

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-217-08

食用菌日光温室夏季养殖环境适宜性研究

费朝阳 张月怡 周 勃 谢志刚 徐雪璐

(沈阳工业大学建筑与土木工程学院 沈阳 110870)

【摘要】 夏季高温是导致食用菌日光温室出现高温高湿环境的主要原因, 该环境不利于食用菌的生长, 针对此问题, 以沈阳市某一杏鲍菇养殖日光温室为研究对象, 首先建立几何模型; 其次在建立太阳辐射模型时考虑了散射辐射, 并以云遮系数法辐射强度进行修正, 将计算结果作为日光温室热环境模拟的输入参数, 建立了夏季典型日的日光温室 CFD 模型; 最后将所建立的模型模拟结果及未经修正太阳辐射模型的模拟结果与实测结果进行对比, 所建立模型的温度和相对湿度的平均相对误差分别为 4.3% 和 5.0%, 未经修正太阳辐射模型的温度和相对湿度的平均相对误差分别为 4.8% 和 5.3%, 这表明所建立太阳辐射模型提升了热湿环境模拟的精度。此外, 通过模拟温室内的气流组织设计, 证明即使在夏季极端气候, 也能保证杏鲍菇处于适宜生长的温湿度范围之内, 进而证明了可以通过空调调控使日光温室达到食用菌适宜生长的环境。

【关键词】 食用菌; 日光温室; CFD 模拟; 太阳辐射模型

中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

Study on the Environmental Suitability of Summer Culture in Edible Mushroom Solar Greenhouse

Fei Chaoyang Zhang Yueyi Zhou Bo Xie Zhigang Xu Xuelu

(College of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870)

【Abstract】 The high temperature in summer is the main reason for the high temperature and high humidity environment in the edible mushroom solar greenhouse, which is not conducive to the growth of edible mushrooms. Secondly, the scattered radiation is considered in the establishment of the solar radiation model, and the radiation intensity is corrected by the cloud occlusion coefficient method, and the calculated results are used as the input parameters for the simulation of the thermal environment of the solar greenhouse, and the CFD model of the solar greenhouse on a typical day in summer is established. Finally, the average relative errors of temperature and relative humidity of the established model and the unmodified solar radiation model are 4.3% and 5.0%, respectively, and the average relative errors of temperature and relative humidity of the unmodified solar radiation model are 4.8% and 5.3%, respectively, which indicates that the established solar radiation model improves the accuracy of thermal and humid environment simulation. In addition, by simulating the airflow organization design in the greenhouse, it was proved that even in the extreme climate of summer, it was proved that the temperature and humidity range suitable for the growth of *Pleurotus eryngii* could be ensured, and then it was proved that the solar greenhouse could be controlled by air conditioning to achieve a suitable environment for the growth of edible mushrooms.

【Keywords】 edible mushroom; solar greenhouse; CFD simulation; solar radiation model

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目 (LJKQZ2021049); 风热泵储能系统的运行决策及场景适宜性研究 (JYTMS20231218); 沈阳市科技项目 (23-407-3-21)

作者简介: 费朝阳 (1978-), 男, 讲师, 硕士生导师, E-mail: 65276953@qq.com

通讯作者: 周 勃 (1976-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事可再生能源运维方面的研究, E-mail: liguodapple@sina.com

收稿日期: 2023-12-18

0 引言

2021 年中国食用菌产量达到 4133.96 万吨, 占全球总产量的七成以上, 已成为食用菌第一生产大国^[1]。食用菌日光温室相比于传统食用菌厂房, 可有效利用太阳辐射提供食用菌生长所需要的热量, 大大降低运行成本和建造费用, 但是, 各类食用菌对适宜生长的温湿度要求严格, 特别是夏季极端气候时常出现的高温高湿养殖环境, 严重影响了食用菌的产量。因此, 分析食用菌日光养殖温室在极端气候下是否能维持食用菌生长的适宜热湿环境条件尤为重要。

研究表明, 日光温室热湿环境主要受太阳辐射、围护结构、农作物自身等多因素影响, 其热湿耦合场呈现出复杂的非线性特征, 特别是太阳辐射模型的精确度对该类温室的模拟精度影响极大^[2-4]。目前已有学者对日光温室内植物所适的生长环境的 CFD 仿真模型进行了探索。Sun Y 等人为了探究夏自然通风对日光温室降温的影响, 在高太阳辐射强度和弱风条件下建立 CFD 模型时, 采用辐射折减方法, 直接采用 DO 辐射子模型进行仿真^[5-8]。Zhang G 等人同样直接利用辐射模型探究了机械通风方式对日光温室的影响规律, 却忽略了对太阳辐射的修正^[9,10]。许红军根据日地运动规律、气象数据及光线与温室入射角的关系, 考虑了大气透明度对太阳辐射照度的影响, 却忽略了云量的影响, 建立了相对完善的太阳辐射模型^[11]。目前大多数研究在建立日光温室 CFD 模型时直接采用 DO 辐射模型, 鲜少考虑对太阳散射辐射的修正, 采用大气透明度系数对天气的影响进行简化处理而忽略了云量的影响, 在一定程度上降低了仿真模型的精度。

