doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.038

# 北方蛋鸡舍冬季颗粒物数值模拟与优化设计

袁月明　张　硕　贾乐心　李锦生　刘碧莹　周丽娜
(吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118)

**摘要**: 为了探明畜禽舍内颗粒物分布规律,本文对吉林省某蛋鸡舍内不同粒径颗粒物($PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$和总悬浮颗粒(TSP))浓度进行监测并分析不同粒径颗粒物的分布特点,利用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术,对采用负压通风的密闭蛋鸡舍的温度场、湿度场、气流场和颗粒物浓度场进行三维稳态模拟,并通过试验进行验证,对不合理之处进行优化模拟设计。研究结果表明,温度与 $PM_1$、$PM_{2.5}$浓度呈正相关性($P<0.01$);湿度与颗粒物浓度呈负相关性;TSP 浓度主要受鸡群活动影响。模拟温度相对于实测值整体偏大,相对误差为 1.23% ~8.88%;而相对湿度模拟值相对于实测值整体偏小,相对误差为 5.11% ~14.00%。颗粒物浓度模拟值相对于实测值整体偏小,验证了模型的准确性。通过优化导流板与壁面的角度,将角度增加至 67.5°,优化后舍内气流均匀性明显增强,气流分布更加合理,并且舍内 $PM_1$浓度下降 17.4%、$PM_{2.5}$浓度下降 15.9%、$PM_{10}$浓度下降 18.1%、TSP 浓度下降 21.6%,更有利于鸡体的生长发育和更好地改善鸡舍舍内空气环境质量。

**关键词**: 蛋鸡舍; 流体力学; 负压通风; 颗粒物; 优化设计
**中图分类号**: X513　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0368-10　　**OSID**:

# Numerical Simulation and Optimization Design of Winter Particulate Matter in Northern Layer House

YUAN Yueming　ZHANG Shuo　JIA Lexin　LI Jinsheng　LIU Biying　ZHOU Li'na
(*College of Engineering and Technology*, *Jilin Agricultural University*, *Changchun* 130118, *China*)

**Abstract**: It is important to find out the distribution pattern of particulate matter in livestock houses to reduce dust particle pollution and improve air quality in livestock houses. The concentrations of different particle sizes ($PM_1$, $PM_{2.5}$, $PM_{10}$ and TSP) in a layer house in Jilin Province were monitored and the distribution characteristics of different particle sizes were analyzed. The temperature, humidity, airflow and particulate matter concentration fields of a closed layer house with negative pressure ventilation were simulated by using computational fluid dynamics (CFD) technology and the design was verified through experiments, and the unreasonable areas were optimized for simulation. The results showed that temperature was positively correlated with $PM_1$ and $PM_{2.5}$ ($P<0.01$); humidity was negatively correlated with particulate matter; TSP concentration was mainly affected by chicken activity. The simulated temperature values were generally large relative to the measured values, with a relative error range of 1.23% to 8.88%; while the simulated relative humidity values were generally small relative to the measured values, with a relative error range of 5.11% to 14.00%. The simulated values of particulate matter concentration were small compared with the measured values, which verified the accuracy of the model. By optimizing the angle between the deflector and the wall, the angle was increased to 67.5°. After optimization, the airflow uniformity in the house was obviously enhanced, and the airflow distribution was more reasonable, and the concentration of $PM_1$ in the house was decreased by 17.4%, and that of $PM_{2.5}$ was decreased by 15.9%, $PM_{10}$ was decreased by 18.1% and TSP was decreased by 21.6%, which was more conducive to the growth and development of chickens and better air quality improvement of the layer house. The research result revealed the distribution patterns of temperature, humidity, airflow and particle concentration fields in northern layer houses in winter, which can provide a reference basis for environment optimization in layer houses.

**Key words**: layer house; fluid dynamics; negative pressure ventilation; particulate matter; optimized design

收稿日期: 2021-08-12　修回日期: 2021-09-10
**基金项目**: 广东省重点领域研发计划项目(2019B020215002-5)
**作者简介**: 袁月明(1963—),女,教授,博士,主要从事设施农业过程控制与环境工程研究,E-mail: yym_jlu@163.com
**通信作者**: 周丽娜(1981—),女,讲师,博士,主要从事设施农业过程控制与环境工程研究,E-mail: zhoulina976430@163.com

## 0　引言

畜禽生产养殖过程中会产生大量的颗粒物，舍内的微生物凭借胶体分散系的相对稳定性，以颗粒物为介质进行传播，严重影响家畜和现场工作人员的健康[1-2]。当鸡舍内的总悬浮颗粒物浓度达到国家标准限量值的 30 倍时，则会直接导致雏鸡因颗粒物性气管阻塞而致死[3]。长期暴露于 $PM_{2.5}$ 浓度较高鸡舍的生产管理一线人员，易患呼吸道疾病、哮喘以及慢性阻塞性肺病[4]。

目前国内针对畜禽内颗粒物研究主要集中在试验监测和评价上，CFD 在畜禽舍中的应用主要集中在通风和温度场研究中[5-8]。当前国内 CFD 技术在颗粒物方面的研究也逐渐展开。潘乔娜[9]对夏季保育猪舍的颗粒物浓度进行 CFD 模拟仿真，模拟结果可在猪舍管理布局和颗粒物控制减排措施等方面提供建议。汪开英等[10]对冬季保育猪舍的颗粒物浓度场进行三维稳态模拟，对舍内环境质量状况进行评估并为改善舍内环境提供有益参考。TAKAI 等[11]通过对猪舍与鸡舍内颗粒物浓度进行实测对比发现，鸡舍内各粒径颗粒物浓度均大于猪舍颗粒物浓度。目前国内利用 CFD 技术对鸡舍内颗粒物浓度及分布规律研究较少，开展利用 CFD 技术研究鸡舍内颗粒物浓度的分布规律对鸡舍的环境质量改善具有重要意义。

本文针对吉林省某密闭式笼养蛋鸡舍，通过监测舍内空间位置的温度、相对湿度、风速及颗粒物质量浓度变化，利用 CFD 技术进行三维建模，对鸡舍内的颗粒物质量浓度进行数值模拟分析，探究颗粒物的分布规律，通过调整侧墙通风口导流板角度降低颗粒物质量浓度及扩散，以期为密闭式笼养蛋鸡舍内的颗粒物控制提供理论参考。

## 1　试验材料与方法

### 1.1　试验鸡舍基本情况

试验鸡舍为吉林省某蛋鸡养殖基地，如图 1 所示。鸡舍为东西走向的钢混结构鸡舍，舍长 55 m，跨度 16 m，檐高 4.2 m，脊高 6 m。采用负压纵向通风，西墙设有 5 台 BNM－1460 型风机（潍坊搏诺温控设备有限公司），南北墙上设有 0.5 m×0.3 m 的通风口。试验鸡群为 17 周龄的“海兰褐”蛋鸡，采用四列五走道每列 4 层的阶梯式层养，养鸡规模为 12 080 只。饲喂时间为每日 07:00、11:00 和 16:00。传送带自动清粪，鸡只产生的粪便直接由传送带传至室外，并由清粪车运送至储粪池。

