

鲍恩财, 林 勇, 赵 伟, 等. 层叠式笼养肉鸭舍秋季最小通风的环境参数测试及分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 648-655.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.017

层叠式笼养肉鸭舍秋季最小通风的环境参数测试及分析

鲍恩财¹, 林 勇¹, 赵 伟², 叶成智², 闫俊书², 宦海琳², 孙雪峰², 邹吉宝³

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所/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; 2. 江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏 南京 210014; 3. 益客集团, 山东 新泰 271200)

摘要: 本研究旨在探讨最小通风模式对层叠笼养肉鸭舍内环境参数的影响。选择秋季肉鸭育肥后期(32~35日龄)进行试验,通过检测鸭舍内温度、湿度、风速、NH₃质量浓度、CO₂质量浓度,构建鸭舍 CFD 模型,模拟并分析温度场与气流场分布特征。结果表明:连续测试 4 d,舍外温度 6.31~26.12℃,舍内气温 15.98~24.85℃;舍外相对湿度 13.74%~91.49%,舍内相对湿度 28.94%~79.68%;舍内风速波动范围 0.30~0.81 m/s,CO₂与 NH₃质量浓度变化范围分别为 1 462~2 798 mg/m³、0.05~0.87 mg/m³。模拟试验鸭舍温度场与气流场,模拟仿真值与实测值间相对误差为 0.8%~1.3%,说明所建 CFD 模型数值模拟与试验数据间高度吻合。每层鸭笼水平剖面温度场与气流场分布模拟结果分别揭示了各层面纵向中部温度均高于两端区域,以及各层中部至风机处气流流速均大于其他区域;此外,南北两侧对称分布通风小窗进入气流形成对冲并汇聚,致使气流分布不均。该研究可为层叠笼养鸭舍结构优化设计与环境调控提供参考。

关键词: 层叠笼养; 肉鸭; 环境参数; 温度; 气流

中图分类号: S817 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0648-08

Mensuration and analysis of environmental parameters in cascading cage-rearing meat duck house with minimum ventilation in the autumn

BAO En-cai¹, LIN Yong¹, ZHAO Wei², YE Cheng-zhi², YAN Jun-shu², HUAN Hai-lin², SUN Xue-feng², ZOU Ji-bao³

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Protected Agriculture Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. Ecolovo, Xintai 271200, China)

Abstract: The study aimed to detect the effects of minimum ventilation mode on the environmental parameters in the cascading cage-rearing meat duck house. During the latter finishing period of meat duck (32-35 d) in the autumn, temperature, humidity, wind speed, CO₂ mass concentration and NH₃ concentration were measured, and CFD model of duck house was conducted to simulate and analyze the distribution pattern of temperature and airflow. The results showed that the outside air temperature was 6.31-26.12℃, and the inside air temperature varied from 15.98℃ to

收稿日期: 2019-10-25

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(18)3015]

作者简介: 鲍恩财(1990-), 男, 安徽合肥人, 博士, 助理研究员, 主要从事设施环境工程研究。(Tel) 17768103527; (E-mail) baencai1990@163.com

通讯作者: 林 勇(1982-), (E-mail) linyong0616@yeah.net

15.98℃ to 24.85℃, and the outside relative humidity was 13.74%-91.49%, the inside relative humidity was 28.94%-79.68%; the wind speed fluctuation range in the house was 0.30-0.81 m/s, the CO₂ and NH₃ mass concentration change range were 1 462-2 798 mg/m³ and 0.05-0.87 mg/m³. The simulation results of the temperature field and airflow field in the duck house showed that the middle temperature of each layer was higher than the two end areas, and the airflow velocity in the middle of each layer to the fan area was greater than other areas; in addition, the symmetrical distribution of ventilation small windows on the north and south sides formed a对冲 and convergence, resulting in uneven airflow distribution. This study can provide reference for the structural optimization design and environmental control of cascading cage-rearing duck house.

24.85℃ during four consecutive days of testing. The relative humidity outside the house was 13.74%–91.49%, and the inside relative humidity was 28.94%–79.68%. The air speed in the house was 0.30–0.81 m/s, and the mass concentrations of CO₂ and NH₃ were 1 462–2 798 mg/m³ and 0.05–0.87 mg/m³, respectively. The relative error between simulated and measured results in temperature and wind speed was 0.8%–1.3%, which indicated the high agreement between the digital simulation of the constructed model and the experimental results. Simulated results along horizontal profile of each tier cage showed that inside air temperature at central region of each layer was higher than that in the forepart and back from longitudinal angle, while airflow velocity from the middle of each layer to the fan was higher than other areas. Furthermore, airflow field was uneven due to incoming airstream which from bilateral symmetry window run into each other and gathered. And this study can provide references for the optimization design and environmental regulation of cascading cage-rearing duck house.

