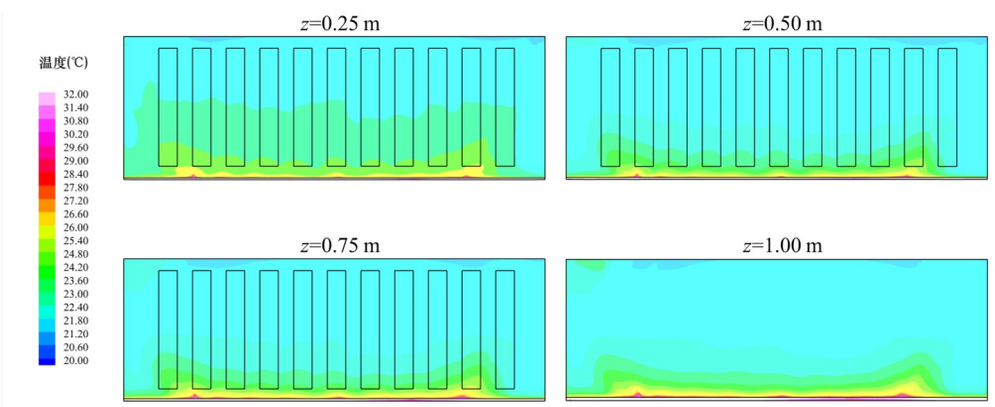


图 11　开启 1 台风机时不同截面温度分布

Fig. 11　Temperature distribution at different sections with one fan operating

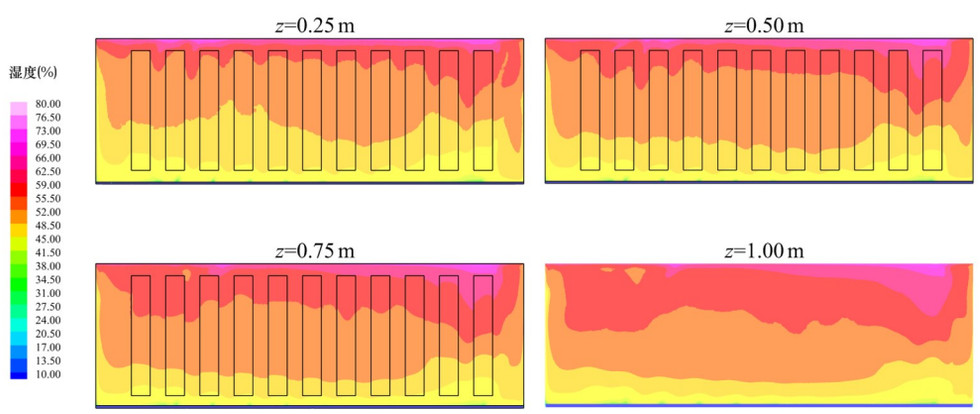


图 12　开启 1 台风机时不同截面湿度分布

Fig. 12　Humidity distribution at different sections with one fan operating

冠层区域的 4 个高度层面 ΔT 依次为 5. 06 ℃、4. 73 ℃、4. 91 ℃、5. 63 ℃，4 层平均相较自然状态整体下降约 10%。冠层温度变异系数由 0. 38 降至 0. 36，表明均匀性得到改善。湿度分布表现出明显的“扩散平衡”特征。平均湿度 57. 6%，较自然状态下降 1. 4%。湿度极差减小至 26. 3%，冠层区变异系数由 0. 34 降至 0. 33，均匀性提升约 3. 0%。湿度云图显示，风机运行后下部高湿区被打散并上升混

合,形成较均匀的水汽分布。

冠层平均风速升至0.18 m/s,风机出风口产生的射流沿温室纵向传播,在顶部形成回流区,建立了“上升—回落—再吸入”的闭合循环。空气扰动增强、流动性提升,空气交换效率显著改善。但由于风机仅布置在温室西侧,气流动能在传播过程中衰减,导致西侧与东侧空气温湿度仍存在一定差异。风机开启后东侧湿度略高,空气流动性相对不足。由此可见,单风机运行虽能显著改善整体热湿分布,但仍存在横向非均匀性问题。因此,有必要在温室东侧对称位置增设第二台风机,以进一步平衡气流分布。