试验于 2020 年 12 月 11—15 日进行。每天监测时间为 06:00—20:00，每 2 h 监测 1 次鸡舍内的温度、相对湿度（RH）、风速，每隔 10 min 采集一次 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、TSP 质量浓度。试验期间只开启 1 号风机。

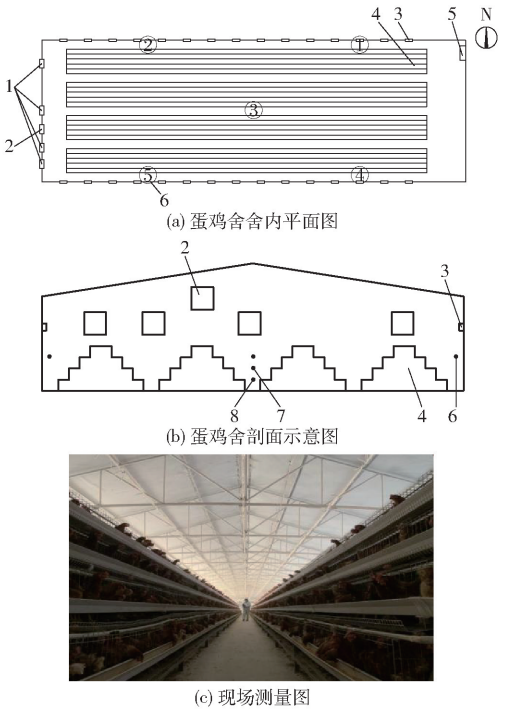



图 1　蛋鸡舍舍内布局与测量点分布图

Fig. 1　Layouts of layer house and measurement locations

1. 未开启的风机　2. 开启的 1 号风机　3. 通风口　4. 层叠式鸡笼　5. 内门　6. 垂直高度为 1.5 m 的测量点　7. 垂直高度为 1 m 的测量点　8. 垂直高度为 0.5 m 的测量点

### 1.2　现场测量

测量点分布在舍内 7 个位置，如图 1a、1b 所示，其中 4 个测量点分别位于鸡舍南、北过道的前侧和后侧，高度为 1.5 m。鸡舍中间过道的 0.5、1、1.5 m 的垂直高度上布置 3 个测量点，温湿度仪位置选取与颗粒物监测仪相同的位置，以便于实时监测颗粒物测量点的温湿度。

本试验采用高精度温湿度记录仪（SSN－22 型，深圳宇问加壹传感系统有限公司）对测点温湿度数据进行连续采集。选用优利德（UNI－T）UT363 迷你型数字风速计（量程：0～30 m/s；分辨率：0.1 m/s）对测点风速进行测量。利用 Dust Truck DRX Desktop（8533 型，美国 TSI 公司）对颗粒物浓度进行监测，颗粒物质量浓度精度：±0.001 mg/m$^3$，该仪器具有同时检测 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$ 和 TSP 质量浓度的特点[12]。

## 2　数值模拟分析

### 2.1　几何模型

#### 2.1.1　鸡舍模型

密闭式半阶梯笼养蛋鸡舍利用三维软件

Gambit 进行1∶1比例建模,为了提高 Fluent 的运行效率,对模型进行了合理简化,如图 2 所示。将舍内 4 条养殖线简化成 4 条形状规则的长方体。将每个鸡笼中所有的鸡简化为与鸡笼同长的长方体,省略喂料和清粪设备。整个鸡舍的气体均设为空气,并设置舍内空气为不可压缩的理想气体[13]。

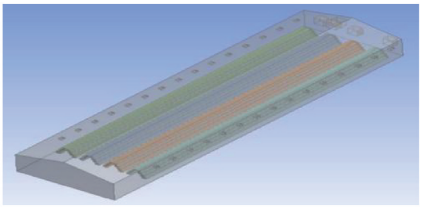
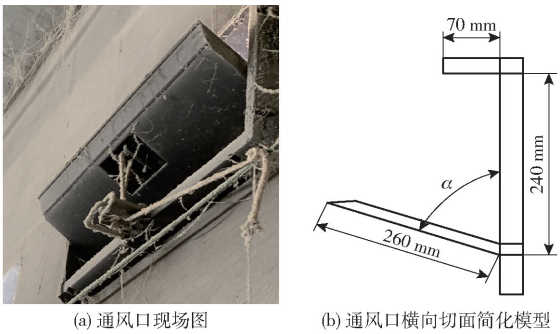


图 2 蛋鸡舍三维模型

Fig. 2 3D model of layer house

### 2.1.2 通风口模型

侧墙的通风口设置为矩形,通风口在鸡舍两侧呈对称状态,其中每侧分别安装 15 个矩形通风窗和导流板,模拟时只考虑有效的进风面积。通风口现场图和通风口横向切面简化模型如图 3 所示。其中 $\alpha$ 为导流板与壁面的夹角,$\alpha$ 的取值范围为 0°~90°,试验期间导流板与壁面的夹角为 45°。




(a) 通风口现场图 (b) 通风口横向切面简化模型

图 3 通风口模型

Fig. 3 Ventilator model

### 2.1.3 网格划分

如图 4 所示,采用非结构化四面体网格,用网格收敛性指标(GCI)量化网格收敛的不确定性[14]。经过网格无关性检测,确定最大网格尺寸为 126 mm,网格划分过程中,对鸡舍的通风口、风机区域进行单独划分,局部网格最大尺寸为 23 mm。所划分的网格单位数 13 966 489,节点数为 2 867 662,整体的网格数量 3 294 716。

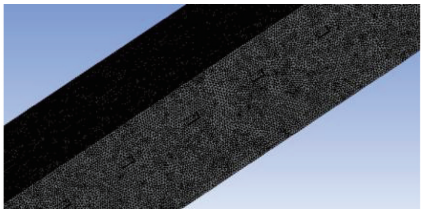


图 4 网格模型

Fig. 4 Grid model

## 2.2 边界条件

为简化模型,提高仿真效率,对模型进行如下假设[15-16]:①舍内气体为牛顿流体。②舍内气体在流动过程中不可压缩且符合 Boussinesq 假设。③水蒸气在固体壁面不凝结。④舍内气密性良好。

蛋鸡舍内颗粒物主要来源包括皮屑、饲料、粪便及废弃物[17],其中大部分来自于鸡体自身以及鸡只周围区域。此次模拟将鸡和鸡笼简化长方体的位置作为颗粒物释放源区域,设置为无滑移壁面,颗粒物初始质量浓度设置为 $PM_1$:0.5 mg/m$^3$、$PM_{2.5}$:0.7 mg/m$^3$、$PM_{10}$:4.2 mg/m$^3$、TSP:5.8 mg/m$^3$。其他边界条件具体设置见表 1。

