doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.031

基于 CFD 的模块化食用菌工厂气流组织优化与试验

张增林[1]　李思高[1]　刘子明[1]　马恒宇[2]　张　彬[1]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.湖南特力液压有限公司,常德 415100)

摘要:针对模块化食用菌工厂中栽培密度高、气流组织不合理及食用菌呼吸代谢产热引起的热聚集问题,本文提出一种耦合生物热源与多孔介质的 CFD 数值模拟方法,用于食用菌工厂气流组织优化。基于黄伞菌(*Pholiota adiposa*)呼吸速率实测数据,构建了包含内生物热源的各向异性多孔介质模型。模型验证结果表明,仿真与实测温度、风速的均方根误差分别为 0.32℃和 0.08 m/s,模型精度可靠。以原工厂模式为对照,对比分析了异侧下进上出、异侧下进中出和异侧下进下出 3 种气流循环模式对温度场和流场分布的影响,并以变异系数评价多孔介质区域温度均匀性。结果表明,异侧下进上出模式可有效削弱顶部热滞留,其区域最大温差为 1.24℃,平均温度为 11.5℃,较原模式分别降低 0.46℃和 0.24℃,温度变异系数降至 1.6%。实际栽培试验表明,在制冷机组启、停工况下,优化方案的温度变异系数分别为 1.64%和 2.95%,较原模式分别降低 0.92、2.85 个百分点;风速变异系数降至 37.66%,降低 2.77 个百分点。优化后的气流组织使黄伞菌出菇率和成熟率分别提高 0.88、2.80 个百分点,为食用菌工厂气流组织设计与环境精准调控提供参考。

关键词:食用菌工厂;CFD;气流组织;生物热源;温度均匀性

中图分类号:S626.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)17-0334-12　　**OSID**:

Optimization and Experiment of Airflow Organization in Modular Edible Mushroom Factory Based on CFD

Zhang Zenglin[1]　Li Sigao[1]　Liu Ziming[1]　Ma Hengyu[2]　Zhang Bin[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Hunan Teli Hydraulic Co.*, *Ltd.*, *Changde* 415100, *China*)

Abstract: Aiming to address heat accumulation in a modular edible mushroom factory caused by high cultivation density, unreasonable airflow organization, and mushroom respiratory heat production, a CFD-based numerical method coupling biological heat sources with porous media was proposed for airflow optimization. Based on the measured respiration rate of *Pholiota adiposa*, an anisotropic porous-medium model with internal heat sources was established. The root mean square errors between simulated and measured temperature and air velocity were 0.32℃ and 0.08 m/s, respectively, indicating good model accuracy. Using the original factory configuration as the control, three airflow organization modes were compared, and the coefficient of variation was used to evaluate temperature uniformity in the porous-medium region. Results showed that the opposite-side bottom-supply and top-return mode effectively reduced heat retention at the top, with a maximum temperature difference of 1.24℃, an average temperature of 11.5℃, and a temperature coefficient of variation of 1.6%, which were reduced by 0.46℃, 0.24℃, and 1.9 percentage points, respectively, compared with those of the original mode. Cultivation experiments further showed that, under cooling-on and cooling-off conditions, the temperature coefficients of variation of the optimized scheme were 1.64% and 2.95%, respectively, which were reduced by 0.92 and 2.85 percentage points, respectively, compared with those of the original mode, while the air velocity coefficient of variation was decreased to 37.66%, a reduction of 2.77 percentage points. The fruiting rate and maturity rate of *Pholiota adiposa* were increased by 0.88 and 2.80 percentage points, respectively. The results can provide a reference for airflow design and precise environmental control in edible mushroom factories.

Key words: edible mushroom factory; CFD; airflow organization; biological heat source; temperature uniformity

收稿日期:2026-03-25　修回日期:2026-04-16

基金项目:新疆维吾尔自治区厅地联动项目(2024B04028)

作者简介:张增林(1976—),男,副教授,博士,主要从事智慧农业关键技术研究,E-mail:zzlin@nwafu.edu.cn

0　引言

植物工厂是一种集约化的农业种植方式[1]，凭借对作物生长微环境的精准调控，成功打破季节和地域限制，实现了作物周年连续生产[2]。其中，模块化设计模式因具备高度标准化的结构属性与显著的能效竞争优势，已成为当前设施农业发展的核心聚焦点[3-4]。尽管技术演进迅速，但目前可规模化栽培的品种依然相对单一[5]，因此，引入珍稀食用菌等高附加值品种，成为重塑产业价值链、提升经济效益的关键路径。食用菌工厂化生产过程对空间环境的均衡性有着严格的要求。在模块化封闭空间内，流场的分布状态直接影响食用菌能量代谢的速率与其生物量合成的一致性。模块化食用菌工厂在实际运行中，空调循环系统的送回风口布局十分关键，不当的布局设计极易导致室内气流温湿度不均匀性问题[6]。

近年来，聚焦设施农业热环境失衡的瓶颈问题，国内外研究者引入计算流体力学（CFD）理论，围绕气流组织重构开展了深度探索，并取得显著进展。然而，现有研究[7-12]往往将栽培区域简化为仅具有阻力特性的被动多孔介质。由于食用菌不进行光合作用，其子实体发育过程中旺盛的呼吸代谢会持续向空间释放生物产热。在高密度、模块化的封闭栽培空间内，此类内源性的主动生物热源极易在栽培架核心区域诱发局部热积聚，成为驱动微环境非均衡演化的关键内扰源。

为此，本文以模块化食用菌工厂为原型，结合其实际几何构型并集成菌包呼吸产热的试验数据，构建耦合各向异性多孔介质与生物代谢热源的 CFD 三维解析模型。设计并构建 3 种通风策略，仿真对比优选出高效送回风布局，旨在通过实地种植试验，为模块化食用菌生产空间的环境均衡化调控与参数精准管控提供参考。

1　食用菌工厂内部流场计算理论

1.1　工作原理

本文以陕西省杨凌智能农业装备创新中心食用菌方仓研发生产基地的模块化食用菌工厂为研究对象，围护材料为聚氨酯复合板。仓体外形尺寸（长 × 宽 × 高）为 10.0 m × 2.3 m × 2.6 m。仓体内部核心栽培区沿长轴方向对称排布 3 组栽培架（南北两侧及中间），架体结构由纵向支撑骨架与种植网格单元组成，单体种植网格规格为 120 mm × 115 mm × 120 mm。为改善气流组织并优化散热路径，黄伞菌包在网格内采取空间交错冗余排布，即在水平与垂直维度均预留空置网格作为流动缓冲位。工厂整体布局如图 1 所示。

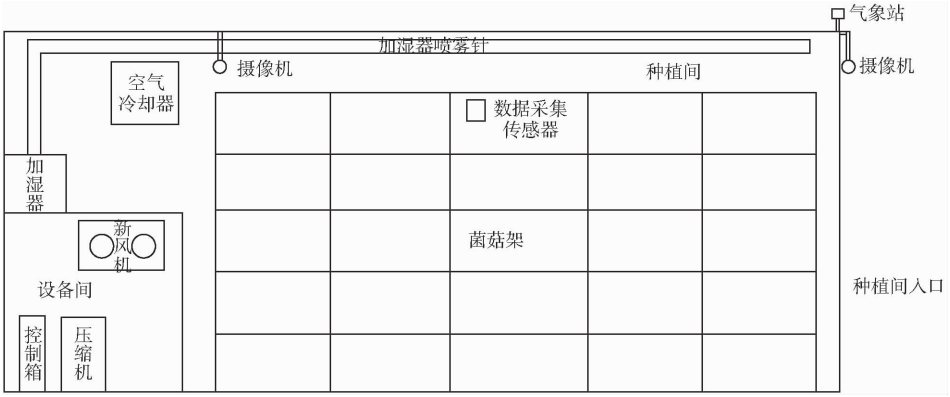


图 1　模块化食用菌工厂整体结构示意图

Fig. 1　Overall structure of modular edible mushroom factory

1.2　三维模型

该模块化食用菌工厂采用“下送上回”式通风策略。底部送风系统依托导风槽定向引流，导风槽全长 10.06 m，深 0.06 m，槽间距 0.035 m，将进风区域离散为 36 个独立的送风单元；顶部回风口截面尺寸为 2.29 m × 0.14 m。利用 ANSYS Workbench 平台的 DesignModeler 组件构建食用菌工厂的三维实体模型，如图 2 所示，以仓体底面西南角为坐标原点（0,0,0），规定正北、垂直向上以及正东方向依次对应 X、Y、Z 轴的正向。