综上所述,单风机方案能够在不显著改变热量平衡的情况下,有效改善温湿度分布,提高冠层区均匀性,且温度下降不明显,说明循环风机在冬季封闭日光温室内可以起到内部能量再分配的作用,而非热量损失。

3.4 2台风机工况

基于上述研究,在保持相同边界条件下,于温室东墙内0.5 m处增设第二台循环风机,与西侧风机对称布置形成对吹通风。仿真结果如图13—图14所示,双风机运行后,温室内空气混合增强,温湿度由南到北分层现象明显减弱。整体平均温度23.18℃,与自然状态几乎相同(波动<±0.2℃),温度极差进一步降至5.60℃。冠层区温度差在4层分别为4.16 ℃、4.23 ℃、3.91 ℃、4.61 ℃,温度变异系数降至0.33。这说明双风机运行后,温室空气热量分布更加均匀。整体平均湿度为54.5%,相较自然状态下降4.6%。冠层湿度极差稳定在24.4%左右,湿度变异系数0.28,空间湿度梯度显著减小。高湿区主要集中在后墙下部局部区域,其面积和东西侧差异性均明显减少,说明风机扰动使水汽有效扩散。

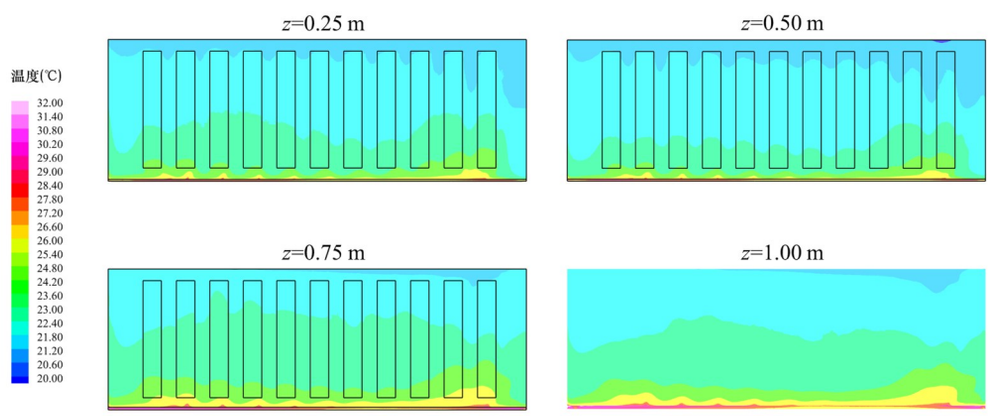


图13 开启两台风机时不同截面温度分布

Fig. 13 Temperature distribution at different sections with two fans operating

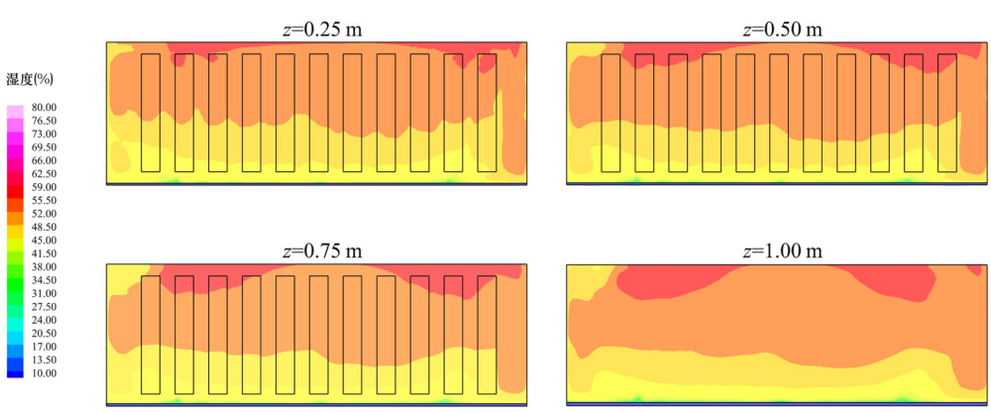


图14 开启两台风机时不同截面湿度分布

Fig. 14 Humidity distribution at different sections with two fans operating

3.5 不同工况速度分布

进一步揭示循环风机对温室内气流场的影响,图15展示了3种运行工况下温室中部垂直截面的气流矢量分布。在自然状态下,温室内部主要依靠