**表 1 边界条件设置**

**Tab. 1 Boundary condition setting**

| 边界 | 边界类型 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|---|
| 侧窗 | 压力入口 | 温度/℃ | -10(北侧)<br>-7(南侧) |
| | | 压力/kPa | 0(静压)<br>101.325(总压) |
| 风机 | 速度出口 | 温度/℃ | -8 |
| | | 速度/(m·s$^{-1}$) | 3.48 |
| 维护结构 | 无滑移边界 | 温度/℃ | 23(顶部)<br>16(地面)<br>23(东墙)<br>22(西墙)<br>26(南墙)<br>20(北墙) |
| 蛋鸡 | 无滑移边界 | 温度/℃ | 42 |

## 2.3 基本守恒方程

质量守恒方程为

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

其中 $$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$$

式中 $\rho_f$——流体密度,kg/m$^3$

$\nabla$——向量算子 $\rho$——密度,kg/m$^3$

$t$——时间,s $\boldsymbol{v}$——速度,m/s

$S_m$——质量源项,kg/(m$^3$·s)

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \boldsymbol{v}) + \nabla(\rho_f \boldsymbol{v}\boldsymbol{v}) = -\nabla p + \rho_f \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}S_m \tag{2}$$

式中 $p$——压力,Pa $\boldsymbol{F}$——外力,N/m$^3$

$\boldsymbol{g}$——重力加速度,m/s$^2$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f E_f) + \nabla(\boldsymbol{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \boldsymbol{j}_i + S_i^h \tag{3}$$

式中　$E_f$——流体总能量，J

$k_{eff}$——导热系数，W/(m·K)

$T$——温度，℃　　$h_i$——比焓，J/kg

$\boldsymbol{j}_i$——扩散通量，kg/(m²·s)

$S_i^h$——总熵，W/m³

为研究舍内湿度场的分布规律，引入基于组分质量分数的输运方程[14]。其方程为

$$\frac{\partial(\rho_f Y_i)}{\partial t}+\nabla(\rho_f \boldsymbol{v} Y_i)=-\nabla \boldsymbol{J}_i+\rho_f \boldsymbol{g}+S_i \quad (4)$$

式中　$Y_i$——组分 $i$ 的质量分数，本文为水蒸气的质量分数

$S_i$——水蒸气质量源项，kg/(m³·s)

### 2.4　湍流模型选择

SEO 等[18-19]和 LEE 等[20]发现重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型能有效表达畜禽舍内流场分布。本文采用 Fluent 软件进行数值求解，选择精度较高的重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型开展了数值模拟，近壁区的模拟采用标准壁面函数，控制方程采用基于有限体积的离散方法，压力-速度耦合选用 SIMPLEC 算法，动量和湍流动能选用二阶迎风离散格式，对颗粒物设置离散相模型(Discrete phase model，DPM)。

## 3　结果与分析

### 3.1　鸡舍实测数据结果

#### 3.1.1　温度、相对湿度和风速变化

试验期间舍内各监测点不同时间温度变化规律如图 5 所示。3 号点温度比较稳定且较高，因为 3 号点周围的鸡只温度较高，且保温性较好，受气流、光照影响小。位于南侧 4、5 号点均起伏较大，主要与风机和自身位置有关。由于 1、2 号点位于鸡舍的北侧，几乎不受光照影响，且 1 号点位于门的一侧，所以温度一直偏低，且波动较小。温度变化范围为 19.08～24.98℃，平均温度为 22.1℃。

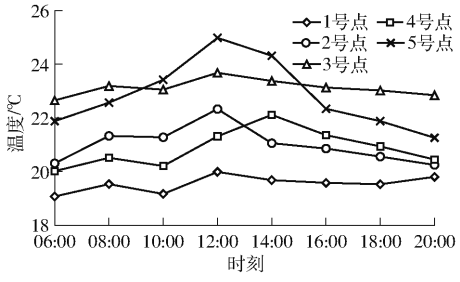



图 5　舍内各监测点不同时间温度变化规律

Fig. 5　Temperature variation patterns at various monitoring points in layer house at different times

由图 6 可知，试验期间舍内相对湿度变化范围为 52%～77%，平均相对湿度为 67%，说明舍内的相对湿度适宜蛋鸡生长。从数值上看，3 号点相对湿度最低，1 号点相对湿度最高，舍内远风机端(1 号点、4 号点)的相对湿度高于近风机端(2 号点、5 号点)。12:00 时刻相对其他时间相对湿度降低，其中 5 号点变化最为明显，这是由于 12:00 时刻舍内温度升高，风机开启较为频繁且 5 号点距离风机最近，因此该点相对湿度最低。

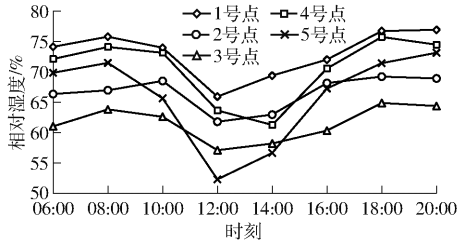



图 6　舍内各监测点不同时间相对湿度变化规律

Fig. 6　Relative humidity variation patterns at various monitoring points in layer house at different times

因试验时间为冬季，鸡舍为密闭式鸡舍，舍内整体风速较小。风机附近区域 5 号测点风速为 2.2 m/s，其他 4 个测点风速均小于 0.5 m/s，且无体感风速。

#### 3.1.2　颗粒物质量浓度

为了了解蛋鸡舍内颗粒物浓度日变化的趋势，选取 12 月 13 日舍内颗粒物质量浓度数据进行分析，如图 7 所示。试验鸡舍在 07:00、11:00、16:00 进行喂料，$PM_{10}$ 和 TSP 浓度在这些时间段均有所升高，这主要因为喂料时鸡群易出现躁动、抢食等行为，导致 PM 浓度升高；在其他时间段，鸡群处于安静状态，各粒径 PM 浓度明显下降。$PM_{10}$ 与 TSP 波动较大，这是因为大粒径颗粒受重力沉降作用，落到地面或鸡群体表，无法长时间悬浮在空气中[21]。鸡群频繁的活动会将已经沉降下来的粗颗粒重新扬到空气中，造成 $PM_{10}$ 和 TSP 浓度升高。对于细颗粒($d<2.5$ μm)而言，鸡群活动性增强，造成空气流动紊乱，并不会对其浓度造成太大的影响。因为粒径太小，而无法迅速在空气中沉降下来，可以长时间在空气中悬浮。所以 $PM_1$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度变化并不明显。这与 LIN 等[22]得出的蛋鸡舍内颗粒物浓度与蛋鸡的活动性有关的结论相一致。由表 2 可知，蛋鸡舍

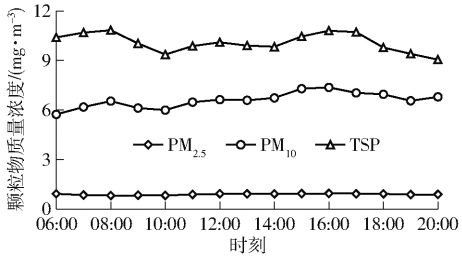



图 7　舍内不同粒径颗粒物质量浓度日变化曲线

Fig. 7　Daily variations of mass concentration of particulate matter in layer house