为兼顾计算精度与仿真效率，本文对几何实体实施了合理的物理简化：设定仓体为全密闭式，省去仓门等细微结构。针对仓内种植的 800 袋黄伞菌包群体，为规避实体精细建模产生的巨大算力开支，将栽培架区域等效定义为各向异性多孔介质域；将菌包生理代谢释放的呼吸热通过定义能量源项（Energy Source）加载至求解系统。几何拓扑构建完成后，利用 Meshing 组件执行网格离散化处理，最终将模型导入 ANSYS Fluent 求解器开展数值解算。

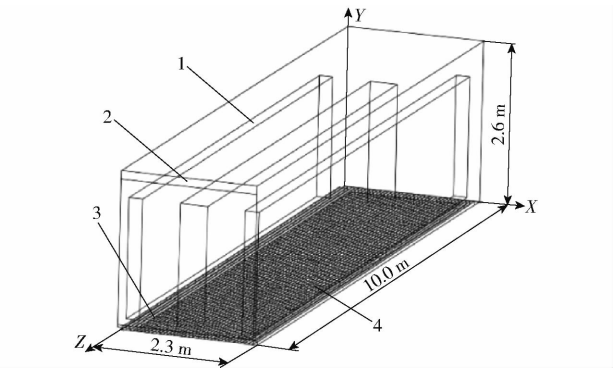


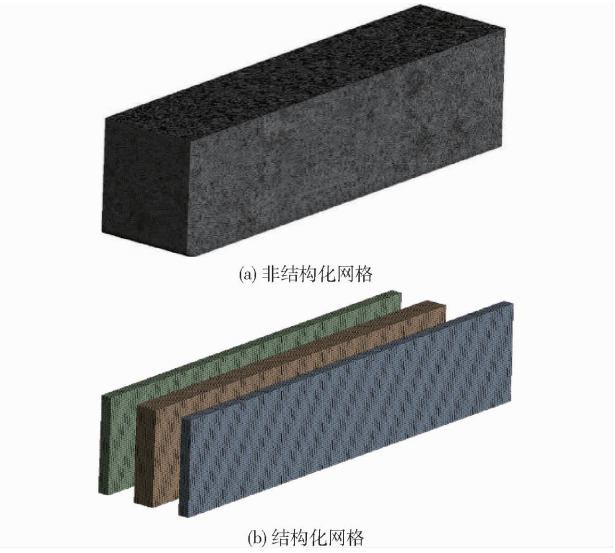
图 2 试验食用菌工厂三维模型

Fig. 2 Experimental edible mushroom factory 3D model

1. 种植架区域 2. 回风口 3. 进风口 4. 导风槽

1.3 网格划分

控制方程的网格划分质量决定空间离散的高度,划分优劣直接制约数值仿真的计算精度与收敛性能[13]。鉴于模块化食用菌工厂内部几何特征呈现明显的多尺度属性,尤其是底部密集排布的微小导风槽结构,单一网格离散策略难以兼顾边界捕捉的精确度与计算资源利用的经济性[14]。因此,本文将计算域划分为空气流场域与多孔介质域,并采取分区混合网格划分策略:针对拓扑结构较规则的多孔介质区,优先构建六面体结构化网格以优化节点规模,以此提升运算效率并加速收敛进程;对于边界条件复杂的空气域,则应用几何拓扑适应性更强的非结构化网格,以确保对不规则形面的精确刻画。全场网格离散化方案如图 3 所示。



(a) 非结构化网格

(b) 结构化网格

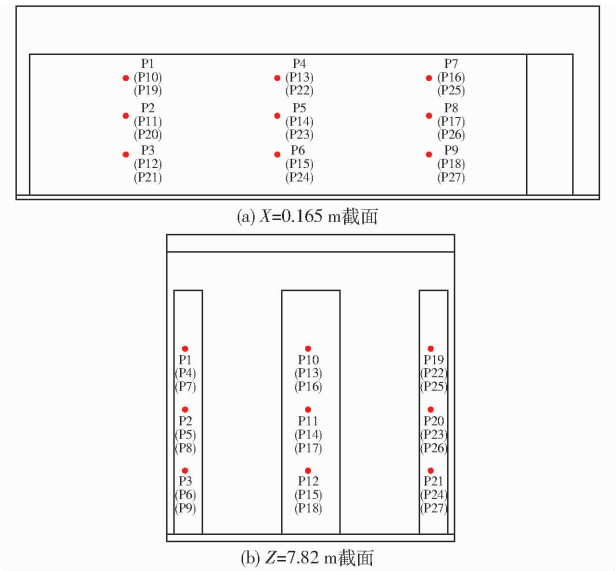
图 3 计算域网格划分

Fig. 3 Computational domain meshing

1.4 试验仪器与测点部署

为确立 CFD 数值仿真所需的初始边界条件并验证 CFD 仿真模型的有效性,本研究于 2024 年 8 月 1 日(典型夏季晴好天气)对模块化食用菌工厂内部环境场执行了系统性原位实测。监测参量涵盖空气流速矢量、温场演变特征、围护结构热物性状态及空气相对湿度。试验选用的核心仪器及其计量技术指标为:流速测定采用 TES1340 型高灵敏度热敏式风速仪(量程为 0 ~ 30 m/s,分辨率为 0.01 m/s);气温采集选用 RT1561 型铂电阻温度计(精度 ± 0.1℃);壁面热状态通过希玛 AT400 型红外热辐射测温仪(测量范围为 -50 ~ 400℃)执行多点巡检。

此外,为全面解析食用菌活性生长区内的环境空间异质性特征,本研究遵循空间网格化采样原则,在仓体内部栽培区域布设了包含 27 个监测节点(P1 ~ P27)的传感阵列,其三维拓扑分布详见图 4。监测点位沿气流演变路径分布于 X 为 0.165、1.145、2.125 m 3 个特征横截面上;在垂直方向,针对栽培架的层级结构,分别于 Y 为 0.662 5、1.150 0、1.637 5 m 处各设置 9 个测点。每个监测节点均固定布置佳锂温湿度集成传感器以实现温湿度自动连续监测,并将其作为风速仪与探针式测温仪的巡检采样位,以确保多物理场参数的同步捕捉,为 CFD 模型校验提供多维实测基准。



(a) X=0.165 m截面

(b) Z=7.82 m截面

图 4 食用菌工厂测点布置

Fig. 4 Measurement point layout of edible mushroom factory

1.5 边界条件设置

1.5.1 入口边界与出口边界

模块化食用菌工厂中,室内外空气交换主要依托机械通风系统实现。在试验期间开启空调制冷模式,利用 TES1340 型热敏式风速仪与探针式电子测温仪对送风参数进行测定。在进风口截面采用等面积法均匀布置 5 个采样点,测得风速与温度的算术平均值分别为 6.2 m/s 和 10.2℃。利用实测数据,设定数值模拟的边界条件:进风口定义为速度入口(Velocity-inlet),风速与温度分别配置为 6.2 m/s 和 10.2℃;回风口设定为压力出口(Pressure-outlet),其