杏鲍菇子实体生长最适温度 14—16℃, 出菇温度应控制在 19℃ 以下, 最适湿度为 70%—95%^[12]。为了更精确地定量计算太阳辐射对日光温室热湿环境的影响, 本文以沈阳市某杏鲍菇养殖日光温室为例, 在考虑食用菌本身散热散湿影响的基础上, 以云遮系数法为理论基础, 修正了太阳光线到达大气层外表面的太阳辐射强度, 同时还考虑了太阳的散射辐射建立太阳辐射子模型, 将其计算结果作为食用菌日光温室热湿环境模拟研究的输入参数。最后将仿真结果与实测结果进行对比证明模型的准确性, 并计算日光温室在夏季典型日的室内

温湿度分布, 以验证该地区采用日光温室养殖食用菌的可行性。

1 CFD 数学模型

食用菌日光温室内存在培养架及培养料等多种结构, 其流场是复杂多变的, 同时还伴随着热量传递。以计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 为理论基础, 使用三维模型模拟食用菌日光温室内空气流动和温度分布。

1.1 基本控制方程

食用菌日光温室内部的空气流动遵循三大守恒方程, 即连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程, 但由于温室内部的空气流动中还包含不同组分存在或相互作用, 还需要满足组分质量守恒定律^[13]。

1.1.1 连续性方程

连续性方程见式 (1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s 。

1.1.2 动量守恒方程

动量守恒方程如下式:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式中: p 为压力, Pa ; u 、 v 、 w 为速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 方向的分量; μ 为动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; S_u 、 S_v 、 S_w 为动量守恒方程的广义源项。

1.1.3 能量守恒方程

能量守恒方程见式 (5)。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为流体传热系数; S_T 为粘性耗散项, J 。

1.1.4 组分质量守恒方程

在温室内, 由于食用菌自身蒸腾、呼吸作用会释放湿量, 水蒸气与空气通过扩散成为混合气体,

该过程遵循组分质量守恒定律, 模拟时, 认为温室内的空气是理想空气与水蒸气组成的湿空气, 组分质量守恒方程见式 (6)。

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (6)$$

式中: c_s 为组分 s 的体积浓度; D_s 为组分 s 的扩散系数, m^2/s ; S_s 为 s 组分的生产率。

1.2 湍流模型

空调系统送风时, 室内空气经热湿交换后由回风口排出, 必然会引起室内气流的扰动而形成湍流现象, 进而影响温度场和相对湿度场的状态。标准 k - ε 湍流模型计算量适中且应用广泛^[14,15], k 湍流能量运输方程可表述为式 (7), 能量耗散方程可表述为式 (8)。

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon G_{1\varepsilon}}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

式中: k 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; G_k 为平均速度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; σ_ε 、 σ_k 为经验常数, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $\sigma_k=1.0$; $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 为经验常数, $G_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $G_{2\varepsilon}=1.92$ 、 $G_{3\varepsilon}=0.09$; S_k 、 S_ε 为用户定义的源项。

1.3 多孔介质模型

温室内部菇床会对空气产生阻碍作用, 模拟时应尽量与实际情况相符, 但当完全按照杏鲍菇实际大小建立模型时, 会大大增加网格数量, 降低收敛速度, 因此在模拟食用菌等障碍物对环境的影响时, 国内外大多数研究将其简化为多孔介质^[16,17]。本研究将菇床表述为多孔介质, 多孔介质模型实际上是动量方程中添加的源项, 可由式 (9) 表示。

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (9)$$

式中: $1/\alpha$ 为粘性阻力系数; C_2 为惯性阻力系数; S_i 为动量方程的源项; v 为速度值, m/s 。

2 日光温室的太阳辐射模型

太阳辐射是日光温室热量的最主要来源。由于太阳光线与大气层外切平面存在夹角, 且大气中存

在水分、气溶胶粒子等物质, 太阳辐射经过大气和云时将不可避免的产生散射辐射, 因此需要对其进行合理的修正, 再利用三角函数关系进一步转化为日光温室内部墙体、地面处的太阳辐射照度, 最后将计算结果加载到 CFD 模型中采用光线追踪法进行模拟。