内颗粒物浓度与热湿环境参数相关,温度与 $PM_1$、$PM_{2.5}$浓度呈正相关性,湿度与颗粒物浓度呈负相关性,对 $PM_{2.5}$、$PM_{10}$浓度影响更大。

**表 2 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$和 TSP 浓度与温度和相对湿度 Pearson 系数**

**Tab. 2 Pearson's correlation coefficient for $PM_1$, $PM_{2.5}$, $PM_{10}$ and TSP concentrations versus temperature and relative humidity**

| | $PM_1$ | $PM_{2.5}$ | $PM_{10}$ | TSP |
|---|---|---|---|---|
| 温度 | 0.623 ** | 0.628 ** | 0.374 | 0.41 |
| 相对湿度 | -0.529 * | -0.660 ** | -0.550 ** | -0.520 * |

注:** 表示在 0.01 水平上显著相关,* 表示在 0.05 水平上显著相关。

试验期间舍内颗粒物 $PM_1/PM_{2.5}$、$PM_1/PM_{10}$、$PM_{2.5}/PM_{10}$、$PM_{2.5}$/TSP、$PM_{10}$/TSP 的质量浓度比值如图 8 所示。垂直方向上,高度越高,细颗粒物浓度越小,$PM_1/PM_{10}$、$PM_{2.5}/PM_{10}$在鸡舍上部显著低于下部($P<0.05$),说明试验鸡舍的下部细颗粒物含量较高,$PM_{10}$/TSP 在鸡舍上部显著高于下部($P<0.05$),说明垂直高度越高,$PM_{10}$浓度越大,而且 $PM_{10}$/TSP 比值较大,说明试验鸡舍 $PM_{10}$质量浓度相比其他粒径浓度较高。本试验 $PM_{2.5}/PM_{10}$比值为 0.28 ~ 0.366,MODINI 等[23]监测所得的 $PM_{2.5}/PM_{10}$比值为 0.23,说明试验鸡舍中下部的细颗粒物含量较大,研究表明,粒径越小的颗粒物对人和动物的危害越大[24],试验鸡舍 $PM_{10}$质量浓度为 5.736 ~ 7.37 mg/m³,TSP 质量浓度为 9.049 ~ 10.8 mg/m³,均高于国家标准要求的 $PM_{10}$质量浓度日均值 4 mg/m³ 和 TSP 质量浓度日均值 8 mg/m³ 的标准值[25],由于此时蛋鸡处于产蛋不稳定期,且鸡群较为活跃,导致鸡舍内各粒径颗粒物浓度均较高。

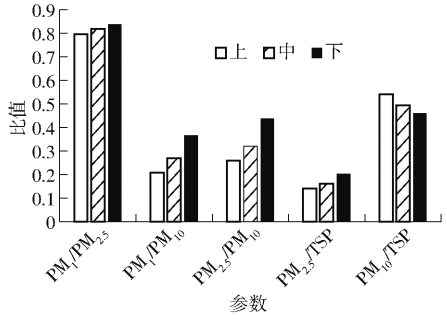



图 8 颗粒物质量浓度比值在鸡舍不同高度的对比

Fig. 8 Comparison of particulate matter concentrations ratio at different heights in layer house

## 3.2 模拟与实测数据对比

为分析评估 CFD 模拟的精确度,使用归一化均方误差(Normalized mean squared error, NMSE)指标[26]进行验证。当 NMSE 小于 0.25 可认为 CFD 的模拟精确度是合理的[27]。

图 9 为模拟值与实测值的对比结果。对比分析发现,温度、相对湿度的模拟与实测相对误差为 1.23% ~ 8.88% 和 5.11% ~ 14.00%,结果表明,温度模拟值相对于实测值整体偏大,而相对湿度模拟值相对于实测值整体偏小,可能是因为模拟过程中未考虑与室外相通的清粪口,从而造成温度的模拟结果偏大。同时由于温度模拟值比实测值偏高,导致相同质量的水蒸气在表示为相对湿度时会偏小,由于未考虑粪便中的水分蒸发也导致相对湿度模拟结果偏小。计算结果的相对误差在合理的范围内,模拟结果较可靠,可准确揭示鸡舍内的温湿度场分布情况。

$PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$和 TSP 浓度的模拟值与实测值相对误差范围为 2.80% ~ 35.30%、7.20% ~ 23.30%、3.20% ~ 30.20% 和 6.25% ~ 47.32%,其中 TSP 浓度的误差最大,这是由于模拟过程只考虑了饲料产生的颗粒物,忽略了粪便、羽毛等产生的颗粒物,从而导致误差较大。然而模拟与实测数据对比的 NMSE 均小于 0.25,因此认为模拟值与实测值无显著差异,模拟结果在可接受的范围,说明该 CFD 蛋鸡舍颗粒物模拟模型合理可用。其他相对误差和 NMSE 见表 3。

## 3.3 模拟结果评估

### 3.3.1 温度场

图 10 为截取的蛋鸡舍截面图分别为 $X=12$、28、45 m 和 $Y=0.5$、7.5、14.5 m 以及 $Z=1.5$ m 的 7 个平面内的温度分布图。各截面在垂直位置上随着高度的增加,温度逐渐升高,且以过道中线为对称轴,各纵截面的温度分布呈明显的对称性,说明舍内温度在过道两侧的分布较为一致,验证了该舍采用的负压通风系统中将进风口对称布置的科学性。整体温度变化范围为 19.1 ~ 41.8℃,过道区域温度变化范围为 19.1 ~ 32.3℃,平均温度为 26.2℃。

### 3.3.2 相对湿度场

图 11 为截取的蛋鸡舍截面图分别为 $X=12$、28、45 m 和 $Y=0.5$、7.5、14.5 m 以及 $Z=1.5$ m 的 7 个平面内的相对湿度分布图。平均相对湿度为 58%,变化范围为 43% ~ 72%,各截面在垂直位置上随着高度的增加,相对湿度逐渐降低,与温度变化规律相反,这是由于水汽的沉积所导致的。在同一高度上,北侧相对湿度均高于南侧。越靠近中间过道,相对湿度有逐渐升高的趋势。