相对压力值设定为 0 Pa[15]。

1.5.2 围护结构传热边界

模块化食用菌工厂的围护结构构成了室内外环境的热平衡屏障，其顶面及四周壁面均采用具有显著热惰性特征的聚氨酯彩钢复合板，极大削弱了太阳辐射对仓内微环境的热扰动。该复合夹芯结构通过 3 层功能构件的传热耦合实现保温：外层彩钢板在吸收太阳能量的同时与大气执行对流换热；中间聚氨酯层作为核心阻热层，负责切断内外壁板间的导热路径；内层彩钢板则与室内栽培空间完成末端能量交换。

由于彩钢板导热系数较大，忽略其热阻，经计算，该围护结构的综合传热系数为 0.464 W/(m²·K)。

在数值仿真模型构建中，将仓体周侧墙体、地板及顶板均设定为壁面边界条件，并根据实际受热物理特性实施差异化定义[16]。依据环境热扰动差异，将边界条件细化为直射受热面、背阴外墙面以及非直射隔离面。利用希玛 AT400 型红外测温仪执行多点采样测定，结果显示：受直射的顶面与南墙均温达 51℃，背阴北墙均温为 44.4℃，而处于遮蔽状态的东西墙均温为 36.4℃。将上述实测温度数据加载至对应边界，并将底面与导风槽设为绝热壁面(Adiabatic wall)。

2　食用菌工厂内部流场仿真模型构建

2.1　控制方程

模块化食用菌工厂内的空气流动涉及多个物理场强耦合，属于典型的复杂不规则流动传热过程[17]，该过程遵循质量、动量及能量守恒定律。CFD 数值仿真的核心任务是通过控制方程组解算流场、温度场及压力分布等关键物理参量。这些方程通常基于质量、动量及能量守恒定律衍生而成[18-19]。质量守恒方程旨在约束流场中的质量守恒特性，确保流体在时空域内的迁移不发生非物理性的质量逸散。该定律的偏微分控制表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{1}$$

式中　t——时间，s

ρ——流体密度，kg/m³

$\boldsymbol{v}$——流速矢量，m/s

∇——哈密顿算子，m⁻¹

动量守恒方程作为流体动力学的基本控制方程，Navier-Stokes(N-S)方程揭示了流场内部受力平衡与运动响应的非线性耦合关系，其通用的偏微分表达形式为

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}\boldsymbol{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{v} + f \tag{2}$$

式中　p——流体压力，Pa

μ——流体粘度，Pa·s

f——外力源(如重力)，N/m³

能量守恒方程表征了流体系统内部热能的转换机理与时空迁移规律。能量控制方程的通用标量描述式为

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\boldsymbol{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \tag{3}$$

式中　E——单位质量的总能量，J/kg

k——热导率，W/(m·K)

T——热力学温度，K

$\dot{q}$——热源项，W/m³

2.2　湍流模型

模块化食用菌工厂内气流呈现显著的高雷诺数及强非线性动力学特征，若采用直接数值模拟(Direct numerical simulation，DNS)将面临巨大的算力开支。为平衡解析精度与求解效率，本文采用雷诺时均(Reynolds-averaged navier-stokes model，RANS)方程，并选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型实现控制方程的闭合[20-21]。

受壁面束缚效应影响，近壁区流场存在显著的速度梯度与复杂的流动演变。为规避网格过度细化诱发的资源消耗，本文引入标准壁面函数(Standard wall function)对近壁区域进行力学响应处理[22]。

2.3　多孔介质模型

2.3.1 多孔介质阻力系数

为降低模型复杂性，本文对黄伞菌生长区的几何拓扑进行了科学简化。所谓多孔介质，即由固体基质及其内部交错的孔隙通道共同构成的连续体，其孔隙内充满流体运动空间[23]。在构建计算域模型时，剔除了第 1 层与第 12 层的非负载空置区域，并将栽培架等效为对气流无阻碍作用的透空构件。仓体内栽培区域采用对称布局，中间架体宽度设计为侧翼的两倍，具备双向负载能力。在数值解析中，本文将菌包阵列等效定义为多孔介质区域。

依据黄伞菌包的实际几何形态与栽培排布方式，利用三维建模软件构建菌包阵列局部模型，分别表征南北两侧栽培区与中间栽培区的结构特征。为获取菌包阵列在不同主流动方向上的阻力特性，进一步建立了局部 CFD 风洞模型，如图 5 所示。考虑到菌包群体对气流阻滞作用在不同方向上存在明显差异，分别对气流沿水平方向穿过菌包间隙和沿垂直方向穿过层间空隙 2 种情形进行了数值测试。

在局部 CFD 风洞模型中，入口设置为速度入口(Velocity-inlet)，出口设置为压力出口(Pressure-outlet)，壁面采用无滑移边界条件，湍流模型选用标

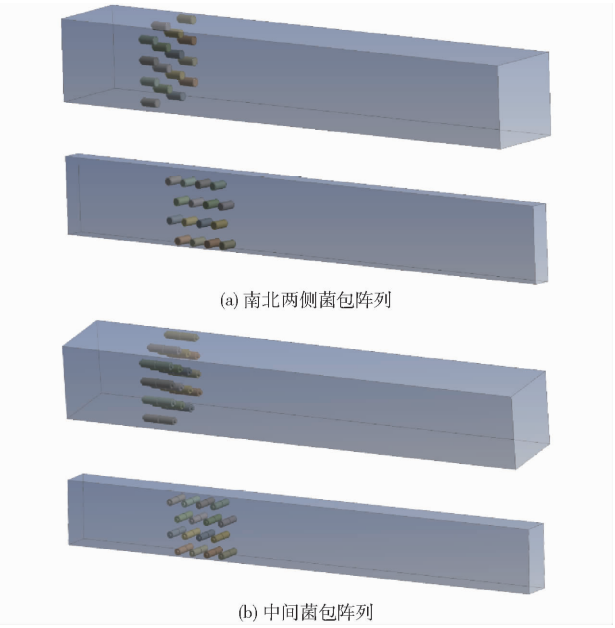


图 5 黄伞菌包阵列局部 CFD 风洞模型示意图

Fig. 5 Schematics of local CFD wind-tunnel model for mushroom-bag arrays

准 $k-\varepsilon$ 模型。为覆盖食用菌工厂内可能出现的流速范围,入口边界风速分别设置为 0.1、0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 m/s。各工况计算收敛后,提取入口截面与出口截面的面积加权平均静压,二者之差定义为该流速条件下菌包阵列的压差。

多孔介质域的流动阻尼系数由黏性阻力系数与惯性阻力系数共同表征。基于不同入口速度下得到的压差数据,建立压差与速度之间的拟合关系,反演多孔介质的黏性阻力系数和惯性阻力系数。压力降随流速的变化规律及阻力系数的计算式为

$$\Delta P = au^2 + bu \tag{4}$$

其中

$$a = \frac{1}{2}c_2\rho_{air} \tag{5}$$

$$b = \frac{\mu}{\alpha} \tag{6}$$

式中 ΔP——进、出口压差,Pa

u——进口风速,m/s

ρ_{air}——空气密度,kg/m^3

c_2——惯性阻力系数

α——黏性阻力系数的倒数

基于不同入口速度下获得的压差数据,依据式(4)~(6)对菌包阵列多孔介质阻力参数进行反演。结果表明,南北两侧栽培区水平轴向惯性阻力系数和黏性阻力系数分别为 0.36 和 2 971,垂直轴向分别为 2.00 和 13 990;中间栽培区水平轴向惯性阻力系数和黏性阻力系数分别为 0.19 和 2 678,垂直轴向分别为 1.95 和 74 925。上述参数用于各向异性多孔介质模型赋值,以表征菌包阵列在不同流动方向上的流动阻尼差异。