根据杏鲍菇日光温室的实际情况, 简化如下条件: (1) 已建成的日光温室屋顶面曲率较大, 可近似为斜平面; (2) 支撑温室骨架的遮蔽面积较小, 遮光效果忽略不计; (3) 忽略温室薄膜上的露水、污垢等因素对辐射照度的影响。

2.1 到达大气层外切面辐射照度计算模型

由于日地间的规律运动, 二者之间的距离也在规律变化, 任意一天到达大气层表面的辐射照度可由式 (10) 计算。

$$S_0 = I_0 \left[1 + 0.034 \cos \frac{2pN}{365} \right] \quad (10)$$

式中: S_0 为大气层表面的太阳辐射照度, W/m^2 ; I_0 为 1981 年世界气象组织所公布的太阳常数, $1367\text{W}/\text{m}^2$; N 为日期时序, 1 月 1 日为 1、2 日为 2, 可依次类推。

不同的太阳高度角下, 太阳辐射照度也不尽相同, 辐射值与高度角的正弦值成正比, 太阳高度角可由太阳赤纬角、时角求出, 见式 (13), 进而可由式 (14) 求出大气层外切面的辐射照度某时某地的太阳辐射照度^[18]。

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[360^\circ \frac{284 + N}{365} \right] \quad (11)$$

$$\omega = 15^\circ \times (12 - t) + (120^\circ - \psi) \quad (12)$$

$$\sin h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (13)$$

$$S = S_0 \sin h \quad (14)$$

式中: δ 、 ω 、 h 分别为太阳赤纬角、太阳时角, 太阳高度角, $^\circ$; t 为当地时间, 上午为负、正午为 0、下午为正, h ; ψ 、 φ 分别为当地经度、当地纬度为太阳高度角, $^\circ$; S 为大气层外切面太阳辐射照度, W/m^2 。

2.2 地球表面任意位置辐射照度计算模型

以下式计算到达地球某位置水平面的太阳直射通量及散射通量。

$$S_Z = S \times L_Z \quad (15)$$

$$S_S = S \times L_S \quad (16)$$

$$L_z = \alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{-k}{\sin h}} \quad (17)$$

$$L_s = 0.271 - 0.293L_z \quad (18)$$

式中： L_z 、 L_s 分别为太阳直射透过率、散射透过率； S_z 、 S_s 为到达地面的直射、散射通量； α_0 、 α_1 、 k 为具有 23km 能见度标准晴空大气的物理常数^[19]。

空中的云量对辐射值存在一定程度上的影响，因此有云时，可采用云遮系数法以式（20）对所计算出的直射通量及散射通量进行修正，经下式计算可得到达地球某位置水平面的太阳辐射度及直接太阳辐射照度和散射太阳辐射照度。

$$CCF = P + Q(CC) + R^2(CC) \quad (19)$$

$$S'_z = S_z \times (1 - 0.1 \cdot CC) \quad (20)$$

$$S'_s = (S_z + S_s) \times CCF - S'_z \quad (21)$$

式中： CC 为云量，可根据实际天气在 0—10 之间按晴天、少云、多云、阴天等从小到大依次取值； CCF 为关于云量的函数关系式； P 、 Q 、 R 为季节相关常数，可按表 1 取值^[20]。

表 1 季节常数的确定

Table 1 Determination of seasonal constant

季节	P	Q	R
春	1.06	0.012	-0.0085
夏	0.96	0.033	-0.0106
秋	0.95	0.030	-0.0108
冬	1.15	0.003	-0.0082

在夏季时，认为季节常数 $P=0.96$ 、 $Q=0.033$ 、 $R=-0.0106$ 。

经修正后，可由式（22）求出到达食用菌日光温室薄膜的总太阳辐射照度为：

$$S_p = \frac{(S'_s + S'_z) \times \sin(h + \beta)}{\sin h} \quad (22)$$

式中： S_p 为日光温室薄膜外表面的太阳辐射照度， W/m^2 ； β 为屋面与水平地面的夹角，°。

2.3 温室地面及墙体的辐射照度计算模型

获得某时某地地球辐射照度后，即可根据温室薄膜的透光性求出温室地面和墙体所接受的太阳辐射照度，然而薄膜透光性与太阳方位角、太阳高度角、太阳入射角等因素相关，二者的关系可表现为式（23）。

$$\sin \sigma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (23)$$

$$\cos \theta = \cos \beta \sin h + \sin \beta \cosh \cos(\sigma - \gamma) \quad (24)$$

$$T = T_0 \left[1 - 0.93^{(90-\theta)} \right] \left[1 - \frac{\theta}{1000} \right], (0 \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (25)$$

