

倪德纲,孟力,沈建洲,等. 发酵床网上养殖肉鸭舍春季环境参数监测及通风策略模拟优化[J]. 江苏农业科学,2023,51(10):168-176.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.10.024

发酵床网上养殖肉鸭舍春季环境参数监测 及通风策略模拟优化

倪德纲^{1,2,3}, 孟力^{2,3}, 沈建洲^{2,3,4}, 刘建龙^{2,3}, 霍连飞^{2,3}, 柏宗春^{2,3}, 夏礼如^{2,3}

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏南京 210014;

3. 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏南京 210014; 4. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要:中国作为世界上肉鸭出产最多的国家,近年一直在提倡对肉鸭进行集约化和规模化养殖。而最近兴起的一种新型的发酵床网上养殖模式,通过地面铺设生物垫料用来发酵分解粪便,能有效避免水禽与粪污的接触,减少病原微生物的感染与传播机会,提高鸭舍内的空气环境质量。对发酵床网上养殖肉鸭舍内的温湿度进行测试,使用三维建模软件建立了鸭舍的等比例模型,使用 fluent 软件对鸭舍内的气流场进行环境模拟,为使鸭舍内环境达到适宜肉鸭成长的范围,使鸭舍内的气流组织更加均匀,引入了不均匀系数,且以不均匀系数 <0.2 为目标,针对鸭舍内气流组织形式不均匀的问题,采用优化通风策略的方法来解决。实地测试数据为,测试期间(2022 年 3 月 18 日 00:00 至 2022 年 3 月 25 日 00:00),鸭舍内气温 $9.34 \sim 23.77\text{ }^{\circ}\text{C}$,舍内外平均温差 $6.75\text{ }^{\circ}\text{C}$;舍内平均相对湿度 80.66% ,低于舍外;对鸭舍的实际情况进行仿真计算后发现,与实地测试数据相比,平均相对误差仅为 $3.58\% \sim 4.07\%$,说明该研究所建模型的数值模拟与试验数据具有很好的一致性。但模拟结果显示,原有的通风策略并不能满足鸭舍内气流组织均匀性的要求,鸭舍后半部分的空气流动几乎凝滞。通过增加鸭舍后部的通风面积 30% ,同时通风小窗面积以重叠 60% 对称布置的策略来使外界气流更充分地同鸭舍内的空气进行交换,优化后 S1、S2、S3 平面的温度范围分别为 $12.87 \sim 28.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10.13 \sim 27.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $12.98 \sim 24.41\text{ }^{\circ}\text{C}$;优化通风策略后,鸭舍内 S1、S2、S3 平面的平均风速分别为 0.62 、 0.66 、 0.56 m/s ,对比原来的通风策略其气流场和温度场更加均匀。本研究结果可为今后类似鸭舍的通风方式及结构的优化设计提供理论支持。

关键词:温度;流场;发酵床;模拟仿真;鸭舍

中图分类号:S834.4⁺6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)10-0168-08

我国是世界上肉鸭养殖和出栏量最多的国家,同时我国的肉鸭出口量也常年位居世界第一^[1]。在这样的背景下,提高肉鸭的养殖质量,保证肉鸭生长过程的健康就显得尤为重要。近年来,我国的肉鸭养殖模式不断朝着规模化、集约化、数字化发展,根据“十四五”要求,严格保护农业生产空间和乡村生态空间,科学划定养殖业适养、限养、禁养区域。我国目前肉鸭养殖模式主要有传统散养、地面平养式、层叠笼式和发酵床式 4 种,其中发酵床进行网上养殖可利用微生物发酵分解肉鸭粪便中的有机质,不仅能降低粪便病原体 and 寄生虫卵的数量,

还能有效抑制氨气等臭气,降低粪便聚积产生的高温,大大提高了肉鸭的生活和生长环境的质量,减少了肉鸭应激反应出现的概率^[2]。而且由于使用高台网床进行网上养殖,故而可在不打扰鸭子正常作息的情况下使用自动翻耙机来处理板结、失效的垫料,降低了劳动强度和运营成本。由于这些优点,发酵床养殖在全国各地越来越受青睐。

在肉鸭生长过程中,过于明亮的光照、超出一定范围的温度、恶劣的空气质量均会引起肉鸭的应激反应,降低鸭的免疫力,使鸭患上严重疾病,甚至死亡。邵坤等研究表明,肉鸭生长的最佳环境相对湿度应在 $55\% \sim 65\%$ 之间,肉鸭在 $1 \sim 3$ 日龄时适宜温度为 $31 \sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4 \sim 6$ 日龄时适宜温度为 $29 \sim 31\text{ }^{\circ}\text{C}$,从第 1 周后,每周下降 $2 \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,成熟的鸭苗最佳的环境温度为 $18 \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。王阳等研究表明,蛋鸡舍内 CO_2 浓度应维持在 $5\ 000\text{ mL/m}^3$ 以上^[4];Liang 等研究表明,育成期禽舍内 NH_3 浓度应

收稿日期:2022-07-11

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(20)2008]。

作者简介:倪德纲(1998—),男,江苏张家港人,硕士研究生,主要从事设施农业机械化研究。E-mail:1098435977@qq.com。

通信作者:孟力,硕士,副研究员,主要从事设施农业环境工程技术研究。E-mail:menglili90@163.com。

不高于 $10 \sim 15 \text{ mg/m}^3$ ^[5]。而吴胜等研究表明,良好的通风与均匀的气流组织能有效降低室内污染物浓度,维持室内适宜的温湿度^[6]。因此,合理的通风策略和鸭舍结构规划是肉鸭良好品质的重要保障。