2.3.2 生物热源模型的构建与参数设定

黄伞菌的产热特性是实现 CFD 精确仿真的核心参量。黄伞菌作为典型的变温结实性真菌,在高密度栽培状态下释放的呼吸热是驱动食用菌工厂微环境热平衡演变的关键因素。在黄伞菌的发育过程中,生理代谢主要表现为呼吸作用与蒸腾作用;其中,呼吸代谢通过消耗菌丝体基质内的有机物并吸收 O_2,在释放 CO_2 的同时产生生物潜热。受呼吸生热效应驱动,菌包表面温度略高于环境气温,从而形成菌丝体与环境空气间的显热交换过程。同时,受培养基质与环境空气间水分梯度影响,菌包开口处伴随有一定的水分蒸发。鉴于食用菌工厂内维持高湿环境,基质水分蒸发强度微弱,故在数值模拟中忽略水分蒸发引起的潜热交换。在构建 CFD 数值模型时,通过在多孔介质区域定义能量源项以表征黄伞菌的呼吸热负荷,其源项数值依据试验测得的呼吸速率经热力学转化核算得出[24]。

(1)黄伞菌呼吸作用

食用菌生理呼吸过程伴随 O_2 的消耗与 CO_2 的释放,通常以单位时间内 CO_2 释放量或 O_2 消耗量表征其呼吸强度。为探究环境温度对呼吸特性的影响,在黄伞菌适宜生长温区内设置 15、16、17、18℃,共 4 个温度梯度开展试验。试验样本取自生产工厂内处于发育期的黄伞菌包,利用 HWS-50B 型智能气候培养箱营造恒温恒湿环境。通过实时监测培养空间内 CO_2 浓度的演变过程,设定数据采集频率为 1 次/min,据此核算不同温度工况下黄伞菌的呼吸速率。

(2)黄伞菌的呼吸速率

在食用菌环境生理学研究中,呼吸速率被视为刻画子实体发育过程中生物能量代谢活跃度的关键特征量。为满足速率计算的量纲一致性要求,执行解析前需将监测获取的 CO_2 体积浓度转换为质量浓度,具体转换公式为

$$C_m = C_v\frac{M_{CO_2}}{B} \tag{7}$$

式中 C_m——质量浓度,mg/m^3

C_v——体积浓度,μmol/mol

M_{CO_2}——CO_2 的摩尔质量,取 44 g/mol

B——标准状态下气体的摩尔体积(0℃时,B 为 22.4 L/mol)

本试验采用密封系统法测定黄伞菌的呼吸速率,其计算公式为

$$R^n_{CO_2}=\frac{[CO_2]_n-[CO_2]_{n-1}}{\Delta t}\frac{V_a}{V_c} \tag{8}$$

式中　$R^n_{CO_2}$——第 n 时刻的呼吸速率，mg/(m³·h)

$[CO_2]_n$——试验箱内第 n 时刻 CO_2 的质量，mg/m³

$[CO_2]_{n-1}$——试验箱内第 $n-1$ 时刻 CO_2 的质量，mg/m³

Δt——2 次测量的时间间隔，h

V_a——试验箱内空气体积，m³

V_c——试验箱内黄伞菌包的体积，m³

试验箱内的空气体积计算式为

$$V_a=V_b-V_c-V_d \tag{9}$$

式中　V_b——试验箱总体积，m³

V_d——试验仪器所占体积，m³

若基于式(8)以 1 min 为周期进行核算，得到的呼吸速率会出现较明显的瞬时波动。这是因为密封系统法下呼吸速率由相邻时刻 CO_2 质量差值计算得到，对采样间隔和传感器分辨率较为敏感；同时，培养箱内气体混合状态、菌包个体差异以及短时环境微扰也会对瞬时计算结果产生影响。为降低差分计算带来的波动干扰并提升趋势识别能力，本文将呼吸速率的计算时间步长调整为 2 min，处理后的黄伞菌包呼吸速率变化规律如图 6 所示。

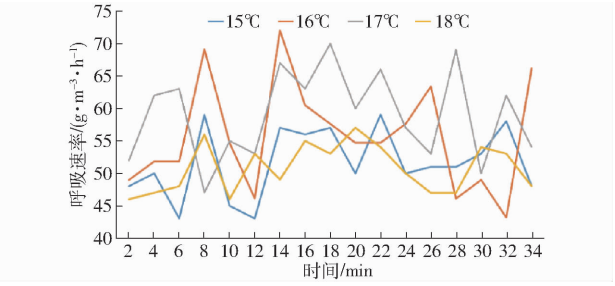


图 6　不同温度下黄伞菌呼吸速率变化曲线

Fig. 6　Respiration rate of *Pholiota adiposa* at different temperatures

图 6 表明，在 15 ~ 18℃ 温度范围内，黄伞菌呼吸速率的瞬时值虽存在一定波动，但不同温度处理下的总体变化趋势相近，平均水平差异较小，其中 15℃和 18℃ 工况下的呼吸速率略低于 16℃ 和 17℃。这说明在黄伞菌适宜生长温区内，环境温度对同一发育阶段菌包呼吸代谢强度的影响相对有限。考虑到本文 CFD 模拟采用稳态计算，后续热源项需要表征的是黄伞菌包群体在该阶段的平均产热水平，而非瞬时波动值，因此后续呼吸热计算采用各温度工况下呼吸速率的平均值作为等效恒定热源处理。

(3)黄伞菌的呼吸热

鉴于黄伞菌生理代谢路径的高度复杂性，为兼顾数值计算的收敛性与精度，本研究将葡萄糖视为典型呼吸底物，确立了黄伞菌的呼吸代谢总体化学方程式为

$$6O_2+C_6H_{12}O_6\longrightarrow 6CO_2+6H_2O+\text{能量} \tag{10}$$

在子实体生长发育期，菌体通过高效的有氧氧化作用降解栽培基质内的有机碳源，在执行气体交换的同时释放生物潜热。由于呼吸产热过程与 CO_2 释放过程具有对应关系，因此本文以实测呼吸速率为基础，对黄伞菌包群体的呼吸热进行估算[25]。呼吸产热通量与呼吸速率高度耦合，参照式(10)所示的化学计量逻辑，每消耗 1 mol 葡萄糖伴随 6 mol CO_2 的释放并产生 2 867.3 kJ 热能，据此得到呼吸热与速率间的解析模型为

$$Q=\eta\left(\frac{2\,867.3\ \text{kJ}}{6\ \text{mol}}\right)\frac{R_{CO_2}}{M_{CO_2}} \tag{11}$$

式中　Q——呼吸作用产热速率，kJ/h

η——有效使用比例

R_{CO_2}——呼吸速率，g/(m³·h)