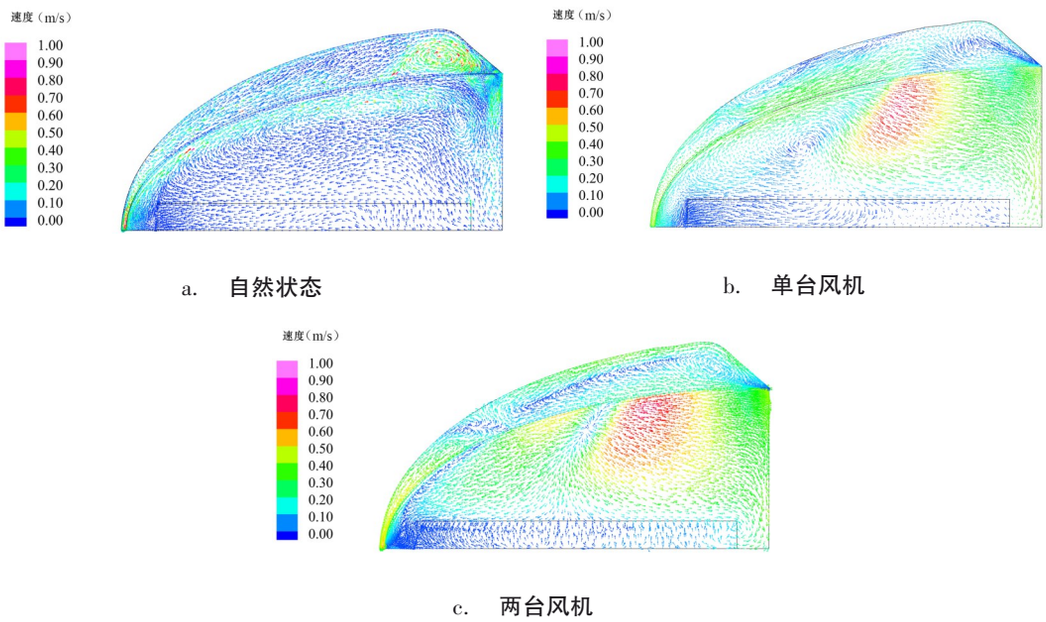


图 15　3种工况下中部垂直截面气流矢量分布

Fig. 15　**Airflow vector distribution on the central vertical section under three operating conditions**

热浮力形成微弱的自然对流。由于后墙及内膜附近温度较高，局部空气缓慢上升，整体流动较弱，冠层区几乎无明显循环，空气处于静滞状态。开启单台风机后，风机射流在温室中部形成沿纵向发展的主流通道，与顶部热气流相互作用，在后墙一侧形成较明显的回流涡结构，空气扰动增强，但在远离风机一侧仍存在局部低速区。当双风机对称布置运行时，两股射流在温室中部交汇，形成更加稳定的回流涡结构，此时靠近北墙侧冠层气流速度提升显著，整体动量分布更均匀，冠层区空气扰动性增强，换气效率提高。

图 16 所示为不同工况下各监测点风速值，双风机运行后温室平均风速提升至 0. 29 m/s，为自然状态的 3. 6 倍，比单风机高 60. 0% 左右。整个温室中最大风速 0. 68 m/s，最小风速 0. 03 m/s，有效改善了单风机部分区域风速过低这一现象。对吹风场在中部形成主循环区，气流自两侧对向进入后于中心区域上升，在顶部形成横向回流，最终回落至两侧，形成稳定的闭合环流系统。冠层平均风速提升至 0. 25~0. 30 m/s，空气扰动性增强，气体交换效率提高。总体来看，双风机布置在维持能量稳定的前提下，使温室内温湿度场更加平滑，空气流通性显著改善，冠层区温湿环境更加均匀。与单风机方案相比，双风机不仅显著削弱了温湿分层现象，也有效降低了作物病害风险，促进了冠层区的稳定生长。