### 3.3.3 空气速度场

图 12 为截取的蛋鸡舍截面图分别为 $X=12$、28、45 m 和 $Y=0.5$、7.5、14.5 m 以及 $Z=1.5$ m 的

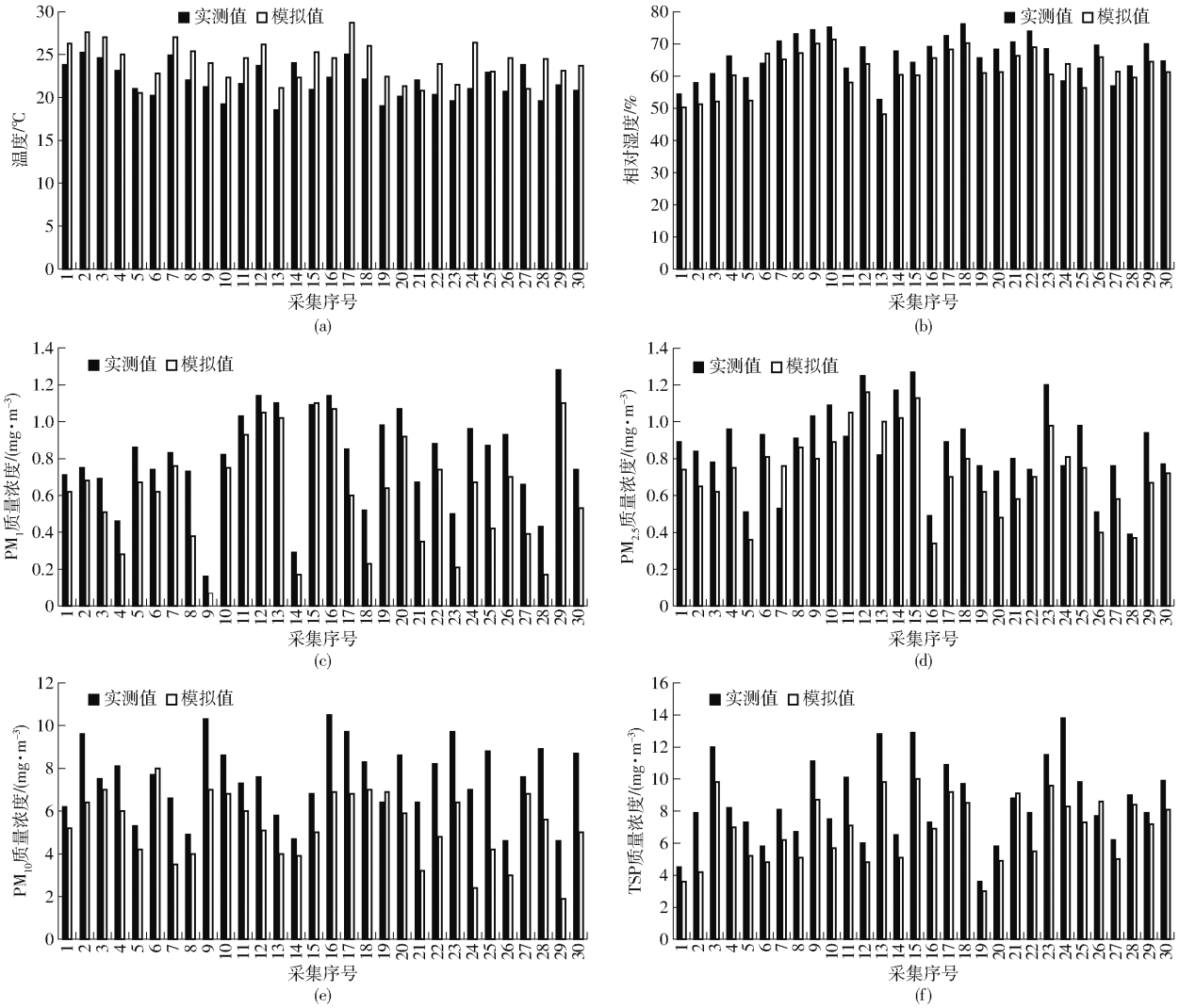



图 9　温度、相对湿度和颗粒物质量浓度模拟值与实测值对比

Fig. 9　Comparisons of temperature, relative humidity and simulated particle concentration results

**表 3　温度、相对湿度和颗粒物质量浓度相对误差和 NMSE**

**Tab. 3　Relative error and normalized mean squared error value of temperature, relative humidity and particle concentration**

| | 温度 | 相对湿度 | $PM_1$ 质量浓度 | $PM_{2.5}$ 质量浓度 | $PM_{10}$ 质量浓度 | TSP 质量浓度 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 相对误差/% | 1. 23 ~ 8. 88 | 5. 11 ~ 14. 00 | 2. 80 ~ 35. 30 | 7. 20 ~ 23. 30 | 3. 20 ~ 30. 20 | 6. 25 ~ 47. 32 |
| NMSE | 0. 018 | 0. 037 | 0. 030 | 0. 028 | 0. 05 | 0. 083 |

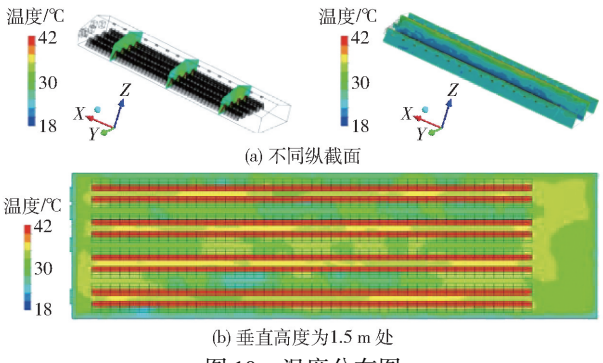



图 10　温度分布图

Fig. 10　Temperature distribution contours

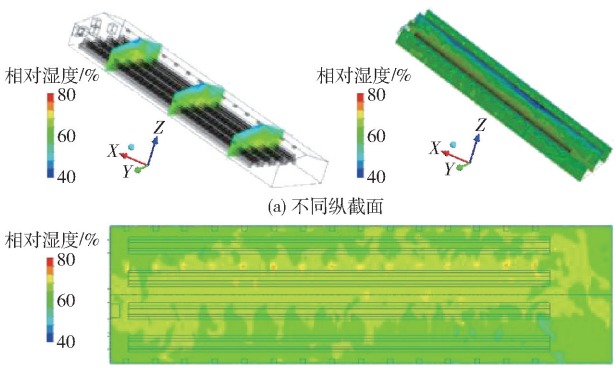
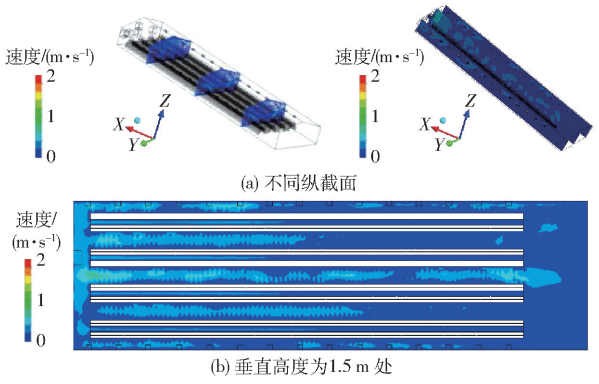