为便于工程计算，本文结合真菌生长过程中代谢能分配的特点，对式(11)进行工程化简。相关研究[26]表明，真菌代谢底物所释放的能量通常在生物量形成与热量散失之间进行分配，因此采用能量分配系数对呼吸热进行修正。在此基础上，本文取约 40% 的代谢能用于生长合成，其余部分以热量形式释放。经核算，每释放 1 g CO_2 约伴随 6.52 kJ 的热量产生。在该假设下，式(11)可进一步化简为呼吸热系数与呼吸速率直接相关的表达形式，即

$$Q=k_bR_{CO_2}V_e \tag{12}$$

式中　k_b——呼吸热系数，取 6.52 kJ/g

V_e——食用菌工厂内黄伞菌包总体积，m³

通过对 4 组试验数据进行均值处理，测得黄伞菌呼吸速率均值为 56.5 g/(m³·h)；依据式(12)核算得到仓体内黄伞菌包群体的总生热速率为 453.11 kJ/h。

为确定 CFD 模型中多孔介质区域的热源强度，需将产热速率 Q(kJ/h)转换为产热功率 P(W)，计算方法为

$$P=\frac{5}{18}Q \tag{13}$$

多孔介质的热源系数通过功率与体积的比值得出

$$H=\frac{P}{V_m} \tag{14}$$

式中　H——热源系数，W/m³

V_m——多孔介质区域的总体积，m³

依据式(13)、(14)的量化推导，确立了栽培区

多孔介质域的生热强度系数为 7.74 W/m^3。在数值解算器配置阶段,将该特征值作为能量源项(Energy Source)离散化映射至对应的多孔介质能量守恒方程中,还原菌包群体的生物产热机制及其对仓体宏观热环境的扰动规律。

2.4 微分方程的离散与求解

CFD 数值仿真的底层逻辑在于通过空间离散算子将连续域内的偏微分控制方程组重构为离散的非线性代数体系,从而满足计算机对物理场的逻辑解析需求。在有限差分、有限体积及有限元等计算流体范式中,本文采用有限体积法,依托其天然的物理量守恒特性以及对复杂拓扑边界的强适应能力,已成为当前流场数值解析领域的主流选择。完成空间域离散后,针对不可压缩流动中速度矢量场与压力标量场间的强非线性耦合特征,必须适配高效的数值算法以驱动离散方程组的迭代闭合。

本文选取压力联动方程组的半隐式解法(SIMPLE 算法),通过“预测-修正”迭代机制协调压力场与速度变量的交互耦合,旨在确保流场解稳健收敛的基础上,达成数值计算稳定性与算法经济性的动态权衡。鉴于模块化食用菌工厂内流场具有稳态、不可压缩湍流的宏观物理属性,采用 SIMPLE 算法能够有效平衡数值计算精度与解算速率。

3 CFD 模型验证

模块化食用菌工厂具有良好的密封性且内部气流流速较低,其仓内气流组织可简化为定常、不可压缩的湍流流动过程。利用 ANSYS Fluent 执行数值解算,设定各项物理量的残差收敛阈值:能量方程设为 1.0×10^{-6},连续性方程、动量及湍流特性项等均设为 1.0×10^{-3}。

初始化完成后,设定最大迭代步数为 1 000 次;计算历经 692 次迭代后残差曲线趋于平稳,各项指标均达到预设精度,流场实现稳态收敛。

3.1 原气流组织下温度场与流场分布特征

基于前述生物热源和各向异性多孔介质参数,建立模块化食用菌工厂 CFD 模型,并对原“下送上回”气流组织模式下的温度场和速度场进行模拟分析。仿真结果表明,原气流组织能够在仓内形成由底部送风区域向上部回风口流动的基本循环,但受菌包阵列阻力和回风口位置影响,栽培区内部温度场和流场仍存在一定空间非均匀性。

从温度场分布看,如图 7、8 所示,冷空气由底部导风槽进入后沿栽培架间隙向上扩散,并在顶部回风口附近汇集。由于黄伞菌包呼吸热源持续释放,且菌包阵列对气流具有阻滞作用,部分栽培区域换热能力不足,热量不易及时带出,形成局部温度偏高区。该现象说明,菌包生物热源和栽培区流动阻力是影响仓内温度均匀性的主要因素。

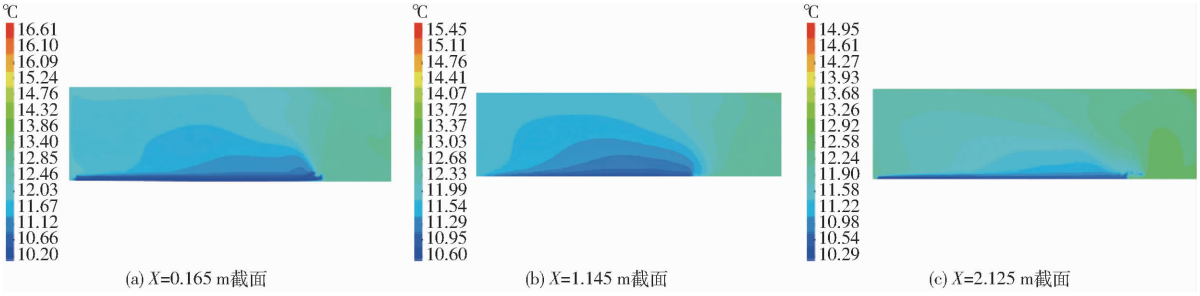


图 7 横截面温度云图

Fig. 7 Cross-sectional temperature cloud diagrams

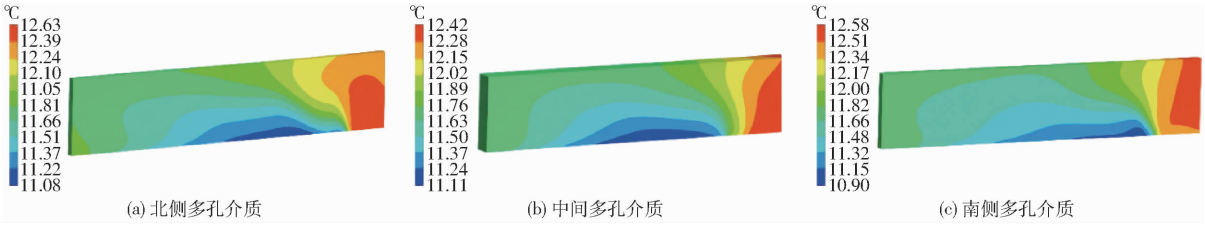


图 8 多孔介质区域温度云图

Fig. 8 Temperature cloud maps of porous media area

从速度场分布看,如图 9、10 所示,底部送风口附近形成局部高速区,气流进入菌包栽培区后速度逐渐衰减,并在回风口附近发生汇集。由于菌包阵列内部孔隙结构复杂,气流在穿过栽培区时受到明显阻滞,局部区域风速较低,削弱了空气与菌包之间的热量交换能力。上述结果表明,原气流组织模式下仍存在气流分布不均和局部热量滞留问题,有必要进一步优化回风口位置和气流循环路径。