式中： σ 、 θ 、 γ 为太阳方位角、太阳光线与屋面形成的入射角、所选温室的南偏西角度，南偏西为正，正南为 0，偏东为负，°； T 为薄膜在不同入射角下的透光率，%； T_0 为薄膜基本透光率（因薄膜表面存在结露、污垢等现象，本研究透光率按 10%—20%衰减计），%。

温室内部墙体与地面接受的太阳辐射可由太阳光线与日光温室的相对位置来确定：

$$S_w = \frac{(S'_s + S'_z) \times T \times \cosh \times \cos(\sigma - \gamma)}{\sin h} \quad (26)$$

$$S_f = (S'_s + S'_z) \times T \quad (27)$$

式中： S_f 为地面接受的辐射照度， W/m^2 ； S_w 为墙壁接受的辐射照度， W/m^2 。

3 热湿耦合场仿真模拟

3.1 三维几何模型构建

该日光温室位于沈阳市沈北新区（123.4°E，41.8°N），日光温室的结构见图 1，东西方向长 26m，屋面材质为 PO 塑料薄膜，温室薄膜的倾斜角为 37°，室内种植杏鲍菇。室内共四个菇床，上下各两排分布，将菇床简化为长方体，每个菇床尺寸相同，长 20m，跨度 1.5m，高 0.5m。温室中安装了三台空调机组，均匀安装在距离地面 3m 高度处的北墙上。

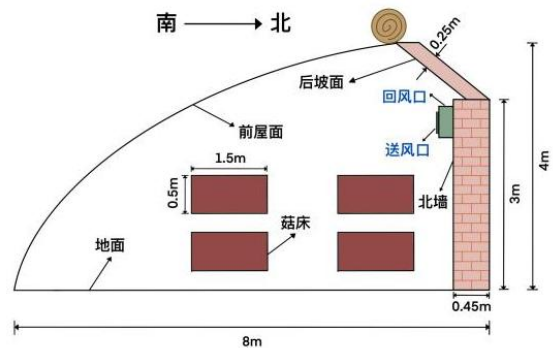


图 1 日光温室的结构图

Fig.1 Section of solar greenhouse

日光温室围护结构的物性参数见表 2。

表 2 日光温室围护结构材料参数

Table 2 Related parameters of materials

结构名称	壁面类型	比热容/ J·(kg·K) ⁻¹	导热率/ W·(m·K) ⁻¹	密度/ kg·m ⁻³
前屋面	半透明	1100	0.047	950
后坡面	不透明	1005	0.199	1800
北墙	不透明	1005	0.1325	1800
东、西墙	不透明	1005	0.1325	1800
地面	不透明	2200	1.16	2000

3.2 实际数据测量

为使实测数据能够准确反映杏鲍菇生长区域空气的热湿等状态, 并且要保证数据具有一定代表性, 因此在典型日期间, 在杏鲍菇生长区域均匀布置 18 个测点, 于 2021 年夏至期间时间段进行数据测量, 时间间隔为一小时, 每个测点测量 3 次取平均值。温湿度记录选用 TES1361 温湿度仪, 风速记录选用 TEL9545 风速仪, 围护物表面温度记录选用 FOTRIC 红外热像仪。

3.3 网格划分与无关性检验

为简化建模过程, 将温室围护物结构用无厚度面来表示, 且建模时忽略门窗等结构, 并将菇床用长方体代替。利用 ANSYS ICEM CFD 软件进行三维几何模型的建立并进行网格划分, 网格选择非结构化四面体。为模拟不同环境下日出后温室内热湿耦合场, 采用 ANSYS FLUENT 建立 CFD 动态模型。

为确保数值模拟结果可靠, 评估模拟结果对网格分辨率的敏感性, 对日光温室几何模型划分 5 种网格, 本研究的目的是探索食用菌日光温室夏季养殖温湿度环境的适宜性, 因此选择日光温室平均温度及平均相对湿度的计算结果作为网格无关性的检验标准, 每两个小时进行一次模拟, 检验结果见图 2 及图 3。

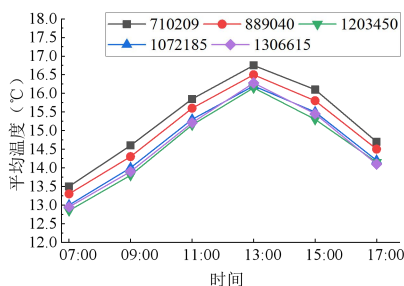


图 2 平均温度网格无关性检验

Fig.2 Grid independence test for mean temperature

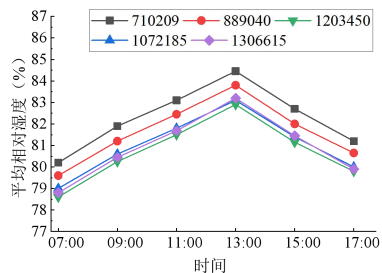


图 3 平均相对湿度网格无关性检验

Fig.3 Grid independence test for mean relative humidity

如图 2、3 所示, 随着网格数量的增加, 无论是平均温度还是平均相对湿度, 计算结果的变化率均趋于稳定, 当网格数量大于 1072185 时, 计算结果的变化范围基本相同, 为节省计算资源, 提高计算效率, 模拟采用较少网格的模型进行计算, 网格数量为 1072185, 网格质量在 0.7 及以上的占总量的 60%, 网格划分示意图见图 4。