Key words: cascading cage-rearing; meat duck; environmental parameters; temperature; airflow

近年来,为节约养殖用地资源、提升标准化健康养殖水平,养鸭产业围绕层叠笼养新模式进行不断的实践与创新^[1-2]。肉鸭层叠笼养借鉴肉鸡多层立体笼养,多采用三层直立式笼具,每层鸭笼下方均设有自动传送带,并实现喂料、饮水以及环境控制等方面的自动化管理^[3-4]。层叠笼养肉鸭舍采取密闭饲养,设施装备排布密集,人工调控通风方式是管理该集约化养殖环境的最重要手段^[5-6]。若气流不畅则易导致温度分布不均、湿度升高以及空气污浊,严重影响动物的生产性能与健康状况。目前,鸭舍仍缺乏成熟、有效的通风策略可供参考^[6-11]。

计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)可数字化三维稳态模拟畜禽养殖气流场与温度场,是快速评估与优化畜禽舍内环境控制的有效手段^[12-14]。Kic等^[15]通过现场环境参数实测与CFD模拟,获得肉鸡舍夏季与冬季特定通风策略下气流场与温度场分布规律,为鸡舍结构合理设计与环境优化提供了科学依据。姚家君等^[6]采用CFD方法对反季节鹅舍进行气流场模拟与评估分析,提出并验证了梁下添加卷膜可优化舍内气流。目前,围绕特定通风模式下层叠笼养肉鸭舍内各环境参数的变化特性,进行CFD气流场模拟还鲜有报道。

本研究以层叠式笼养肉鸭舍为研究对象,对最小通风模式下鸭舍内温湿度,气流,CO₂及NH₃质量浓度进行分析,运用CFD进行温度与气流组织模拟分析,旨在为层叠式笼养肉鸭舍环境控制设计与通风策略制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试鸭舍