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD), 是通过软件建立模型并求解的方式对实际情况进行模拟, 这种方法无需花费大量的金钱、劳动成本和时间就能获得流场数据, 因而在进行禽类养殖舍环境研究时被广泛应用。李建国等采用 CFD 对层叠式笼养肉鸭舍进行模拟, 且验证了模拟结果与实际相符, 并通过改变通风小窗的位置使室内气流更均匀^[7]。程琼仪等通过 CFD 方法模拟了纵向通风层叠鸡舍进风口内侧加设和不加设导流板 2 种情况, 模拟结果验证表明当进风口设置导流板时, 在进风口附近的笼内气流组织更加均匀^[8]。Longhuan Du 等采用 CFD 对鸡舍进风口位置进行了优化, 发现室内空气运动的均匀性可防止过多的局部对流热损失, 降低房屋末端温度^[9]。Duan 等使用 CFD 方法建立兔舍有限元模型, 设置边界条件, 模拟兔舍内气流分布^[10]。对禽舍现有通风措施的合理性及其自身利弊进行分析, 为低气温条件下个体或村社的一般规模家兔养殖舍内通风提供了理论依据。Yeo 等采用 CFD 模拟了不同进出风口条件下的猪舍环境, 发现在猪舍进风口处增加一个气流缓冲空间, 能在保温的同时很好地维持空气温度分布的均匀性^[11]。Tomasell 等利用 CFD 模拟了夏季工况下牛棚的气流组织, 验证了模型的可靠性^[12]。

本研究以江苏省南京市溧水区某养殖场的一座发酵床网上养殖肉鸭舍为研究对象, 基于现场实测和 CFD 模拟的方法对采用风机加通风小窗通风模式的鸭舍进行气流和温湿度分析, 试图找出这种结构的鸭舍在初春最佳的通风模式, 使室内气流组织更加均匀, 空气质量达适宜肉鸭健康生长的水平, 为相近地区的发酵床网上养殖模式的鸭舍改善舍内环境提供一些参考的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验鸭舍

本研究的试验鸭舍位于江苏省南京市溧水区某肉鸭养殖场 ($31^{\circ}67'N$, $119^{\circ}02'E$)。鸭舍示意图见图 1。由图 1 可知, 长 78.00 m, 宽 16.00 m, 顶高

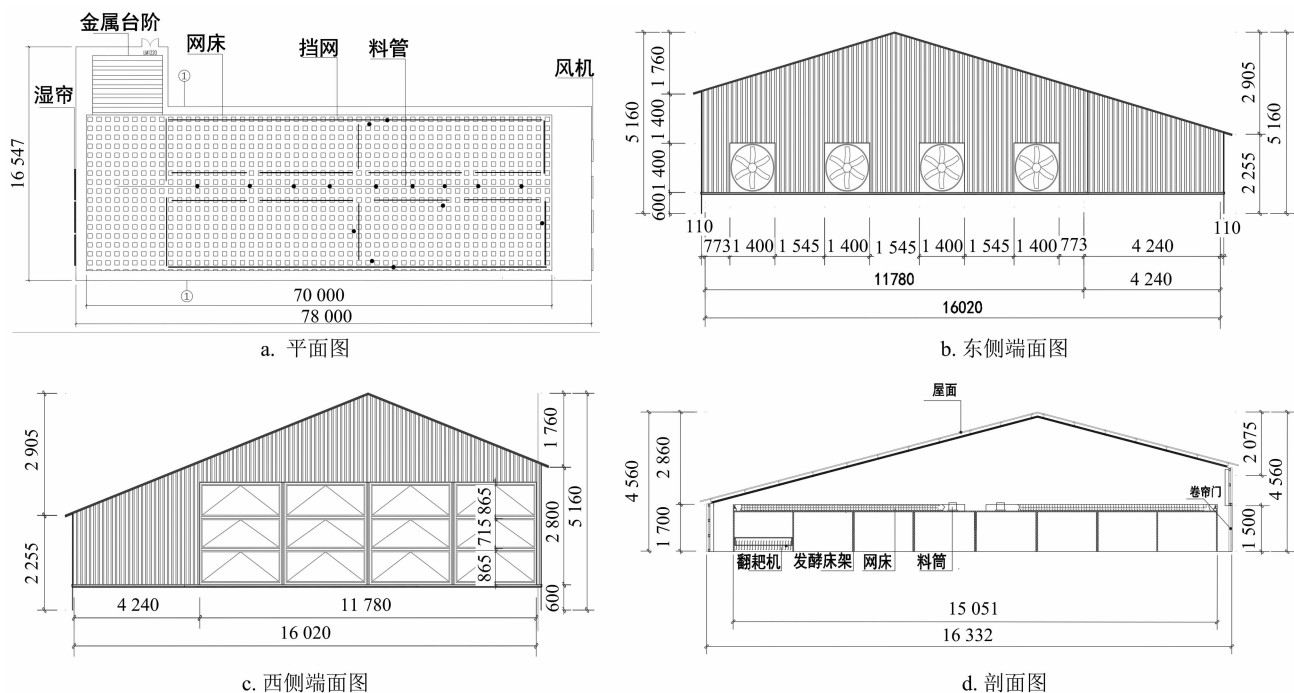
4.56 m。屋面铺设彩钢屋面瓦, 瓦下铺设 50 mm 厚的岩棉保温板, 板上做了锡箔防潮贴面并用 1 mm 套塑钢丝网固定。墙体砌筑材料为 50 mm 厚彩钢岩棉夹心墙板。鸭舍南北两侧各开有若干通风小窗 ($0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$), 3 个 1 组均匀分布在墙体上部, 通过鸭舍北侧前后各一的卷帘门 ($2.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$) 进入鸭舍内部。鸭舍的东墙均匀布置 4 个风机, 风机叶轮直径为 1.4 m, 理论通风量为 $46\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。西墙上安装 3 行 4 列 12 个湿帘 ($0.715 \text{ m} \times 2.190 \text{ m}$)。鸭舍采用机械通风方式, 由风机和湿帘共同进风, 南北两侧通风小窗排风。鸭舍内设有长 70 m 宽约 15 m 的塑料网床, 网床离地 1.7 m, 由 72 m 长的工字梁支撑。发酵床上铺有尼龙网限定鸭的生活区域, 并设有送料管和饲喂装置。地面铺设生物垫料, 由翻耙机定期进行翻耙操作。