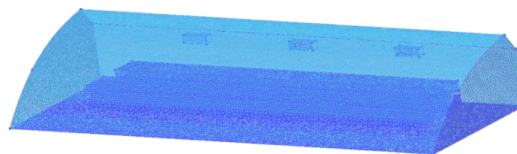


图 4 日光温室网格的划分

Fig.4 Division of solar grid in greenhouse

通过预计算将步长设置为 30s, 为检验时间步长的可靠性, 分别设置时间步长为 10s、15s、20s 的对照组进行计算, 计算结果见图 5 及图 6。

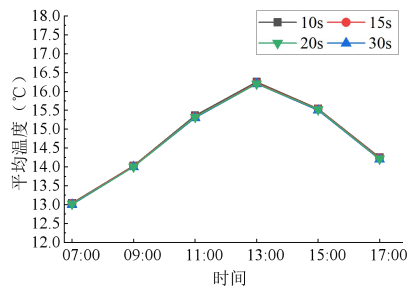


图 5 平均温度步长无关性检验

Fig.5 Step size independence test for mean temperature

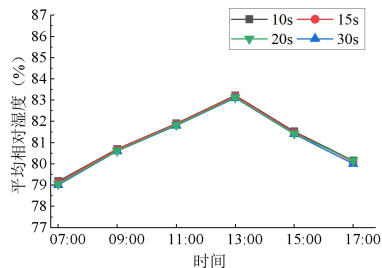


图 6 平均相对湿度步长无关性检验

Fig.6 Step size independence test for mean relative humidity

由图 5、6 可以看出，改变时间步长对温湿度几乎无影响，因此从节省计算资源与模拟准确性两方面考虑，设置时间步长为 30s 合理。

3.4 典型日获取

夏季高温天气对维持日光温室养殖环境存在巨大挑战，因此可选取温度最高时刻进行模拟，又因夏至日左右温度可达最高，因此选择夏至日（6 月 21 日），并以当天最热时刻（13:00）为典型时刻进行模拟，将上述建立的网格文件加载到 ANSYS FLUENT 中，打开能量方程、湍流方程（ $k-\epsilon$ ）、组分方程和 DO 辐射模型，选择太阳光线追踪（solar ray tracing），并将太阳辐射模型的预测结果加载到日光温室模型中。

3.5 室内外环境参数

根据中国气象网提供的数据，夏至日日出时间逐时温度见图 7，逐时辐射见图 8。

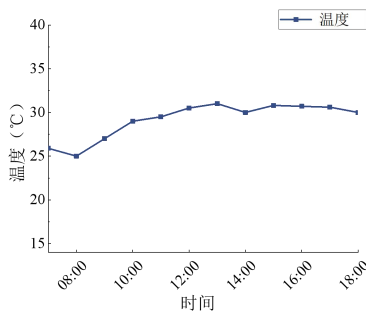


图 7 夏至日室外逐时温度

Fig.7 Hourly temperature outside the greenhouse in typical summer days

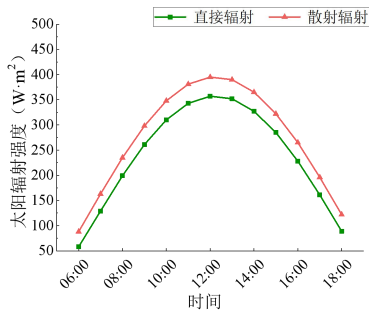


图 8 夏至日室外逐时太阳辐射照度

Fig.8 Hourly solar radiation illuminance outside the greenhouse in typical summer days

在模拟过程中，为方便计算，对室内条件做了合理的简化：（1）计算时，忽略围护物内水分对太阳辐射的吸收和围护物与室外辐射换热等影响因素；（2）认为围护物材质均匀分布，将所有材料的热工参数视为固定值；（3）将日光温室视为封闭性