图 11　相对湿度分布图

Fig. 11　Relative humidity distribution contours

7 个平面内的速度分布图。从模拟结果来看，蛋鸡舍内风速场的风速为 0 ~ 2. 7 m/s，整个鸡舍大部分位置气流速度都在 0. 5 m/s 以下。在垂直高度




(a) 不同纵截面

(b) 垂直高度为1.5 m 处

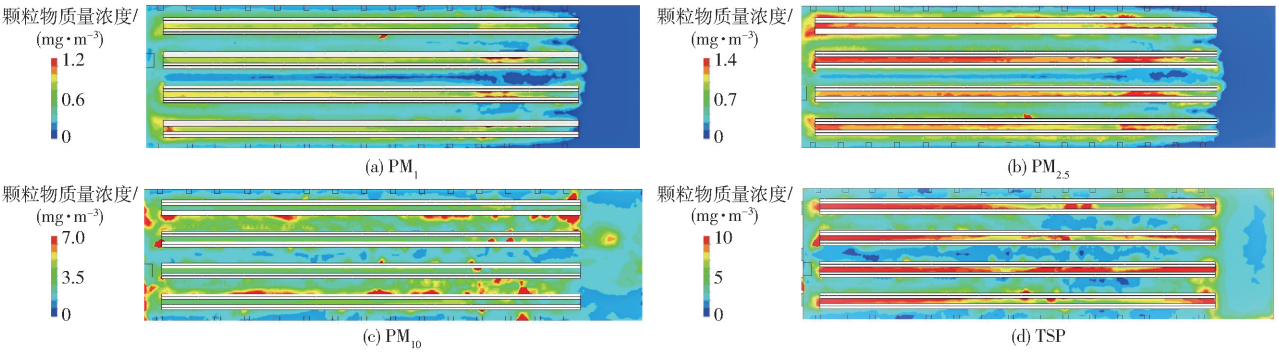
图 12 空气速度分布图

Fig. 12 Velocity distribution contours

1.5 m 处可以发现,南侧、北侧分布基本相同,最大速度也只有 0.6 m/s。但沿 $X$ 轴远离风机端的气流速度过小,说明当前鸡舍通风方式不合理,仅开启的风机不能使该鸡舍远离风机位置满足鸡体的正常生长发育条件以及无法对整栋鸡舍进行通风换气[28],需要考虑适当增大舍内气流流动速度,以利于鸡舍内空气交换。

### 3.3.4 颗粒物

图 13 为截取的蛋鸡舍垂直高度为 $Z=1.5$ m 的截面 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、TSP 颗粒物质量浓度分布图。从模拟结果来看,$PM_1$ 质量浓度变化范围为 0 ~ 1.2 mg/m$^3$,$PM_{2.5}$ 质量浓度变化范围为 0 ~ 1.4 mg/m$^3$,$PM_{10}$ 质量浓度变化范围为 0 ~ 7.0 mg/m$^3$,TSP 质量浓度变化范围为0 ~ 10.0 mg/m$^3$,模拟所得颗粒物浓度值与试验测量的数据值基本一致。由于北方冬季对保暖的要求,蛋鸡舍内大部分区域风速较小,因此颗粒物浓度区分不大,且分布较均匀。颗粒物主要受风速带动气流流动的影响,由于采用负压通风的原理,空气由压力入口向风机出口流动,颗粒物由前向后不断地聚集,且气流受到鸡笼和西墙的阻挡,造成靠近风机一侧颗粒物浓度较高。由于舍内气流速度较小且分布不均匀,导致颗粒物运动不规律,从鸡体及鸡笼位置产生的颗粒物无法扩散出去,易在部分位置形成积累,导致过道区域个别位置浓度极高。在远离风机位置的 $PM_{10}$ 与 TSP 浓度较高,这是因为鸡舍越长,颗粒物沿 $X$ 方向越易形成连续的风旋闭环,使得舍内空气质量更差[29]。




(a) $PM_1$ (b) $PM_{2.5}$

(c) $PM_{10}$ (d) TSP

图 13 颗粒物质量浓度分布

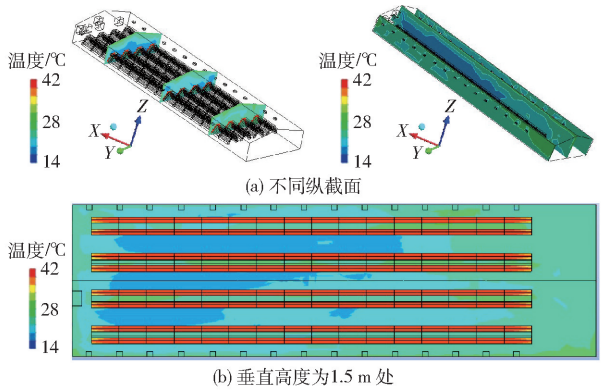
Fig. 13 Particulate matter concentration distribution contours

### 3.4 鸡舍通风口优化分析

为解决鸡舍舍内存在气流分布不均匀的问题,需兼顾对鸡舍进行通风的同时还需避免鸡群受冷应激的矛盾,使得鸡舍环境满足鸡体正常的生长发育条件。李文良等[30]利用 CFD 技术对密闭式平养鸡舍纵向通风进行研究,发现导流板与壁面的倾角明显影响了舍内气流分布的均匀性。江晓明等[13]研究发现,在白天温度较高(25℃ 左右)的情况下,导流板开启角 $\alpha=67.5°$时较为合理。本文在白天舍内温度超过 20℃ 的情况下,将原有的导流板与壁面的角度 $\alpha$ 从 45°增加至 67.5°,并利用 CFD 技术对舍内的温度、风速以及 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、TSP 的浓度进行对比分析。

### 3.4.1 温度优化分析

图 14 为截取的优化后蛋鸡舍截面图分别为 $X=12$、28、45 m 和 $Y=0.5$、7.5、14.5 m 以及 $Z=1.5$ m的 7 个平面内的温度分布图。从模拟结果来看,温度变化范围为 17.8 ~ 40.2℃,过道区域温度变化范围为 17.8 ~ 28.4℃,平均温度为 23.5℃。和试验鸡舍的原有温度模拟值相比有所下降但下降幅




(a) 不同纵截面

(b) 垂直高度为1.5 m 处

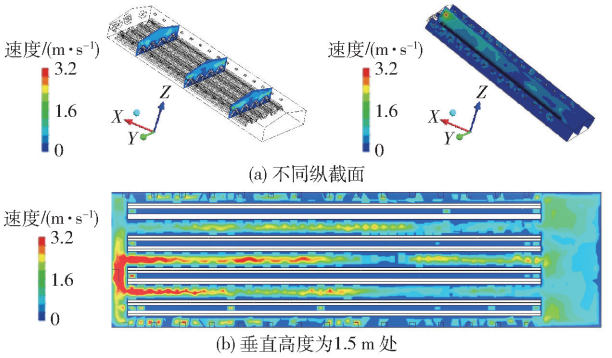
图 14 优化后温度分布图

Fig. 14 Optimized temperature distribution contours

度小，这是因为空气从鸡舍侧墙上方的通风口进入鸡舍，进入鸡舍的气流会沿顶棚到达鸡舍的高处，在下降的过程中会被逐渐加热，当到达鸡群所处高度时温差逐渐变小。海兰褐蛋鸡饲养手册指出，产蛋期舍内的最适温度为 21℃，研究发现，蛋鸡舍温度的舒适区间为 18 ~ 25℃，模拟结果整体满足温度要求。