1.2 试验方法

本试验于同一鸭舍饲养的同一批次肉鸭育肥后期 (30 ~ 36 日龄) 进行, 具体时间为 2022 年 3 月 18 日 00:00 至 2022 年 3 月 25 日 00:00, 测试期为初春季节, 鸭舍内西侧墙上的湿帘未开启, 东侧墙有 2 个风机运行, 通风小窗均处于打开状态, 卷帘门处于关闭状态。将肉鸭舍平分为 3 个平面 S1、S2 和 S3。其中, S1 为网床上料线管位置 (距离网床 2 m), S2 为网床平面, S3 为肉鸭活动面 (距离网床 0.4 m); 同时在每一平面的相同位置设置温度测试点, 肉鸭鸭舍中间位置东西方向上均匀分布 5 个温湿度测点, 在鸭舍中间位置的南北方向上均匀分布 3 个测点, 共计 7 个温湿度测点, 测点布置, 由图 1-a 可知。同时, 在鸭舍南北均匀分布 3 条线, 东西方向均匀分布 5 条线, 在 2 条线的所有交叉点作为风速的检测点。选择了 Onset Computer 公司的 HOB0 UX100-011 温湿度传感器进行温度和湿度的测量, 温度测量范围为 $-20 \sim 70^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 在 25°C , 相对湿度测量范围在 15% ~ 95%, 精度为 $\pm (2.5\% \sim 3.5\%)$, 分辨率 $0.05\% \sim 0.07\%$ 。设置传感器每 15 min 自动记录 1 次数据。风速测量采用瑞典 SWEMA 公司的手持式 SwemaAir5 热线风速仪, 测量范围 $0.1 \sim 12.0 \text{ m/s}$, 测量精度为 $\pm (0.04 \text{ m/s} \pm 3\% \text{ 读数})$, 分辨率 0.1 m/s 。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 整理试验数据, 采用 IBM SPSS 进行数据差异显著性分析, 采用 Origin 进行图表绘制。



图中○表示温湿度测点的位置, ×表示风速测点的位置

图1 供试鸭舍示意图(cm)

2 结果与分析

2.1 养鸭舍内外温湿度分析

供试鸭舍为不透光全封闭式饲养,室内采光依靠人工光源,几乎无法受到太阳直射,故本试验忽略太阳辐射照度对鸭舍内部的影响。

由图2可知连续7 d 舍内外空气温度和相对湿度的日变化。因舍内温湿度采集点有21处,测试数据较多,故采用平均数作图。由图2-a可知,连续7 d 舍外最低气温4.56℃,最高气温20.98℃,平均气温8.86℃;舍内最低气温9.34℃,最高气温23.77℃,平均气温15.61℃;舍内外平均温差6.75℃,最大温差达11.73℃,表明此鸭舍有较强隔绝内外热交换的能力。由于测试期处于初春时节,且鸭苗处于育成期,天气回暖鸭舍内温度已达到前言所述的适宜温度(18~23℃)。

由图2-b可知,连续7 d 舍外空气相对湿度52.38%~99.10%,平均相对湿度86.80%;舍内空气相对湿度53.65%~93.45%,平均相对湿度80.66%。鸭舍内外的相对空气湿度曲线并无太大差异,鸭舍内部相对湿度波动相较于舍外更加稳定,因此更有利于肉鸭的生长,因为减少了它们应激的可能性。

孙培新的研究表明,在20℃的舍温下60%的

相对湿度比80%更适宜肉鸭生长^[13]。在本次试验中,鸭舍内相对湿度在3月19日和3月25日全天均相对较高,维持在80%以上,Shen等研究表明,80%以上的高湿环境容易导致禽类应激^[14],而在本试验中舍内几乎所有的高湿环境均由于外部相对湿度较大引起。

2.2 养鸭舍内不同平面空间的温度分析

现以布置在同一平面的传感器为分组标准将鸭舍内部分为S1、S2、S3 3个平面。将3个平面的传感器数据取平均值并作图,由图3可知,连续7 d S1、S2、S3平面的平均温度分别为15.70、15.13、15.78℃,平均最大温度24.63℃。

此外,S1和S3的温度在7 d内的差异皆不显著,而在3、6、7 d的13:00~17:00,S2平面的温度皆显著低于S1、S3平面($P < 0.05$)。

3 CFD 模拟

3.1 控制方程

CFD的工作流程是在建立了数学模型,确定离散化方法后再对划分好的物理模型网格进行流场计算^[15]。流场中的气流遵循守恒定律,主要包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律,如果有多种类型的流体相互作用,系统还要遵守组分守恒定律。本研究模型只将空气列为研究对象,故忽略