较好的空间，忽略冬季墙体冻裂的风险。

3.6 边界条件的设定

3.6.1 围护物壁面边界条件

本研究对该日光温室的东西墙、北墙、后坡面、前屋面（半透明薄膜材质）等五个围护结构进行边界条件设置。其中除半透明薄膜外所有围护结构的壁面类型均设置为对流壁面；前屋面设置为半透明壁面，类型为混合壁面，太阳辐射加载在该表面上；自由流的温度可根据室外逐时温度进行计算。前屋面的对流换热系数为 $30W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ，墙体对流换热系数为 $20W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 。

3.6.2 进出口边界条件

本研究将制冷风机的送风口设置为进口边界条件，将回风口设置为自由出口边界。根据在典型日的实测数据，将进口风速设置为 6m/s，温度设为 13°C，并根据进口处的温度以及相对湿度计算水蒸气质量分数，为 0.0069。

3.6.3 辐射边界条件

打开 DO 辐射模型，采用太阳光线追踪法，将日光温室的地理位置及计算时间输入至太阳辐射计算器，再结合太阳光的实际走向，计算出太阳射线的方向与角度。在这个过程中，认为空气不参与辐射换热。并将上文中太阳辐射模型的计算结果作为输入参数，加载进模拟计算过程中，直接太阳辐射和散射太阳辐射的数值由图 4 所得到的计算结果来确定。

3.6.4 食用菌边界条件

将杏鲍菇生长区域设定为多孔介质区域，杏鲍菇对空气的阻力可根据设定瓶体阻力系数来确定^[21]，阻力系数计算结果如表 3 所示。

表 3 瓶体阻力系数的确定

Table 3 Determination of resistance coefficient of bottle

	水平 (x/y) 方向	垂直 (z) 方向
粘性阻力系数	4.4×10^4	1.9×10^3
惯性阻力系数	300	55

杏鲍菇生长参数由厂家提供，可知多孔介质区域散热量为 $10W/m^3$ ，散湿量为 $2.851 \times 10^{-5}kg/(m^3 \cdot s)$ ，模拟时散热及散湿量作为源项的参数可代入到能量守恒方程及组分质量守恒方程中。

采用非稳态计算方法，对该食用菌日光温室最大日出时间内的热湿环境进行模拟，在 z 方向上设置 $-9.81m/s^2$ 的重力加速度，将各流体区域以及各壁

面设置为参与到辐射换热计算。压力—速度耦合项选用 SIMPLEC 算法, 所有离散格式均选二阶迎风格式, 时间间隔设置为 30s, 迭代次数为 1500 次。

4 对比与分析

4.1 模型准确性检验

分别从温度和湿度的角度出发进行模型准确

性的验证, 在典型日日出时间每隔一小时进行一次模拟, 将所建立的模型以及太阳辐射未经修正的模型的模拟结果与实测结果进行对比(编号分别为 1, 2, 3), 通过计算 18 个测点的最大绝对误差, 以及平均相对误差来判断模型的准确性。

夏至日出时段各时间点下所有测点的平均温度见表 4。

表 4 日光温室温度场验证

Table 4 Verification of temperature field in solar greenhouse

时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
1/°C	13.0	13.3	14.0	14.9	15.3	15.8	16.2	15.9	15.5	15.2	14.2	13.4
2/°C	14.1	14.5	14.7	15.3	15.6	16.0	16.7	16.1	15.5	15.0	14.7	14.3
3/°C	13.7	14.0	14.3	14.5	14.8	14.9	15.1	15.0	14.9	14.8	14.5	14.0

因夏季太阳辐射较强, 温度持续在较高水平。随着时间的推移, 温度与太阳辐射强度的变化趋势基本相同, 平均温度在 13:00 左右达到最大, 平均温度达到最高之后, 随着太阳辐射值的降低, 并在室内制冷风机的作用下, 温度逐渐下降。但由于温室围护具有一定的蓄热作用, 17:00 以后平均温度模拟值普遍低于实测值。对比于温度实测值, 所建

立的模型的最大绝对误差为 1.3°C, 平均相对误差为 4.3%; 太阳辐射未经修正的模型最大绝对误差为 1.7°C, 平均相对误差为 4.8%, 因此认为所建立模型的模拟值与实测值吻合度更高。

夏至日出时段各时间点下所有测点的平均相对湿度见表 5。

表 5 日光温室相对湿度场验证

Table 5 Verification of relative humidity field in solar greenhouse

时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
1/%	79.0	79.8	80.6	81.3	81.8	82.1	83.1	82.0	81.4	80.8	80.0	79.5
2/%	78.5	79.5	80.5	81.2	82.5	83.4	85.8	83.8	82.7	81.9	81.0	79.1
3/%	79.8	80.5	82.4	83.7	84.2	84.5	84.0	82.6	81.2	80.1	80.5	80.9