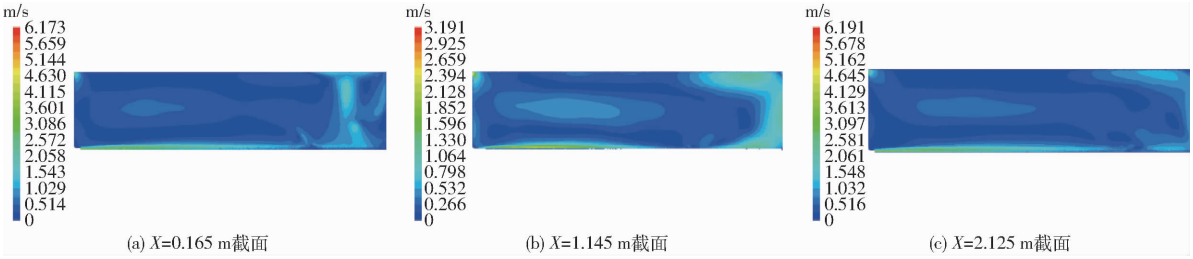


图 9　横截面速度云图

Fig. 9　Cross-sectional velocity contours

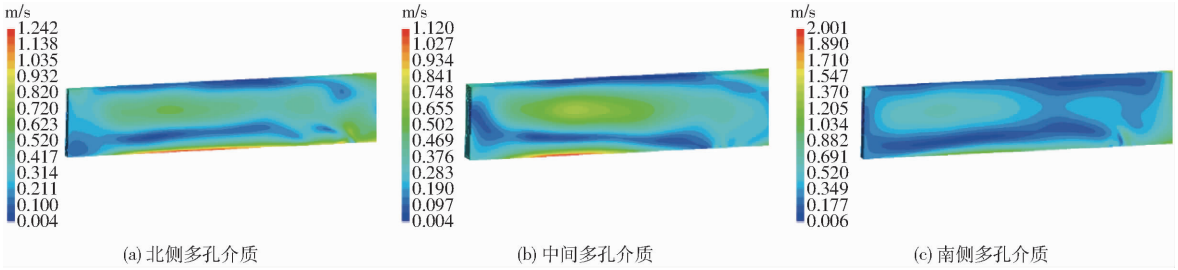


图 10　多孔介质区域速度云图

Fig. 10　Velocity cloud maps of porous media area

3.2　模型验证

为校验 CFD 数值模型的可靠性及边界条件设置的合理性，本文引入均方根误差（Root mean square error，RMSE）作为定量评价指标，旨在对空间离散监测点的实测数据与仿真解算结果进行比对分析。RMSE 用于表征模拟值与实测值之间的整体偏差，是判定边界条件设置合理性的关键准则。

图 11 给出了 27 个测点处温度场与流场模拟值与实测值对比结果。结果表明，温度场的 RMSE 为 0.32℃，风速场的 RMSE 为 0.08 m/s，说明所建立的 CFD 模型能够较好反映模块化食用菌工厂内的温度场与流场分布特征，可用于后续气流循环模式的优化分析。

4　送风方式优化对比分析

根据第 3 节确立的数值校验基准，本文所构建的 CFD 模型在预测精度与物理可信度方面展现出优异的鲁棒性，并揭示了既有送风策略的结构性缺陷。模拟结果映射出仓体内普遍存在的“贴壁流（Wall-clinging flow）”效应：大量冷气流倾向于沿围护结构内壁面高速流动，致使核心栽培空间陷入低动能的“流动滞止区”，气、液、固三相间的热质交换效能严重受限。此外，受局部热量累积与流动短路的耦合驱动，近西侧壁面区域的升温趋势显著，导致黄伞菌生长区内的最大温差达 1.7℃。微环境的空间非均衡性将直接干预食用菌的生理代谢节律，诱发子实体发育步调失调及单产下降等生产风险。为此，本文提出通过重构送、回风系统的循环模式以改善仓内流场结构。

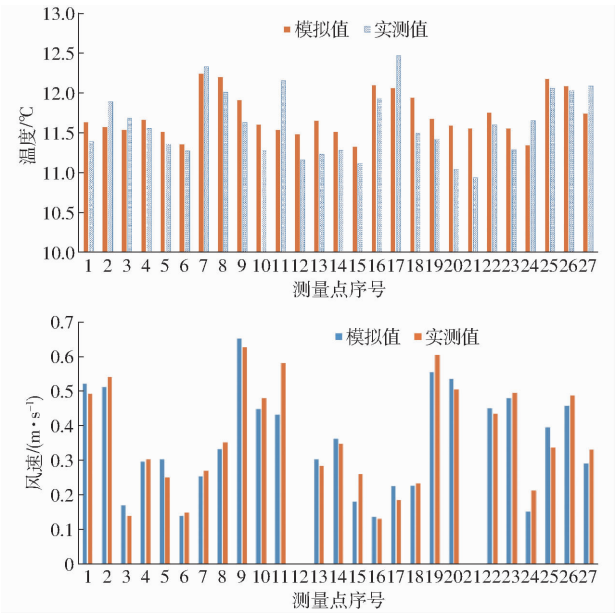


图 11　食用菌工厂内各测点模拟值与实测值比较

Fig. 11　Comparison of simulated and measured values at each measuring point in edible mushroom factory

4.1　优化方案设计

为削弱原同侧送回模式下可能形成的局部气流短路和热量滞留，本文保持底部导风槽结构不变，仅调整回风口在西侧壁面的高度位置，比较不同回风高度对仓内温度场和流场分布的影响。以原模式模块化食用菌工厂实测工况作为对照组（方案 0），在保持底部送风结构及送、回风口有效过流面积不变的基础上，对回风口位置进行重构。方案 0 为东侧同侧送回模式；方案 1 为异侧下进上出模式，回风口布置于西侧壁面上部，高度为 2.5 m；方案 2 为异侧下进中出模式，回风口布置于西侧壁面中部，高度为

1.3 m;方案 3 为异侧下进下出模式,回风口布置于西侧壁面下部,高度为 0.1 m。各优化方案回风口尺寸均为 1.56 m×0.205 m,除回风口位置外,其余边界条件、网格划分及求解设置均与方案 0 保持一致。

4.2 气流组织优化机理分析

方案 1 采用下送上回式,冷气流自东侧壁面底部送入,贯穿栽培区域后从西侧壁面顶端回风口排出。数值计算结果如图 12a 所示,多孔介质区域最高及最低温度分别为 11.93℃和 10.69℃,全场最大温差缩减至 1.24℃,较方案 0 优化了 0.46℃。该区域平均温度为 11.5℃,较方案 0 下降 0.24℃,温度变异系数(CV)降至 1.6%。流场拓扑结构如图 13a 所示,仓体内气流分布整体趋于稳定,除近地表及回风断面受射流与汇流效应影响流速较高外,中部及东墙近域受流体动能耗散驱动也形成了局部再循环涡旋。