### 3.4.2　风速优化分析

图 15 为截取的优化后蛋鸡舍截面图分别为 $X$ = 12、28、45 m 和 $Y$ = 0.5、7.5、14.5 m 以及 $Z$ = 1.5 m的 7 个平面内的气流分布图。从模拟结果来看，气流速度变化范围为 0 ~ 3.2 m/s，过道区域气流速度变化范围为 0 ~ 2.8 m/s，和试验鸡舍的原有气流模拟值相比分布更加均匀，这是因为当 $\alpha$ = 45° 时，对称气流进入舍内后在天花板最高处汇流，使舍内中间气流速度相对较高，远离风机的一端空气几乎不流动，均匀性差[31]。由于导流板角度的变化，加大气流在过道区域流速，鸡只区域的风速仍然保持在 0 ~ 1.2 m/s，有利于鸡群的生长条件，远离风机端的气流分布也更加合理。




(a) 不同纵截面

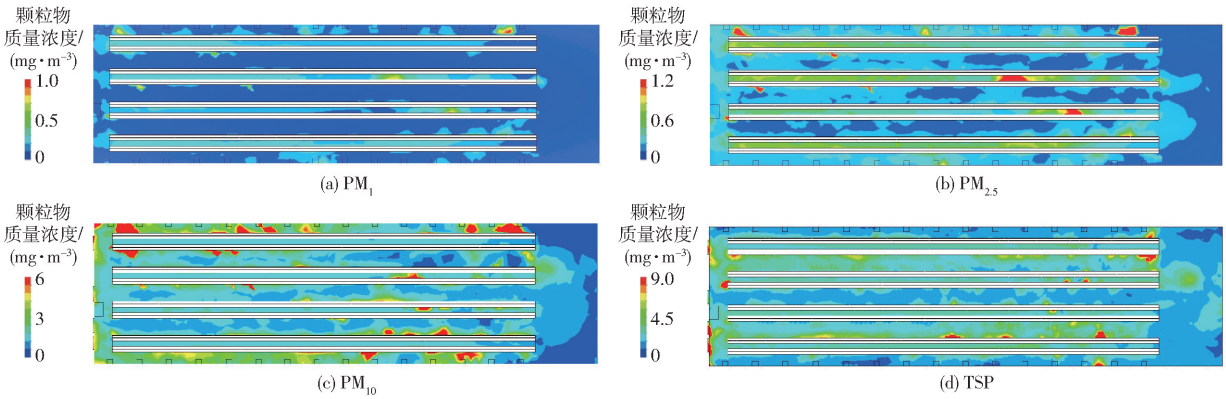
(b) 垂直高度为1.5 m 处

图 15　优化后气流速度分布图

Fig. 15　Optimized velocity distribution contours

### 3.4.3　颗粒物优化分析

图 16 为截取的优化后蛋鸡舍垂直高度为 $Z$ = 1.5 m 截面 $PM_1$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、TSP 颗粒物质量浓度分布图。从模拟结果来看，$PM_1$ 质量浓度变化范围为 0 ~ 0.9 mg/m³，$PM_{2.5}$ 质量浓度变化范围为 0 ~ 1.1 mg/m³，$PM_{10}$ 浓度变化范围为 0 ~ 5.6 mg/m³，TSP 质量浓度变化范围为 0 ~ 8.7 mg/m³。与原模拟值相比，$PM_1$ 质量浓度下降 17.4%、$PM_{2.5}$ 质量浓度下降 15.9%、$PM_{10}$ 质量浓度下降 18.1%、TSP 质量浓度下降 21.6%。通过改变通风口导流板的角度，增大气流流动速度和增强气流均匀性，很大程度改善了过道区域个别位置浓度极高的问题，使鸡体及鸡笼位置产生的颗粒物得到很好的扩散。增大舍内气流流速，加快带动颗粒物向风机方向流动，更多的颗粒物通过风机排到舍外，舍内的颗粒物含量明显降低，有利于鸡体的生长发育和更好地改善鸡舍舍内空气环境质量。




(a) $PM_1$　(b) $PM_{2.5}$

(c) $PM_{10}$　(d) TSP

图 16　优化后颗粒物质量浓度分布图

Fig. 16　Optimized particulate matter concentration distribution contours

## 4　结论

(1) 蛋鸡舍内颗粒物浓度与热湿环境参数相关，温度与 $PM_1$、$PM_{2.5}$ 浓度呈正相关性($P$ < 0.01)，相对湿度与颗粒物浓度呈负相关性，对 $PM_{2.5}$、$PM_{10}$ 影响更大($P$ < 0.01)。产蛋不稳定期间颗粒物含量较大，鸡群活动会引起颗粒物浓度的上升，且对 TSP 影响较大；试验鸡舍内 $PM_{10}$ 和 TSP 的质量浓度均大于国家标准。

(2) CFD 模拟值与实测的颗粒物浓度比较接近，相对误差及 NMSE 在可接受的范围，因此采用该 CFD 模型来模拟蛋鸡舍内湿热环境以及颗粒物浓度是可行的。温度模拟值与实测值最大差值不超过 4℃，相对误差为 1.23% ~ 8.88%，平均相对误差为 5.05%。相对湿度相对误差为 5.11% ~ 14.00%，平均相对误差为 9.6%。因冬季对保暖的要求，鸡舍内大部分区域风速较小，都在 0.5 m/s 以下，使得颗粒物分布较均匀。颗粒物浓度模拟值相对于实测值整体偏小。舍内部分位置的颗粒物含量较大，需对试验鸡舍进行优化以改善舍内环境质量。

(3) 在白天温度超过 20℃ 的情况下，将导流板与壁面的角度 $\alpha$ 从 45° 增加至 67.5°。与试验鸡舍

模拟值相比,优化后的温度较之前略有下降,温度范围仍为蛋鸡舍温度的舒适区间。气流分布更为均匀,增大舍内气流流速,加快带动颗粒物向风机方向流动。$PM_1$ 浓度下降 17.4%、$PM_{2.5}$ 浓度下降 15.9%、$PM_{10}$ 浓度下降 18.1%、TSP 浓度下降 21.6%。说明适当增加导流板与壁面的角度可以有效改善试验鸡舍内的空气质量,更好地满足鸡只生长需要。

## 参 考 文 献


[1] 马振华,张喜庆,刘继军,等. 畜禽养殖环境中的空气颗粒物[J]. 中国兽医学报,2021,41(2):407 - 412.
MA Zhenhua,ZHANG Xiqing,LIU Jijun,et al. Review of research on airborne particulate matter in livestock farming environment [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine,2021,41(2):407 - 412. (in Chinese)

[2] 钟召兵,王宁. 养殖环境细菌微生物气溶胶粒径分布及其健康危害评估[J]. 中国动物检疫,2014,31(11):101 - 105.
ZHONG Zhaobing,WANG Ning. The size distrition and health risk assessment of microbe bacterial aerosol in livestock and poultry house[J]. China Animal Health Inspection,2014,31(11):101 - 105. (in Chinese)

[3] 夏道伦,黄晓萍. 鸡舍内粉尘危害以及减尘和除尘方法[J]. 四川畜牧兽医,2020(3):41 - 43.