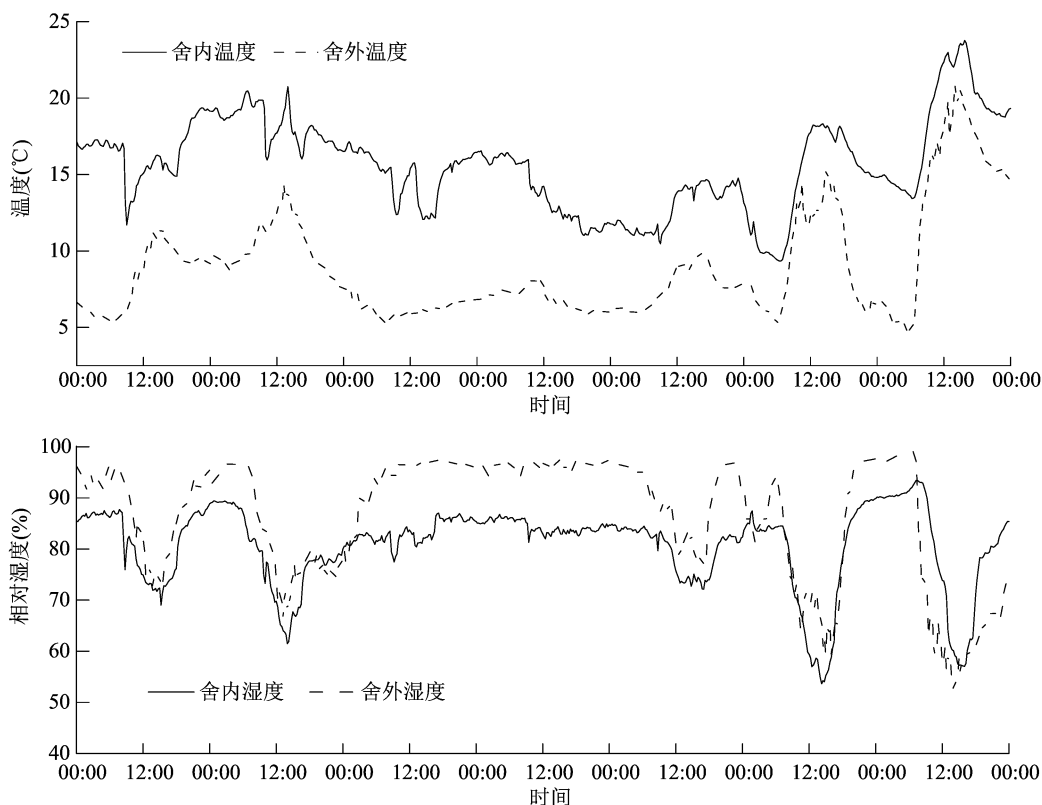


图2 舍内外的温湿度变化(2022 年 3 月 18 日 00:00 至 2022 年 3 月 25 日 00:00)

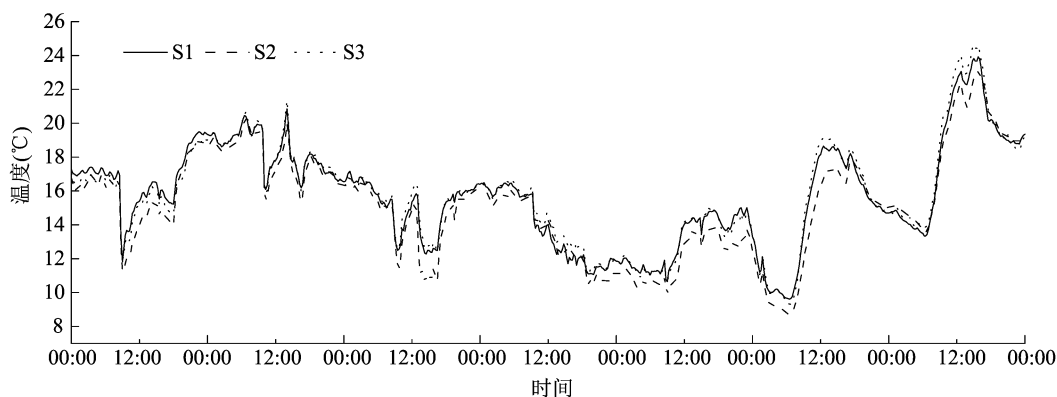


图3 S1、S2、S3 平面温度的变化(2022 年 3 月 18 日 00:00 至 2022 年 3 月 25 日 00:00)

组分守恒,在 Fluent 中将空气设为不可压缩且定常流动的理想气体,则控制方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho \omega}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \nu v}{\partial x} + \frac{\partial \nu v}{\partial y} + \frac{\partial \nu \omega}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \nu v}{\partial x} + \frac{\partial \nu v}{\partial y} + \frac{\partial \nu \omega}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial \nu \omega}{\partial x} + \frac{\partial \nu \omega}{\partial y} + \frac{\partial \nu \omega}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ p = \rho TR \end{cases} \quad (1)$$

其中, x,y,z 是空间坐标系中 3 个坐标轴; v,v,ω 是速度矢量在 x,y,z 3 个方向上的分量, m/s ; p 为流体微元的压力, Pa ; ν 为空气运动黏度, m^2/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 。

3.2 建立模型

使用 Solidworks 软件对鸭舍进行 1:1 等尺寸 3D 模型的构建,由于湿帘不开启,为计算方便且节省时间,故将其作壁面处理,同时简化立柱、横梁和送料管等对气流影响较小的结构。鸭舍的整体模型见图 4。

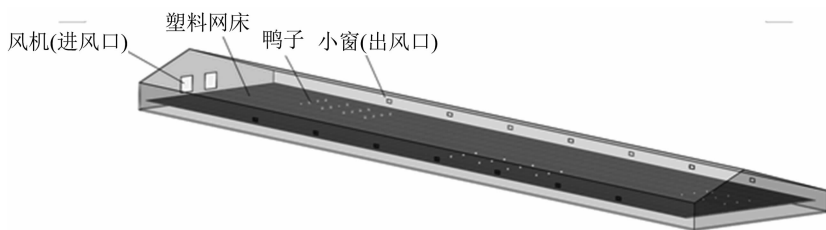


图4 鸭舍整体模型

同时,由于舍内肉鸭数量众多,无法忽略其自身发热对舍内温度场的影响,董宗耀等在模拟阶梯笼式鸡舍进风情况时忽略了腿部、尾部和鸡冠部分,仅对鸡身部分进行建模^[16]。林勇等在模拟层叠笼式鸭舍的通风情况时,将鸭和鸭笼及其下的鸭粪传送层做整体化处理^[17]。由于发酵床式鸭舍中鸭是在半开放的网床上生活,故采用对鸭单独建模的方法。根据邓书辉等对牛的建模方法^[18]对鸭简化模型(图5)。

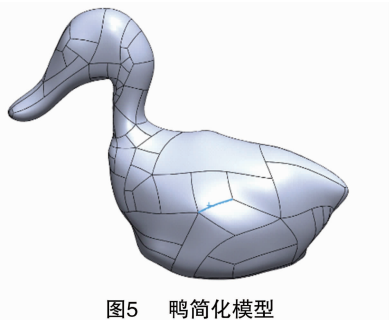


图5 鸭简化模型

3.3 网格划分与边界条件

为简化计算,使用 ICEM 来画模型的网格。选择非结构网格,加密格栅及鸭外表面的网格质量,整体模型的网格单元总数达 1 023 万,网格单元类型为四面体网格。对鸭子、网床、气流出入口的网格加密,加密尺寸为 15 mm。鸭舍模型网格见图6。