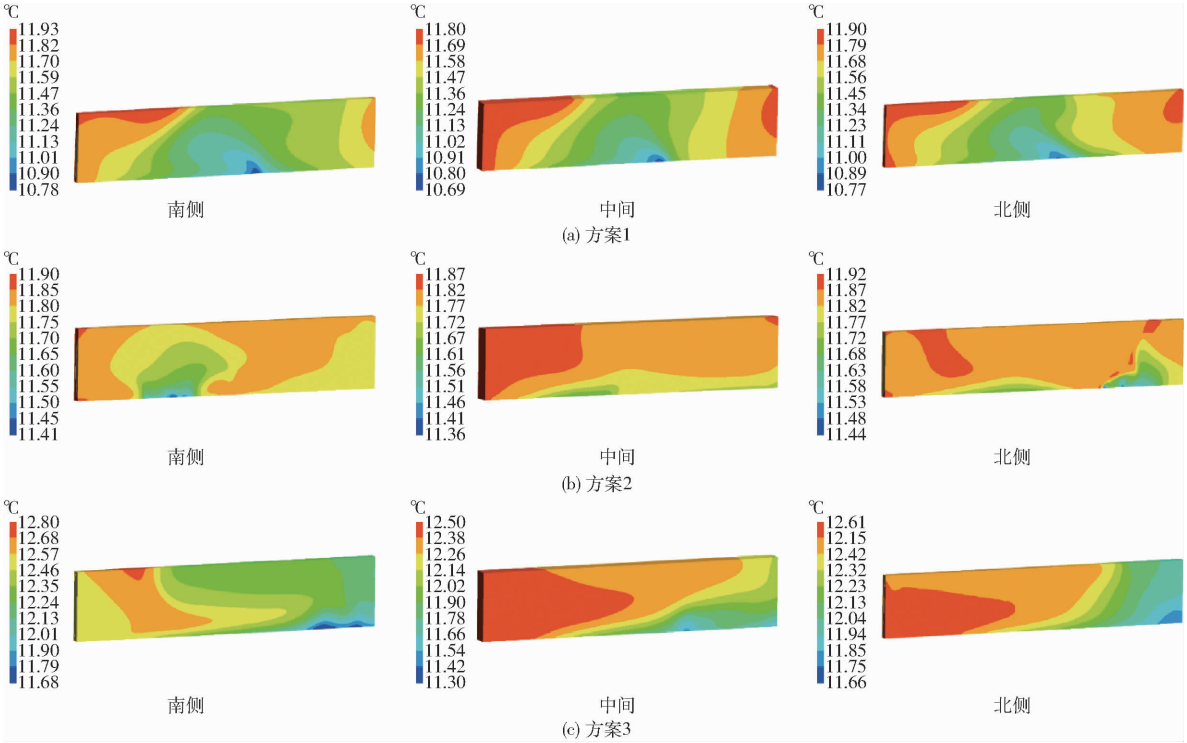


图 12 各方案多孔介质区域温度云图

Fig. 12 Temperature contours of porous media regions under different schemes

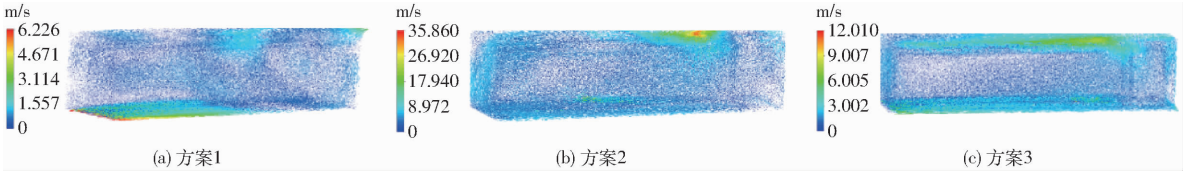


图 13 各方案食用菌工厂风速矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagrams of edible mushroom factory under different schemes

方案 2 采取下送中回式,气流自东侧墙底部送入,并由西侧墙中部回风口排至仓外。数值计算结果如图 12b 所示,多孔介质区域最高温与最低温分别为 11.92℃和 11.32℃,全场最大温差显著缩减至 0.6℃,较方案 0 降低了 1.1℃。尽管该区域平均温度(11.8℃)较方案 0 略高 0.06℃,但其温度变异系数(CV)仅为 1.3%。速度矢量分布如图 13b 所示,受回风路径改变引发的压力梯度重构影响,仓体顶层局部区域演化出极高流速(峰值达 35.89 m/s),而核心栽培区域的风速则维持在较低水平,呈现出相对平稳的流动特征。

方案 3 采用下送下回式,送、回风口分别构筑于东、西侧墙体底部。数值计算结果如图 12c 所示,多孔介质区域最高温与最低温分别为 12.8℃和 11.29℃,空间峰值温差为 1.51℃,较方案 0 仅缩减了 0.19℃。该模式下区域均温攀升至 12.33℃,温度变异系数(CV)为 2.1%。速度场云图如图 13c 所示,气流主要沿近地表及仓体顶板迁移,形成了显著的“高流速覆盖带”,而中部核心栽培区的空气流转速率相对迟滞。

由表 1 可知,方案 1、方案 2 和方案 3 的温度变异系数分别为 1.6%、1.3% 和 2.1%,均低于方案

0，说明回风位置调整后可提高生长区温度场的一致性。其中，方案 2 的温度变异系数最低，但其顶部局部区域出现较高流速；方案 1 的区域平均温度最低，且流场分布相对均衡；方案 3 虽对局部温差有一定改善，但整体降温效果较弱。

表 1　不同气流循环方案下食用菌生长区域温度场 CFD 模拟结果对比分析

Tab. 1　Comparative analysis of CFD simulation results of temperature field in edible mushroom growth area under different air circulation schemes

方案	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃	平均温度/℃	温度变异系数/%
方案 0	12.68	10.98	1.70	11.74	3.5
方案 1	11.93	10.69	1.24	11.50	1.6
方案 2	11.92	11.32	0.60	11.80	1.3
方案 3	12.80	11.29	1.51	12.33	2.1

综合图 13 可知，方案 2 与方案 3 的气流主要聚焦于仓体顶部和底部区域，中部生长区的气流组织改善相对有限。方案 1 通过调整仓内循环路径，延长了气流在仓内的流动距离，减弱了顶部热量滞留，并改善了多孔介质区域的换热条件。在该模式下，冷空气能够更充分地穿过栽培架区域，使区域平均温度降至 11.5℃，最大温差减小至 1.24℃。综合比较温度分布、流场特征和降温效果，方案 1 可确定为该模块化食用菌工厂的优选气流组织模式。

5　试验验证

为验证优化方案的工程有效性，于陕西省杨凌智能农业装备创新中心构建了生产性对比试验平台。试验组（优化工厂）与对照组（常规工厂）在几何尺度及围护结构热工参数上均保持一致，其核心结构性差异聚焦于回风系统的拓扑布局。试验以黄伞菌为栽培对象（每仓载荷 800 袋），于 2025 年 3 月子实体发育期进行。环境调控目标设定为温度 15 ~ 20℃、相对湿度 80% ~90%。鉴于制冷机组的周期性间歇运行特征，研究参照 1.4 节传感阵列布设方案，同步捕捉了机组开启与停机 2 种非稳态工况下的温度场与流场瞬时数据。

实测结果表明，在制冷机组运行工况下，优化食用菌工厂内部温度场的空间一致性显著增强，其温度波动区间为 16.0 ~ 16.8℃，温度变异系数（CV）为 1.64%，较常规工厂的 2.56%（温度区间为 16.0 ~ 17.6℃）降低 0.92 个百分点；同时，流场均匀性得到同步改善，其风速 CV 值由原始的 40.43% 降至 37.66%，降低 2.77 个百分点。在机组停机工况下，优化工厂凭借更佳的空气循环惯性，其温度分布依然保持较高稳定性，温度变异系数为 2.95%，较常规工厂的 5.80% 降低 2.85 个百分点。

经过为期 8 d 的栽培验证，对照组与试验组内的黄伞菌子实体均进入生理成熟阶段，生长表型实景详见图 14。实测统计显示：对照组（常规工厂）的子实体萌发总量为 756 个，其中符合采收标准的商品菇为 723 个，对应的出菇率与成熟率分别为 94.50% 和 95.63%；试验组（优化工厂）的萌发总量为 763 个，可采收数量为 751 个，出菇率达 95.38%，成熟率为 98.43%，较对照组分别提高 0.88、2.80 个百分点。对比分析表明，试验组在维持稳定丰产性能的同时，大幅优化了子实体的成熟整齐度。这充分证实了优化后的气流组织模式通过改善仓体微环境的空间一致性，促进了黄伞菌生理发育的同步性与采收周期的一致性。



图 14　黄伞菌出菇实景图

Fig. 14　Real picture of yellow umbrella mushroom

6　结论

（1）基于黄伞菌呼吸速率和菌包阵列阻力参数，构建了耦合生物热源与多孔介质的食用菌工厂 CFD 模型。模型验证结果表明，温度与风速的 RMSE 分别为 0.32℃ 和 0.08 m/s，能够较好反映仓内环境分布特征。