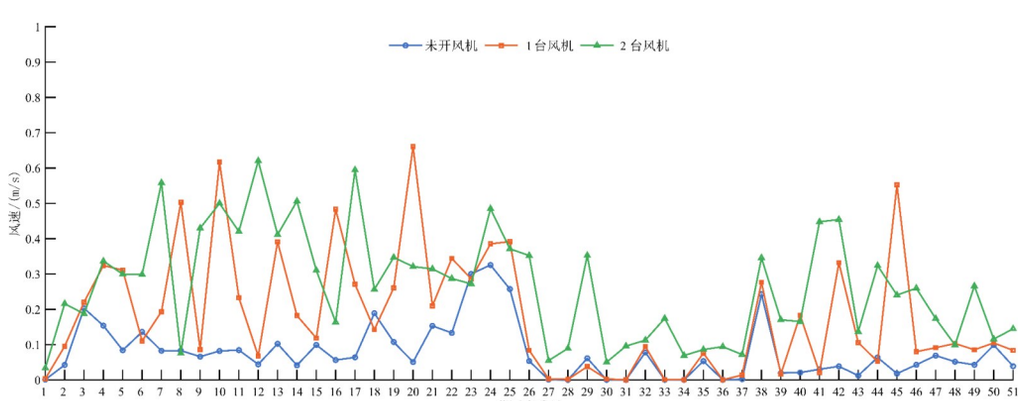


图 16　3种工况下全温室 51 个监测点风速

Fig. 16　**Air velocity values at** 51 **monitoring points under three operation conditions**

4 结论

本研究基于CFD模拟分析了冬季循环风机对封闭双层膜日光温室微气候的调控作用,主要结论如下:

①冬季封闭条件下,双层膜日光温室内部整体温度呈现“上热下冷”的分布特征,平均温度约23.25 ℃,极差达7.50 ℃。湿度在空间上表现为“上干下湿”,平均值59.0%,极差27.9%,冠层区域温湿度变异系数分别为0.38与0.34,均匀性较差。平均风速仅0.08 m/s,空气处于静滞状态,导致热湿分层显著、空气交换效率低,是引发作物冠层区湿度滞留与结露的重要原因。

②开启单台循环风机后,温室整体温湿度分布得到明显改善。温度极差由7.50 ℃降至6.80 ℃,冠层区平均温度差由5.53 ℃降至5.08 ℃,下降8.0%。温度和湿度变异系数分别由0.38、0.34降至0.36、0.33,均匀性提高5.0%和3.0%。冠层平均湿度下降1.4%,空气湿度分布更为均衡。风速显著提升,冠层平均风速由0.08 m/s提升至0.18 m/s,增强125%。风机产生的射流带动空气沿纵向循环,使温室形成“上升—回流—再吸入”的闭合环流结构,促进空气混合与能量再分配。整体温度变化不足0.20 ℃,说明风机运行不会引起显著热量散失。

③双风机对称布置进一步优化室内气流组织。整体温度极差降至5.60 ℃,冠层平均温度差由单风机的5.08 ℃降至4.23 ℃,下降17.0%,温度变异系数降至0.33。整体平均湿度下降至54.54%,较自然状态降低约4.5%,湿度极差减小至24.4%,湿度变异系数降至0.28。冠层区空气流动性显著增强,平均风速提升至0.29 m/s,比自然状态高出262.0%,比单风机工况提升61.0%。气流在中部区域汇聚并上升,经顶部回流后两侧下沉,形成稳定的闭合循环,空气交换与混合效率显著提高。

④总体来看,风机运行能有效改善双层膜日光温室内的热湿环境均匀性,削弱温湿度分层现象。在不显著降低室内平均温度($\Delta T \leqslant 0.2$ ℃)的前提下,风机通过增强室内空气循环与混合实现能量再分配。两台风机的综合效果优于单台,与自然状态相比,冠层区温度和湿度变异系数分别降低13.0%与18.0%,整体温湿差明显减小,平均风速提升3.6倍。单风机方案虽能削弱垂向分层,但仍存在东西侧气流不均等现象,而两侧风机对称布置进一步平衡空间分布,是寒区冬季双层膜日光温室较优的运行方案。

研究尚未考虑土壤热湿交换、风机数量、送风高度、风压等多因素对温室内温湿度的影响。后续拟结合实测风速场与能耗监测,开展多风机布置及参数耦合优化研究,为寒区双层膜日光温室冬季环境调控与风机系统设计提供更加科学的理论依据。

参考文献:

[1] LI Y M, YAN J, LI Z Z, et al. A globalized methodology of energy-saving solar greenhouse design in high latitudes [J]. Energy, 2024, 304: 132117.