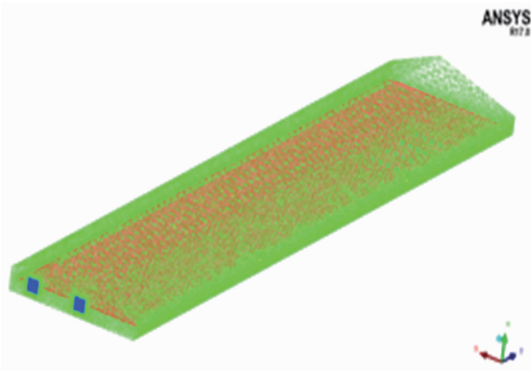


图6 整体模型网格划分

湍流计算选择 $\kappa-\varepsilon$ 方法下的 Realizable 模型,压力与速度选择 SIMPLEC 算法耦合,压力选择了 PRESTO! 模型求解。气流入口为风机,采用速度型

入口,风速为 5 m/s,温度 290 K。出口为两侧外墙上的小窗,采用压力出口,相对压力大小为 0,鸭棚外壁面设置为恒温静止无滑移壁面,温度大小为 300 K。鸭子外表面设置为恒温静止无滑移壁面,温度大小为 315 K,计算采用稳态进行计算,经过 1 000 次迭代计算。各物理量达到收敛状态。

3.4 模拟结果验证与分析

为验证本研究所建立的仿真模型和选择的模拟方法是否正确,提取仿真结果中 S1、S2、S3 的温度场与气流场与试验所测得的对应数据进行验证,选取 2022 年 3 月 23 日 16:30 这一时刻的模拟结果(图7)。

在仿真结果中提取与传感器同一位置的数据结果与同时段的传感器数值比较发现,仿真结果与传感器实测值基本吻合(图8)。经过取 S1、S2、S3 平面上所有测点的平均值进行仿真值和实测值的误差计算可得到 3 个平面模拟的准确度平均相对误差分别为 4.07%、3.92%、3.58%,说明模拟仿真的误差较小,模拟出来的鸭舍内气流温度场与实际情况误差较小,与实际相符。

由图 7-c 可知,在鸭生活的平面上,由于鸭舍长度较长,鸭舍后部的气温普遍高于前部,气流从入口进入后开始衰减,所带来的温降甚至未达到鸭舍中间部分就从 13℃ 升至 17℃,其次由于鸭舍较长,2 台风机距离较近导致了进风后气流的扩散性不佳,而中后部仅有小窗的开启为一小块区域提供了微小的温降。图 7-b 也说明了相同情况,鸭舍靠近进风口位置的部分温度较后半部分要小得多,由于图 7-b 是网床平面 S2 的情况,鸭子本身产生体热,所以普遍温度均比图 7-c 高一些。图 7-a 中 S1 平面是在鸭舍中间的料管平面,由于 S1 平面已经高于进风风机的高度,所以进风处的温度就已经达到了 15℃。由图 7-d 可知,在鸭生活的平面上,由于仅有单侧进风,且鸭舍长度较长,鸭舍后部气流几乎没有流动性,气流从入口进入后开始衰减,还未到达中部就降到了 0.6 m/s 以下。在这种情况下,

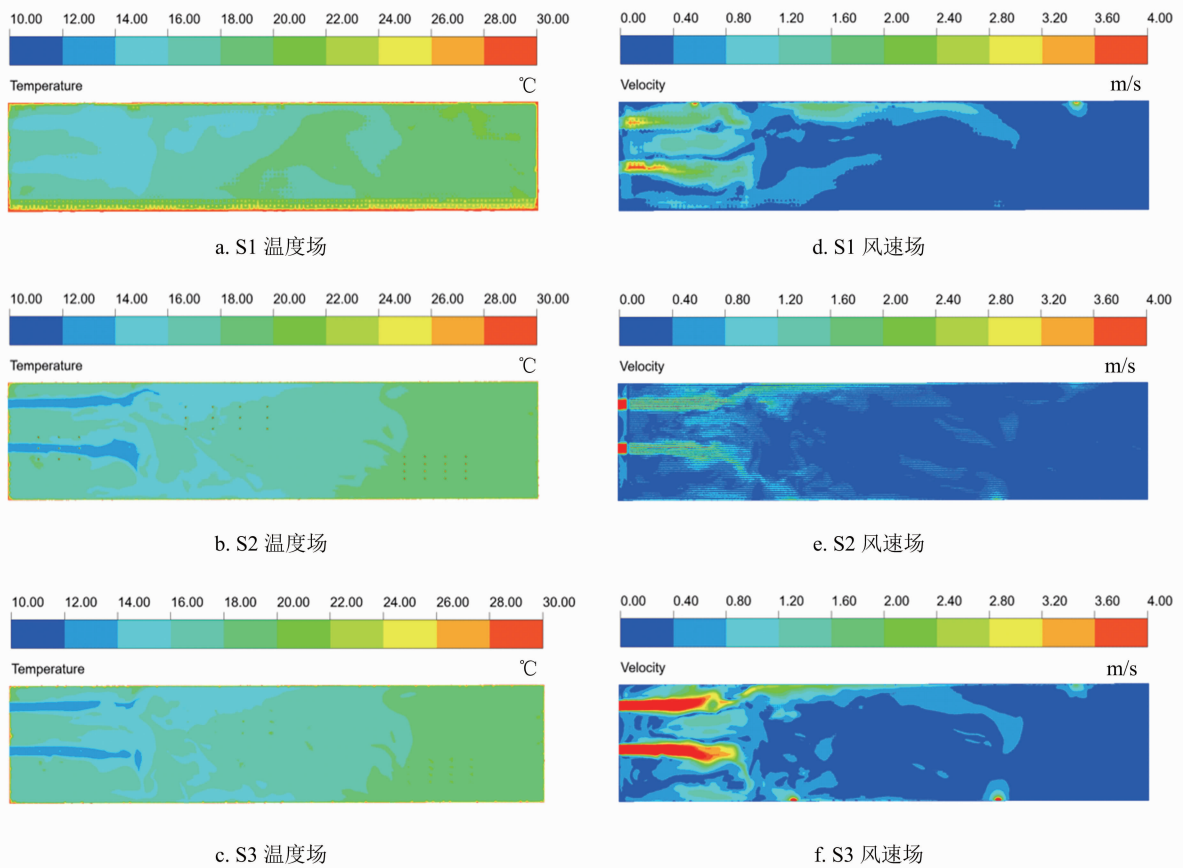


图7 模拟结果(2022 年 3 月 23 日 16:30)