[4] SABINO R, FAíSCA V M, CAROLINO E, et al. Occupational exposure to aspergillus by swine and poultry farm workers in portugal[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 2012, 75(22 - 23): 1381 - 1391.

[5] TONG G,ZHANG G,MORSING S,et al. Airflow simulation in a scale model of the swine building[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2007,38(3): 379 - 382.

[6] 陈文娟,董润坚,周海柱,等. 北方民用猪舍自然通风的数值模拟[J]. 安徽农业科学,2010,38(13): 6673 - 6676.
CHEN Wenjuan,DONG Runjian,ZHOU Haizhu,et al. Numerical simulation of natural ventilation in northern civil pig houses [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(13): 6673 - 6676. (in Chinese)

[7] 王校帅. 基于 CFD 的畜禽舍热环境模拟及优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
WANG Xiaoshuai. Study on the indoor thermal environmental simulation and optimal design of livestock building based on CFD [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2014. (in Chinese)

[8] WANG K,WANG X,WU B. Assessment of hygrothermal conditions in a farrowing room with a wet-pad cooling system based on CFD simulation and field measurements[J]. Transactions of the ASABE,2014,57(5): 1493 - 1500.

[9] 潘乔娜. 保育猪舍湿热环境与颗粒物的数值模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
PAN Qiaona. Numerical simulation on indoor hydrothermal environment and particle matter of the piggery[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2016. (in Chinese)

[10] 汪开英,李开泰,李王林娟,等. 保育舍冬季湿热环境与颗粒物 CFD 模拟研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):270 - 278.
WANG Kaiying,LI Kaitai,LI Wanglinjuan,et al. CFD simulation of indoor hygrothermal environment and particle matter of weaned pig building[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):270 - 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170934&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.034. (in Chinese)

[11] TAKAI H,PEDERSEN S,JOHNSEN J O,et al. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1998,70(1): 59 - 77.

[12] 郭丽,王春,马淑丽,等. 机械通风式笼养鸡舍内外颗粒物特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):276 - 282.
GUO Li, WANG Chun, MA Shuli,et al. Characterization and influencing factors analysis of indoor and outdoor particulate matter for caged laying hen house with mechanical ventilation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):276 - 282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180134&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.034. (in Chinese)

[13] 江晓明,张衍林,张兴广,等. 基于 CFD 的密闭式半阶梯笼养蛋鸡舍过渡性通风研究[J]. 华中农业大学学报,2017,36(6):113 - 120.
JIANG Xiaoming,ZHANG Yanlin,ZHANG Xingguang,et al. CFD-based studies on transitional ventilation of closed henhouse with semi ladder coop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2017,36(6):113 - 120. (in Chinese)

[14] ROACHE P J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1997,29: 123 - 160.

[15] 程秀花,毛罕平,倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. 农业机械学报,2011,42(2):173 - 179.
CHENG Xiuhua, MAO Hanping, NI Jun. Numerical prediction and CFD modeling of relative humidity and temperature for greenhouse - crops system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2): 173 - 179. (in Chinese)

[16] 刘妍华,曾志雄,郭嘉明,等. 增施 $CO_2$ 气肥对温室流场影响的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报,2015,31(12):194 - 199.
LIU Yanhua, ZENG Zhixiong, GUO Jiaming, et al. Numerical simulation and experimental verification of effect of $CO_2$ enrichment on flow field of greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12): 194 - 199. (in Chinese)

[17] 戴鹏远,沈丹,唐倩,等. 畜禽养殖场颗粒物污染特征及其危害呼吸道健康的研究进展[J]. 中国农业科学,2018,51(16):3214 - 3225.

DAI Pengyuan, SHEN Dan, TANG Qian, et al. Research progress on characteristics of particulate matter in livestock houses and its harmful effects on respiratory tract health of livestock and poultry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(16): 3214 – 3225. (in Chinese)

[18] SEO I H, LEE I B, MOON O K, et al. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 91 – 106.

[19] SEO I H, LEE I B, MOON O K, et al. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 106 – 117.

[20] LEE I, SASE S, SUNG S. Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house[J]. JARQ, 2007, 41(1): 53 – 64.

[21] WANG L L, CAO Z, LI Q, et al. Concentration and particle size distribution of particulate matter inside tunnel-ventilated high-rise layer operation houses[J]. Atmospheric Environment, 2013, 66: 8 – 16.

[22] LIN X, ZHANG R, JIANG S, et al. Emissions of ammonia, carbon dioxide and particulate matter from cage-free layer houses in California[J]. Atmospheric Environment, 2017, 152: 246 – 255.

[23] MODINI R L, AGRANOVSKI V, MEYER N K, et al. Dust emissions from a tunnel-ventilated broiler poultry shed with fresh and partially reused litter[J]. Animal Production Science, 2010, 50(6): 552 – 556.

[24] 王卫红，刘双红，任永鑫，等. 北方规模化猪场周围环境空气中 $PM_{10}$ 的监测分析[J]. 中国兽医杂志，2015，51(12)：95 – 97.

[25] 中华人民共和国农业部. 畜禽场环境质量标准 NY/T 388—1999[S]. 2000.

[26] PETER H. Understanding normalized mean squared error in power amplifier linearization[J]. IEEE Microwave and Wire-less Components Letters, 2018, 28(11): 1047 – 1049.

[27] SARAZ J A O, VELASQUEZ H J C, BEDOYA A E. Thermal evaluation and validation of a computational model to unrefined sugar (panela) burner GP150[J]. Dyna, 2010, 77(162): 237 – 247.

[28] 邹修国，祝忠钲，SU Steven，等. 基于 MCU 和 CFD 的鸡舍氨气检测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2021，52(9)：338 – 345.
ZOU Xiuguo, ZHU Zhongzheng, SU Steven, et al. Design and test of ammonia detection device in broiler chamber based on MCU and CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 338 – 345. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210938&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.038. (in Chinese)

[29] 马骏，刘振宇. 密闭式鸡舍环境参数 CFD 模拟与优化[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2020，40(6)：1 – 9.
MA Jun, LIU Zhenyu. CFD simulation and optimization of environmental parameters in closed hen house[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2020, 40(6): 1 – 9. (in Chinese)

[30] 李文良，施正香，王朝元. 密闭式平养鸡舍纵向通风的数值模拟[J]. 中国农业大学学报，2007，12(6)：80 – 84.
LI Wenliang, SHI Zhengxiang, WANG Chaoyuan. Numerical simulation of tunnel ventilation system of plane-raising enclosed henhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(6): 80 – 84. (in Chinese)

[31] 曹孟冰，杨婷，宗超，等. 进风口高度与导流板角度对猪舍空气龄和 $CO_2$ 分布的影响[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：427 – 434，441.
CAO Mengbing, YANG Ting, ZONG Chao, et al. Influence of air inlet height and angle on air age and $CO_2$ distribution in pig house[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 427 – 434, 441. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2020s252&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.052. (in Chinese)