[2] TONG X J, SUN Z P, SIGRIMIS N, et al. Energy sustainability performance of a sliding-cover solar greenhouse: Captured energy management aspects [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 57: 103239.

[3] 张惠楠,李 明,祝 鹏. 北方日光温室构造的研究进展[J]. 智慧农业导刊,2024,4(6):64-68.

[4] 王 伟,方 慧,伍 纲,等. 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(5):115-124.

[5] 鲍恩财,刘璋晶莹,李士照,等. 基于光伏连栋玻璃温室温度场CFD模拟的冬季加温系统排布优化[J]. 新能源科技,2023(3):21-27.

[6] XU D M, CHEN H C, JI F, et al. New insights on canopy heterogeneous analysis and light micro-climate simulation in Chinese solar greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 233: 110179.

[7] LI H, ZONG C J, LU J R, et al. Experimental study on spatiotemporal variation patterns of thermal environment in the large-span insulated greenhouse[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 264: 125530.

[8] SONG C B, LIU P Z, LIU X H, et al. Configuration optimization of temperature-humidity sensors based on weighted Hilbert-Schmidt independence criterion in Chinese solar greenhouses [J]. Agriculture, 2024, 14(2): 311.

[9] 万 敏,杨 魏,刘竹青,等. 不同通风方式日光温室微环境模拟与作物蒸腾研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):328-338+349.

[10] 高振军,李斯亮,司长青,等. 湿帘风机安装高度对Venlo温室降温效果分析[J]. 农业工程学报,2022,38(S1):257-264.

[11] TOKAIRIN T, SUMI A, SHIMOMURA N, et al. Effect of air circulator on airflow distributions in greenhouse with a pad-fan evaporative cooling system[J]. Shokubutsu Kankyo Kogaku, 2017, 29(1): 17-25.

[12] ZHUANG Y, ZHANG Y, ZHAO S, et al. Air-circulator effects on the greenhouse environment and tomato photosynthetic parameters in a Chinese solar greenhouse[J]. Acta Horticulturae, 2018(1227): 197-204.

[13] TSAFARAS I, CAMPEN J B, STANGHELLINI C, et al. Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106807.

[14] 宋成宝,柳平增,刘兴华,等. 基于温湿度异布的日光温室冬季主动通风策略设计与验证[J]. 农业工程学报,2024,40(10):228-238.

[15] 景炜婷. 基于CFD的主动蓄热日光温室通风模拟与优化[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.

[16] 李晓凯,塔　娜,闫彩霞,等. 寒旱区日光温室顶通风方式对温湿度与二氧化碳水平的影响[J]. 中国农业科技导报,2024,26(12):187-200.

[17] 李晓凯,塔　娜,闫彩霞,等. 基于PLC的双层膜日光温室保温通风控制系统设计[J]. 中国农机化学报,2025,46(9):182-188.

[18] 高理君,塔　娜,焦　巍,等. 日光温室作物冠层下表层土壤温湿度分布特征研究及数值模拟[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(4):49-56.

[19] 江欣侠. 现代日光温室园区宜机化连廊设计及通风性能研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2024.

[20] LIU W H, LIU Y S, ZHANG F, et al. Assessment of micro-climate in Chinese solar greenhouse equipped with a Pad-Fan Cooling system by different turbulence models[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101161.

[21] WU X Y, LI Y M, JIANG L L, et al. A systematic analysis of multiple structural parameters of Chinese solar greenhouse based on the thermal performance[J]. Energy, 2023, 273: 127193.

[22] LI H, JI D, HU X, et al. Comprehensive evaluation of combining CFD simulation and entropy weight to predict natural ventilation strategy in a sliding cover solar greenhouse[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(6): 213-221.

[23] 焦　巍. 寒旱区典型双层膜日光温室土壤-作物-环境水热系统试验与模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.

[24] 于　威,刘文合,白义奎,等. 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.

[25] 孙园朝. 日光温室正压通风降温性能测试及CFD模拟研究[D]. 石河子:石河子大学,2024.

[26] LU J R, LI H, WANG C L, et al. CFD based airflow uniformity optimization of Chinese solar greenhouses with long-row cultivation: Impact of unit layout design[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 71: 106192.