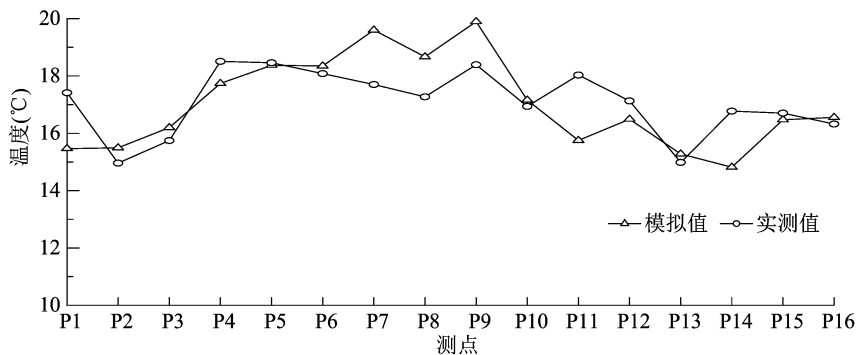


图8 温度实测值和模拟值对比

鸭舍内产生的 CO_2 和 NH_3 等污染性气体很难排出,为得到更好的生活环境,鸭会自发地向鸭舍空气流动性好的地方聚集,而一旦造成聚集,则必然会降低气流在右前方的流动性,这样一来,舍内仅有的气流流动性好的区域也被破坏。

3.6 气流组织优化

由于原模型两侧的通风小窗对称布置,因此会导致鸭舍内各部分的气流对冲而产生气流指标紊乱,鸭舍左右两侧气流均仅在出口处受压力产生流动性,但这样的压力不足以使气流向全域扩散。而

78 m 长的鸭舍仅在一侧用风机进风,是无法使气流在其速度衰减至几乎不计前扩散至鸭舍后部的,除非使用超大功率风机,但超大功率风机不仅费电,成本增加,且产生噪声会使鸭产生应激,影响鸭健康生长。同时,如此长的鸭舍依靠南北两侧的每侧通风小窗出风也有些捉襟见肘,由图 7 - d 可知,鸭舍后部南北两侧除通风小窗的位置附近均是气流低速区域,流速低至 0.1 m/s 。因此,为让鸭舍内的气流组织更加均匀,使鸭能在更加适宜的环境下生长,使鸭舍内的温度更加适宜,在对原来的鸭舍模

型进行了优化设计后利用 FLUENT 再次进行了仿真,对鸭舍前部单侧通风模式进行优化,增加后部的通风面积 30%,且将入口速度调整为 3.5 m/s。左右两侧的通风小窗从中间向两边以面积重叠 60% 对称布置。

优化后 S1、S2、S3 的温度场和气流场见图 9。由图 9-a 可知,优化后的 S1 平面,即鸭生活区域的上方,整体温度均维持在 14~24℃,符合引言部分所述。而大多数生活区域温度均维持在 15.6~17.6℃之间,为鸭提供了适宜的温度保障。由图 9-b 可知,在鸭脚下的网床平面,由于处于进风平面内,前后部温度在 12~14℃之间,且中间的区域有 1/2 处于 14~18℃之间,提示由地面生物垫料所散发的热量上升至网床平面时,经换热,这些低温会被中和,直到鸭生活平面 S3 平面(图 9-c),温度整体升高至 18~22℃,是一个适宜鸭生长的温度。总体来说,优化后的通风策略为鸭舍带来了更适宜的温度环境。

将修改通风策略后的气流场模拟结果与原气流场比照,由图 9-d 可知,优化后鸭舍后部气流流速明显增加,且鸭舍左右两侧的气流流动性也大大

加强,整个鸭舍的中后部气流速度 <0.4 m/s 的区域较优化前减少了 1/2 以上。在鸭生活平面,风速达 0.6 m/s 区域也比优化前增加了 2/3 左右。这样风速在合理范围内的提高加快了舍内污染物排除,提高与新鲜空气交换的速率,从而提高了舍内环境质量。但除开鸭舍四角的非生活区域外,舍内中间靠右后方仍有一部分空间的空气流动 <0.4 m/s,由于鸭舍过长纵向的长度,若继续增加风机转速,则必定牺牲舍内温度,从而无法达到较好温度效果。

为对结构优化后的鸭舍内部气流场均匀性进行评价,引入气流不均匀性系数

$$v_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i;$$

$$I_h = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_h)^2}{n}}}{v_h}。$$

式中: v_h 为高度为 h 平面上的平均气流速度, m/s; v_i 为第 i 个测点气流速度, m/s; n 为测点数; I_h 为高度为 h 平面上的气流不均匀性系数, I_h 值越小,气流分布的均匀性越好。