（2）通过对比分析下进上出、下进中出及下进下出 3 种气流循环模式，仿真与机理分析证实，异侧下进上出为最优气流模式，该模式能有效利用热浮力效应，消除顶部热积聚与局部涡流死区。相比原方案，优化后的温度变异系数（CV）由 3.5% 降至 1.6%，显著提升了微环境的一致性。

（3）通过实际栽培试验对比发现，采用优化气流循环模式的新建模块化食用菌工厂，其内部环境均匀性显著提升：在制冷开启状态下，温度均匀性（CV 为 1.64%）优于原有工厂（CV 为 2.56%），风速波动也显著降低（从 CV 为 40.43% 降至 CV 为 37.66%）；在制冷关闭状态下，温度均匀性（CV 为 2.95%）同样明显优于原有工厂（CV 为 5.80%）。此外，黄伞菌的栽培结果表明，优化后工厂的出菇率由 94.50% 提高至 95.38%，成熟率由 95.63% 提升至 98.43%。

(4)综合模拟与试验结果,将回风口优化为西墙顶部偏北位置所形成的下进上出气流组织,能够改善模块化食用菌工厂内部的温度与风速分布均匀性,为模块化食用菌工厂的通风系统设计提供了参考。

参 考 文 献

[1] 吴尘萱, 栗君谊, 韩亚芬, 等. 面向植物合成生物学的植物工厂生产关键技术与装备研究进展及应用展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 300 - 315.
Wu Chenxuan, Li Junyi, Han Yafen, et al. Research progress and application prospects of key production technologies and equipment in plant factories for plant synthetic biology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 300 - 315. (in Chinese)

[2] 汪锐, 杨豫森, 王琮, 等. 植物工厂产业发展现状[J]. 照明工程学报, 2023, 34(4): 64 - 68.
Wang Rui, Yang Yusen, Wang Cong, et al. Development status of plant factory industry[J]. Journal of Lighting Engineering, 2023, 34(4): 64 - 68. (in Chinese)

[3] He R, Ju J, Liu K, et al. Technology of plant factory for vegetable crop speed breeding[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1361510.

[4] Liu Y, Mousavi S, Pang Z, et al. Plant factory: a new playground of industrial communication and computing[J]. Sensors, 2022, 22(1): 147.

[5] 琚俊, 刘厚诚. 植物工厂功能性蔬菜品质调控技术研究与展望[J]. 长江蔬菜, 2023(20): 19 - 25.
Ju Jun, Liu Houcheng. Research and prospect of quality control technology for functional vegetables in plant factories[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2023(20): 19 - 25. (in Chinese)

[6] 刘焕, 方慧, 程瑞锋, 等. 基于 CFD 的人工光植物工厂气流场和温度场的模拟及优化[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 108 - 116.
Liu Huan, Fang Hui, Cheng Ruifeng, et al. Simulation and optimization of airflow and temperature fields in artificial light plant factory based on CFD[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(5): 108 - 116. (in Chinese)

[7] 林志远. 植物工厂气流循环设计及其关键参数优化[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
Lin Zhiyuan. Air circulation design and key parameter optimization of plant factory[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022. (in Chinese)

[8] Lee S W, Seo I H, Aa S W, et al. Improvement of environmental uniformity in a seedling plant factory with porous panels using computational fluid dynamics[J]. Horticulturae, 2023, 9(9): 1027.

[9] 孙先鹏, 付颖, 甘海玲, 等. 基于混合通风的日光温室热湿环境协同控制策略[J]. 农业机械学报, 2026, 57(5): 407 - 416.
Sun Xianpeng, Fu Ying, Gan Hailing, et al. Collaborative control strategy of heat and humidity environment in solar greenhouse based on mixed ventilation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 407 - 416. (in Chinese)

[10] Chen X, Hou T, Liu S, et al. Design of a micro-plant factory using a validated CFD model[J]. Agriculture, 2024, 14(12): 2227.

[11] Li Y, Sun F, Shi W, et al. Numerical simulation of ventilation performance in mushroom solar greenhouse design[J]. Energies, 2022, 15(16): 5899.

[12] 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.
Zhou Chaofan. CFD simulation of edible mushroom greenhouse environment and design of fuzzy control system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[13] Natarajan G, Zaid M, Konka H, et al. Modeling of air distribution inside a shipping container plant factory using computational fluid dynamics (CFD)[C]//3rd International Conference on Energy and Power, ICEP 2021, 2021.

[14] 袁湘月, 吴睿哲, 田哲印, 等. 基于 CFD 的农产品干燥箱送风系统结构与运行参数协同优化[J]. 农业机械学报, 2026, 57(9): 375 - 385.
Yuan Xiangyue, Wu Ruizhe, Tian Zheyin, et al. CFD-based collaborative optimization of air supply system structure and parameters for agricultural product drying chambers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(9): 375 - 385. (in Chinese)

[15] 王得权, 赵宇轩, 袁湘月, 等. 基于流场均匀性的大型复合材料固化炉设计仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2026, 52(7):2540 - 2553.
Wang Dequan, Zhao Yuxuan, Yuan Xiangyue, et al. Design and simulation of large composite material curing oven based on flow field uniformity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(7): 2540 - 2553. (in Chinese)

[16] 卢丰源. 基于 CFD 汽车电子元件湿热老化试验箱温湿度场仿真研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
Lu Fengyuan. Simulation research on temperature and humidity field of damp heat aging test chamber for automotive electronic components based on CFD[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023. (in Chinese)

[17] 常金强, 王培宇, 段宏伟, 等. 基于 CFD 的棉纤维长度检测装置吸风口结构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2025,

56(1)：234 – 244.
Chang Jinqiang, Wang Peiyu, Duan Hongwei, et al. Structure optimization and experiment of suction port of cotton fiber length detection device based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 234 – 244. (in Chinese)

[18] 张晨, 方慧, 程瑞锋, 等. 基于 CFD 的 LED 补光灯模型构建与验证[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(2): 105 – 112.
Zhang Chen, Fang Hui, Cheng Ruifeng, et al. Construction and validation of LED light supplement model based on CFD[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(2): 105 – 112. (in Chinese)

[19] Zhou S, Liu H, Fan R, et al. Temperature field simulation using CFD in the plant factory[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.

[20] 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.
Wang Chuanqing, Ni Xiunan, Wei Min, et al. 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)

[21] 张宝峰, 王家胜, 易维明, 等. 基于 CFD 的小型搅拌回燃式生物质炭化炉设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 389 – 398.
Zhang Baofeng, Wang Jiasheng, Yi Weiming, et al. Design and experiment of small stirring back-burning biomass carbonization furnace based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 389 – 398. (in Chinese)

[22] Larochelle Martin G, Monfet D. High-density controlled environment agriculture (CEA – HD) air distribution optimization using computational fluid dynamics (CFD)[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2024, 18(1): 2297027.

[23] 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.
Wan Min, Yang Wei, Liu Zhuqing, et al. Microenvironment simulation and crop transpiration of solar greenhouse with different ventilation modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 328 – 338, 349. (in Chinese)

[24] 承银辉. 食用菌菇房环境 CFD 分析及通风结构优化研究[D]. 镇江：江苏大学, 2020.
Cheng Yinhui. CFD analysis and ventilation structure optimization of edible mushroom house environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[25] Meilleur M A, Bastien D, Monfet D. Modeling mushrooms' carbon dioxide emission and heat exchange rates for synergistic cultivation with leafy greens[J]. Sustainability, 2023, 15(24): 16740.

[26] Heaton L L M, Jones N S, Fricker M D. Energetic constraints on fungal growth[J]. The American Naturalist, 2016, 187(2): E27 – E40.