从表中可以看出, 日出时段, 日光温室室内平均湿度有所波动, 但依旧保持在 85% 以下, 在 13:00 左右, 受太阳辐射的影响, 食用菌日光温室室内平均相对湿度模拟值达到最大, 为 83.1%。与实测值进行对比, 所建立的模型最大绝对误差为 2.4%, 平均相对误差为 5.0%, 太阳辐射未经修正的模型最大绝对误差为 3.0%, 平均相对误差为 5.3%, 因此认为模拟值与实测值吻合度较高。

4.2 模拟结果与分析

食用菌日光温室内的温度对作物生长有着重要作用, 在夏季, 较高的温度不仅会导致霉菌滋生, 较强的太阳辐射也会对温室内热湿环境产生较大的影响。因此, 选择夏至日室外温度最高时刻(13:00)作为典型时刻进行研究, 对太阳辐射作用下食用菌日光温室热湿耦合场的分布规律进行分析。

夏至日 13:00 时日光温室温度场模拟结果见图 9。

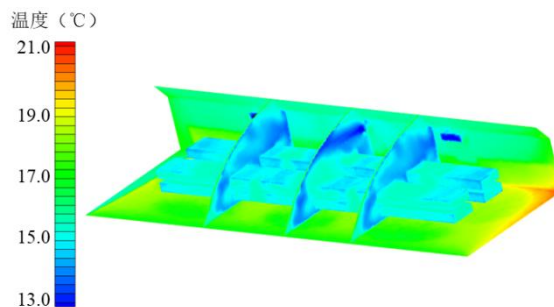


图 9 日光温室温度场的模拟结果

Fig.9 Simulation results of the temperature field of the solar greenhouse

由图 9 可知, 该时刻太阳辐射较强, 温室内靠近北墙的地面处温度最高, 可以达到 21°C。由于空调系统的运行, 使得室内空气流域的温度较低,

温度总体上表现为下低上高的空间分布状态,在下午 13:00 时,外温及太阳辐射值达到最高时,温室平均温度为 16.2℃。杏鲍菇最佳生长温度为 14—16℃,夏季出菇应控制在 19℃ 以下,虽超出杏鲍菇的最佳生长温度,但是仅在夏季极端时刻超过 0.2℃,且远远低于出菇控制温度,并且上节结果表明,全天 75%左右的时间温度在杏鲍菇最适生长范围内,说明热环境满足杏鲍菇的养殖条件。

夏至日 13:00 时日光温室相对湿度场模拟结果见图 10。

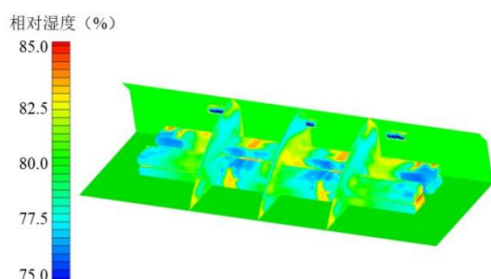


图 10 日光温室相对湿度场的模拟结果

Fig.10 Simulation results of relative humidity field of the solar greenhouse

如图 10 所示,室内的相对湿度变化范围较大,室内温差大的区域,水蒸气分压力差较大,驱动了湿空气的湿迁移,使温度较高的区域相对湿度也相对较高,由于食用菌存在散热散湿作用,使得多孔介质区域相对湿度较高,最高可达 84.9%。杏鲍菇最佳适宜生长相对湿度为 70%—95%,此时日光温室平均相对湿度为 83.1%,在杏鲍菇的生长所需最佳相对湿度范围内,此外上节模拟结果显示,全天湿度均在杏鲍菇最适生长范围内,说明该日光温室即使在夏季极端天气下养殖杏鲍菇也是可行的。

5 结论

(1) 以云遮系数法为理论基础,对辐射进行修正,同时考虑到太阳辐射的散射作用,使模型更加精确。模型准确性检验结果表明,温度最大绝对误差为 1.3℃,平均相对误差为 4.3%;相对湿度最大绝对误差为 2.4%,平均相对误差为 5.0%。相对于太阳辐射未经修正的模型模拟结果误差较小,说明所建立的太阳辐射模型可靠。

(2) 夏季高温高太阳辐射的典型工况下,平均温度超出了食用菌最佳生长温度范围,热湿耦合场分层现象明显。最高温度出现在北墙,温度总体

上表现为下低上高、两侧高中间低的空间分布状态,最高相对湿度出现在杏鲍菇生长区域,平均相对湿度满足杏鲍菇生长所需最佳相对湿度。

(3) 数值模拟结果证明了夏季日光温室养殖食用菌的可行性,并证明了该气流组织形式的合理性,可以降低房建所带来的费用。为生产厂家提供一定的理论参考,间接提高生产效益。

参考文献:

- [1] 2021年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌,2023,42(1):118-127.
- [2] Mahajan P V, Oliveira F A R, Macedo I. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2008,84(2):281-288.
- [3] Chen L, Qian L, Zhang X, et al. Research progress on indoor environment of mushroom factory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(1):25-32.
- [4] 张卓,强天伟,裴雨露,等.基于CFD的局部通风降温设备参数影响研究[J].制冷与空调,2021,35(3):382-388.
- [5] Sun Y, Bao E C, Zhu C, et al. Effects of window opening style on inside environment of solar greenhouse based on CFD simulation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(6):53-59.
- [6] 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].农业机械学报,2016,47(10):332-337.
- [7] 王传清,倪秀男,魏珉,等.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,2023,54(1):351-356+439.
- [8] 李亮亮,王新忠,洪亚杰,等.不同遮阳工况下温室作物冠层辐射场与温度场的CFD分析[J].农机化研究,2019,41(11):192-197.
- [9] Zhang G, Fu Z, Yang M, et al. Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,162:337-347.
- [10] 程雪,黄伊锐,任昊宇,等.基于CFD的花卉温室夏季机械通风模拟[J].河北农业大学学报,2021,44(5):113-118.

量大是造成实验室空调系统投资和运行费用增加的主要因素。采用定、变风量阀独立、实时控制每个实验室的送风量、排风量,在控制实验室的静压差、保证运行安全的情况下,能够极大的降低空调送风系统的运行能耗。

(2) 为保证定、变风量阀的合理、有效应用,应对不同使用功能的实验室进行分类,合理选择定风量阀和变风量阀,同时空调送风机、局部排风机和全面排风机均采用变频调速风机,保证送、排风量在最佳变频范围内调节通风空调系统的送、排风量,达到节能降耗目的。

(3) 对于实验室建筑面积较小时,选用水冷一体式双冷高效变频热泵机组,根据房间送风量的大小实时调节机组制冷量或供热量,可以降低热泵机组的运行能耗。

(4) 实验室房间采用 VRV 多联空调机+新风送风系统,对湿度控制要求较高的实验室,新风处理到 14℃、95% 的机器露点,通过等湿再热至 18℃ 送入室内,新风承担新风冷负荷和房间内的湿负荷,VRV 承担围护结构、人员、照明和设备散热引起的冷负荷。

参考文献:

- [1] 林忠平,张昊,杨云涛,等.某研发中心实验室空调通风系统案例分析与讨论[J].暖通空调,2013,43(5):28-33.
- [2] 俞丽华,王洪军.恒温恒湿科学实验室的空调系统设计[J].制冷与空调,2018,32(5):511-514.
- [3] 孙晓禹,杨硕,刘舒佳.某大型制药研发实验室空调通风系统设计[J].洁净与空调技术,2023,(6):40-43.
- [4] JGJ 91-2019,科研建筑设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [5] 徐伟鹏.某高校现代化实验室通风空调系统设计研究[J].洁净与空调技术,2021,(12):63-66.
- [6] 任松保,喻稳娟.化学实验室通风节能改造案例分析[J].洁净与空调技术,2018,6(2):98-101.
- [7] 皇家空调智能快速变风量调节阀系列产品[M].美国皇家空调,2023.
- [8] 皇家空调机械式定风量阀[M].美国皇家空调,2021.
- [9] 曹斌,陆琼文.医学实验室空调通风系统能效提升技术研究[J].暖通空调,2022,52(9):147-152.
- [10] 周谨.一种新型热回收装置在实验室空调系统中的应用[J].暖通空调,2021,51(8):119-122.

(上接第 224 页)

- [11] 许红军.日光温室太阳辐射模型构建与墙体蓄热层厚度的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [12] 周峰,李正鹏,尚晓冬,等.工厂化瓶栽杏鲍菇培养及出菇技术浅析[J].安徽农学通报,2017,23(12):50-52.
- [13] 王福军.计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:7-12.
- [14] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [15] 郭鸿志.传输过程数值模拟[M].北京:冶金工业出版社,1998.
- [16] Chen L, Qian L, Zhang X, et al. Research progress on indoor environment of mushroom factory[J].

International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(1):25-32.

- [17] 周超帆.食用菌温室环境CFD模拟与模糊控制系统设计[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [18] 周伟.温室环境CFD非稳态模型构建及其在温室温度控制中的应用研究[D].南京:南京农业大学,2014.
- [19] 后尚,田瑞,闫素英.呼和浩特地区太阳辐射模型分析[J].可再生能源,2008,(2):79-82.
- [20] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [21] 段文利,杨洪海,刘宇宏.食用菌培养室通风气流组织改造设计研究[J].制冷与空调,2019,33(6):635-640.