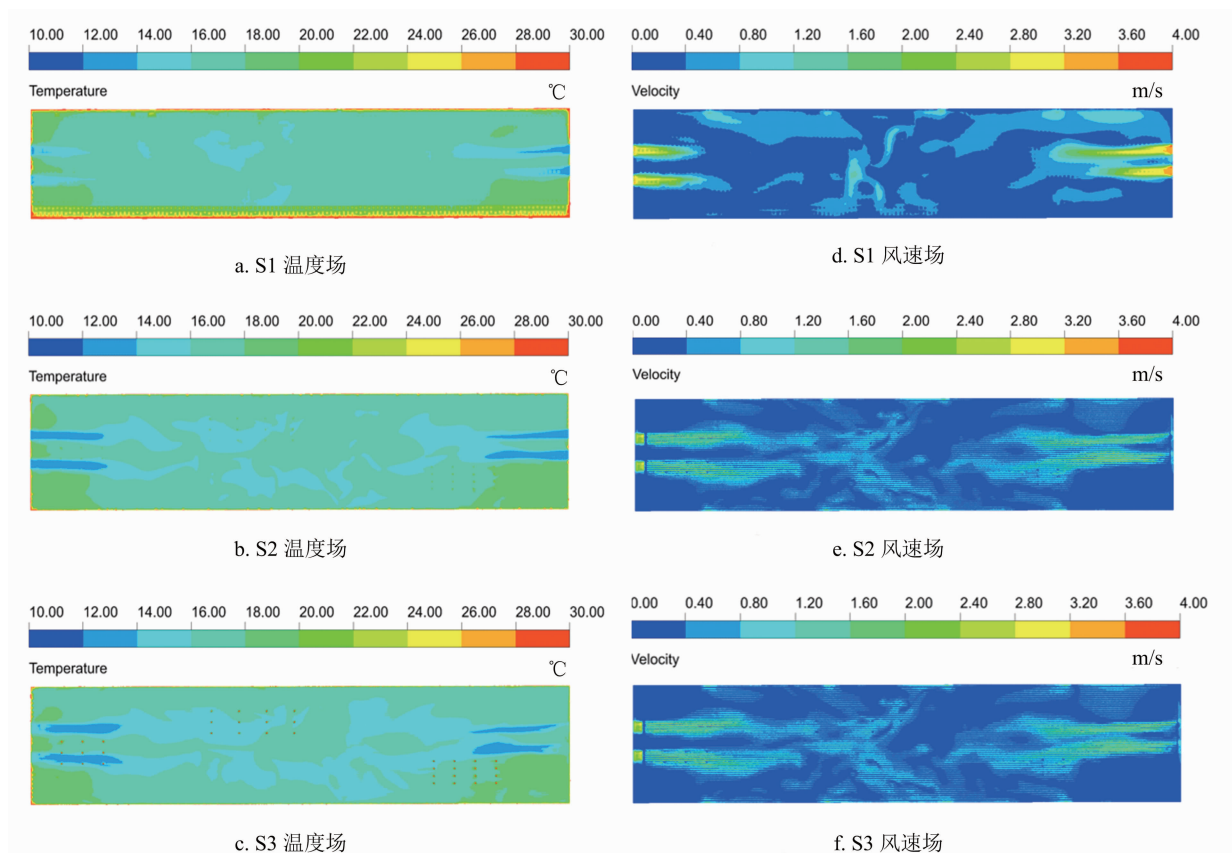


图9 优化后模拟结果(2022 年 3 月 23 日 16:30)

由以上数据计算得到原结构下鸭舍的 S1、S2、S3 平面的温度不均匀系数分别为 0.09、0.04、0.05，均匀性良好。但鸭生活平面气流速度不均匀性系数为 1.28；优化后鸭生活平面的气流不均匀性系数为 0.19，气流均匀性较优化前的气流均匀性提升了 85%。

4 讨论

本研究对如何提高鸭舍内空气质量和提供适宜的温度进行了研究，通过改变通风策略来改变鸭舍内环境。通过计算可知舍内气流风速和温度的不均匀系数降低至 0.2 以下，达较好的通风预期目标。

但由于鸭舍过长这本身的客观因素限制，舍内仍有一些区域的气流速度低于 0.2 m/s，在兼顾鸭舍适宜温度的前提下，后期可考虑在舍内增加导风装置引导气流向低速区域流动，这样增加室内流动性的方法在很多建筑案例中均有应用。姚家君等通过在鹅舍的主梁下安装卷膜来做气流导向，有效提高鹅的活动区域气流的均匀性和气流速度^[19]。He 等发现，增加气孔是帮助室内温度均匀分布的关键因素^[20]。但在本研究中，迫于成本与舍内结构等因素，并未考虑增加导流装置，后续将展开相关研究。

5 结论

本研究测试了发酵床网上养殖肉鸭舍初春季环境参数变化，构建了鸭舍的 CFD 模型，验证了模型的准确性，进一步优化鸭舍的气流组织，使用增开通风风机，小窗部分对称布置的方式来优化鸭舍内的气流，提高了鸭舍内气流组织的均匀性和肉鸭的生活质量，并将鸭生活区域的温度控制在合理范围内。

(1)测试期间，鸭舍内气温 9.34 ~ 23.77 ℃，舍内外平均温差 6.75 ℃，在春季气温逐渐升高，供试鸭舍保持了较好的温湿度性能；舍内平均空气相对湿度 80.66%，低于舍外，鸭舍内部相对湿度波动相较于舍外更加稳定，保持干燥的同时减少了细菌等微生物的孳生，有利于肉鸭的健康生长。

(2)为提高模拟的准确性，对温度和风速进行了模拟仿真，并提取仿真结果中 S1、S2、S3 的温度场与气流场与试验所测得的对应数据进行验证，平均相对误差为 3.58% ~ 4.07%。此相对误差的数值不大，模拟仿真值在很大程度上比较准确地反映了

试验过程中鸭舍内气流速度的变化趋势，说明本研究所采用的模拟方法能经得住实际检验，为后续鸭舍内的结构优化仿真研究提供了有力保证。

(3)模拟发现优化后模型的 S1、S2、S3 温度范围分别为 12.87 ~ 28.03 ℃、10.13 ~ 27.16 ℃、12.98 ~ 24.41 ℃。优化后模型 S1、S2、S3 的平均风速分别为 0.62、0.66、0.56 m/s，且较原模型更加均匀。

本研究建立了发酵床网上养殖肉鸭舍的三维模型，可为今后类似鸭舍的通风方式及结构的优化设计提供理论支持和参考依据。

参考文献：

- [1]侯水生,刘灵芝. 2021 年水禽产业现状、未来发展趋势与建议[J]. 中国畜牧杂志,2022,58(3):227-231,238.
- [2]应诗家,张甜,蓝赐华,等. 发酵床对舍内环境质量和肉番鸭生产性能的影响[J]. 畜牧兽医学报,2016,47(6):1180-1188.
- [3]邵坤,王佩良,孙臻国,等. 发酵床网上养殖对肉鸭圈舍环境与生产性能的影响[J]. 湖北畜牧兽医,2018,39(3):5-8.
- [4]王阳,王朝元,李保明. 蛋鸡舍冬季 CO₂ 浓度控制标准与最小通风量确定[J]. 农业工程学报,2017,33(2):240-244.
- [5]Liang Y, Xin H, Wheeler E F, et al. Ammonia emissions from U. S. laying hen houses in Iowa and Pennsylvania[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5):1927-1941.
- [6]吴胜,沈丹,唐倩,等. 规模化半封闭式猪场内颗粒物、氨气和二氧化碳分布规律[J]. 畜牧与兽医,2018,50(3):30-38.
- [7]李国建,杨林,许金钊,等. 基于 CFD 的笼养鸡舍冬季通风方案模拟与验证研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2021(21):57-62,151.
- [8]程琼仪,穆钰,李保明. 进风位置对纵向通风叠层鸡舍气流和温度影响 CFD 模拟[J]. 农业工程学报,2019,35(15):192-199.
- [9]Du L H, Yang C W, Dominy R, et al. Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 159:1-15.
- [10]Jin N, Zheng M, Chen J, et al. Study on the indoor environmental simulation and optimal design of rabbit houses in winter based on CFD[C]//ASABE. 2018 ASABE Annual International Meeting. Detroit, Michigan: ASABE, 2018:2-10.
- [11]Yeo U H, Lee I B, Kim R W, et al. Computational fluid dynamics evaluation of pig house ventilation systems for improving the internal rearing environment[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186:259-278.
- [12]Tomasello N, Valenti F, Cascone G, et al. Development of a CFD model to simulate natural ventilation in a semi-open free-stall barn for dairy cows[J]. Buildings, 2019, 9(8):183.
- [13]孙培新. 环境温度和湿度对育肥期北京鸭生长性能和抗氧化机能的影响及其调节机制[D]. 北京:中国农业科学院, 2020:26-28.

温钊发,蒲智,程曦,等. 基于轻量级 MIE_Net 的田间农作物病害识别[J]. 江苏农业科学,2023,51(10):176-184.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.10.025

基于轻量级 MIE_Net 的田间农作物病害识别

温钊发,蒲智,程曦,赵昀杰,张泽宇
(新疆农业大学计算机与信息工程学院,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为实现农作物病害的快速精准识别,降低病害对农业安全生产的影响,本研究针对现有病害识别模型参数量大、鲁棒性低、泛化性弱等问题提出了轻量级 MIE_Net 农作物病害识别网络。该网络以 MobileNetV2 为基础网络结构,首先使用多尺度特征提取模块替换原网络的初始卷积层,提高网络对不同面积病斑的特征提取能力,增加网络中的特征复杂度;其次在主模块中添加 ECA 注意力机制,提高网络对叶片病害区域的关注程度,降低复杂背景对小病斑特征提取过程的影响;最后使用 Swish 激活函数增加网络的表达能力,使网络性能达到最优。结果表明,多尺度特征提取模块提高了模型对不同病斑大小的识别准确率,ECA 注意力模块提高了网络对小病斑的识别准确率,最终网络模型对复杂环境中 2 种作物 11 种病害类别的最低识别精确率达到 91.2%,总体病害识别准确率达到 95.79%,比原网络提高 1.84 百分点,参数量为 2.24 M,权重文件大小为 8.78 MB。MIE_Net 网络在保证模型轻量化的同时提高了模型的准确性、泛化性以及鲁棒性,整体性能优于其他现有网络模型,为以后的轻量级作物病害识别方法提供了参考。

关键词:病害识别;轻量级网络;注意力机制;多尺度特征

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)10-0176-09

目前,病害依然是作物安全生产过程中的严重威胁。联合国粮食及农业组织统计数据表明,每年全球因病虫害而造成的粮食生产损失高达 20%~40%^[1]。2021 年我国发生粮食重大病虫害与其他一类农作物病虫害土地面积达到 2.35 亿 hm²^[2-3],对农业生产造成重大经济损失。因此,尽早对作物病害进行精确识别对我国农业安全生产与健康发展具有重要意义。

农作物发生病害时,在植物叶片表面会产生颜

色、纹理、形状等方面变化,传统病害识别需要专业技术人员在田间对病害种类进行甄别,这种方法时效性低、主观性高,极易错过病害防治最佳时间。基于图像处理技术的病害识别需要人工进行特征选取、图像分割等大量前期图像预处理工作,人为选定的特征信息也会割裂病害全局信息,造成部分关键特征的信息丢失。而深度学习不需要进行前期冗杂的图像预处理工作,直接采用端到端的方式学习病害高级特征,避免了主观因素的影响。

蒲秀夫等使用 VGG16 网络实现了简单背景下的多种作物病害图像识别,平均准确率为 96.8%^[4];Tang 等在 ShuffleNet 中引入注意力机制,在 PlantVillage 数据集上对多种作物病害识别准确率达到 99.14%^[5];Ni 等结合密集连接思想对 ResNet50 网络进行改进,在 AI Challenger 2018 数据

收稿日期:2022-07-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:62161048)。

作者简介:温钊发(1996—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事计算机视觉研究。E-mail:320203315@xjau.edu.cn。

通信作者:蒲智,博士,副教授,主要从事计算机应用研究。
E-mail:869831699@qq.com。

[14] Shen L Y, Sa R N, Niu J G, et al. Environmental parameters of broiler house with three-overlap cages in winter and autumn[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2017, 9(5): 275-278, 333.
[15] 何川. CFD 基础及应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2018:186.
[16] 董耀宗,潘云霞,关正军. 阶梯笼雏鸡舍热水散热器进风角度 CFD 模拟与效果测试分析[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(2): 73-81.
[17] 林勇,鲍恩财,叶成智,等. 层叠式笼养肉鸭舍冬季环境测试

及通风窗位置优化模拟[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 218-225.
[18] 邓书辉,施正香,李保明,等. 低屋面横向通风牛舍空气流场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 139-146.
[19] 姚家君,郭彬彬,丁为民,等. 基于鹅舍气流场 CFD 模拟的通风系统结构优化与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 214-220.
[20] He X L, Wang J, Guo S R, et al. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 16-25.