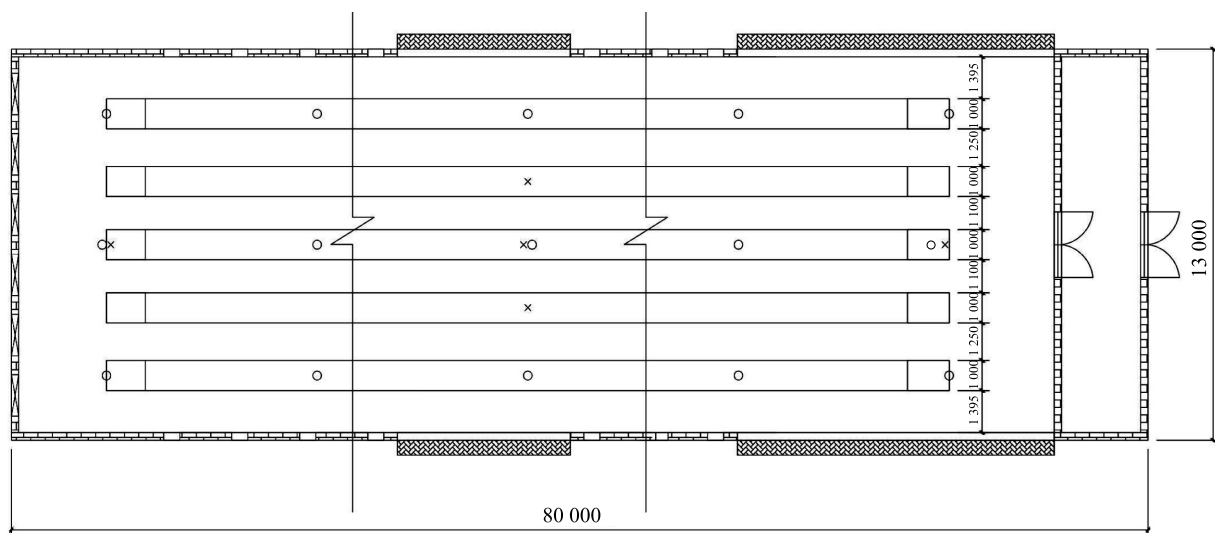
1.1.1 鸭舍结构

试验鸭舍位于山东省新泰市益

客集团生态肉鸭科研基地(35°30'N,117°27'E)。鸭舍坐北朝南,长80.0 m,宽13.0 m,屋脊高4.0 m,檐高2.6 m(图1)。鸭舍上部等距设有11个轻型钢主梁,屋面铺设100 mm厚彩钢聚苯乙烯夹芯板,内侧面喷涂30 mm聚氨酯发泡保温材料。墙体由240 mm空心砖砌筑,内侧抹15 mm厚水泥砂浆。鸭舍西侧设有3.0 m长的仓储室,通过推拉门(高2.30 m×宽2.18 m)与养殖区隔离。鸭舍南北侧墙分别均匀设置24个通风小窗(长560 mm×高360 mm),小窗下边缘距离地面高度为1.94 m。南北侧墙的西段与中段分别安装大(长11.0 m×高1.5 m)、小(长6.0 m×高1.5 m)2种降温湿帘,湿帘凸出外侧墙体500 mm,湿帘下边缘距离地面高度为0.9 m。通风小窗与湿帘风口启闭均通过100 mm厚彩钢聚苯乙烯夹芯板来控制。东山墙安装两排风机,上排2台风机,叶轮直径1.0 m,理论风量为20 000 m³/h;下排6台风机,叶轮直径1.38 m,理论风量为42 000 m³/h(图2)。

1.1.2 养殖设施 如图3所示,鸭舍内设有5列3层式层叠笼具,每列长69.80 m、宽1.00 m、高2.02 m,每层含67个重复鸭笼(长1 000 mm×宽1 000 mm×高400 mm)。育肥中后期,单个鸭笼饲养肉鸭15只。每层鸭笼下方安装粪便收集传送带,鸭笼底部距离传送带高度由上至下依次为260 mm、260 mm与300 mm。鸭舍内共有6个过道,每过道宽度由侧墙至舍内中部依次为1.395 m、1.250 m、1.100 m(南北侧对称)。此外,配备大型行车式自动喂料系统、歪嘴球阀式自动饮水系统,以及全自动水暖锅炉循环加温系统。

1.1.3 通风模式 供试鸭舍采用负压纵向通风,进风口为通风小窗,同时结合企业生产实践与当地气候设计最小通风模式。



“x”表示温湿度测点位置,“o”表示风速、CO₂质量浓度、NH₃质量浓度测点位置。

图 1 试验鸭舍平面图 (mm)

Fig.1 Floor plan of the duck house

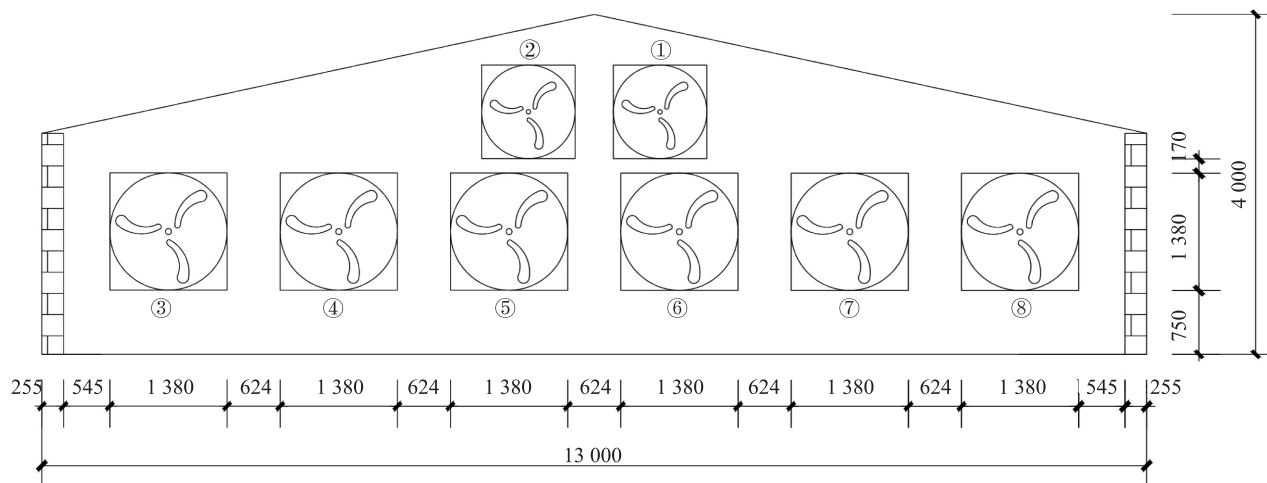


图 2 试验鸭舍东侧端面图 (mm)

Fig.2 Sectional view of east side wall for the duck house

设定秋季鸭舍通风的目标温度为 20.1℃,当舍内温度≤20.1℃时执行最小通风量,即选择 4 号和 7 号 2 台风机间歇式运行:开 150 s,停 150 s,再开 150 s,如此循环往复。

当舍内气温>20.1℃时即切换为 3 号、5 号和 8 号风机间歇式运行,开 50 s,停 250 s,再开 50 s,如此循环往复;温度每升高 0.1℃,3 台风机多运行 25 s,如舍内气温为 20.3℃时,则 3 台风机开 100 s,停 200 s,再开 100 s,如此循环往复。

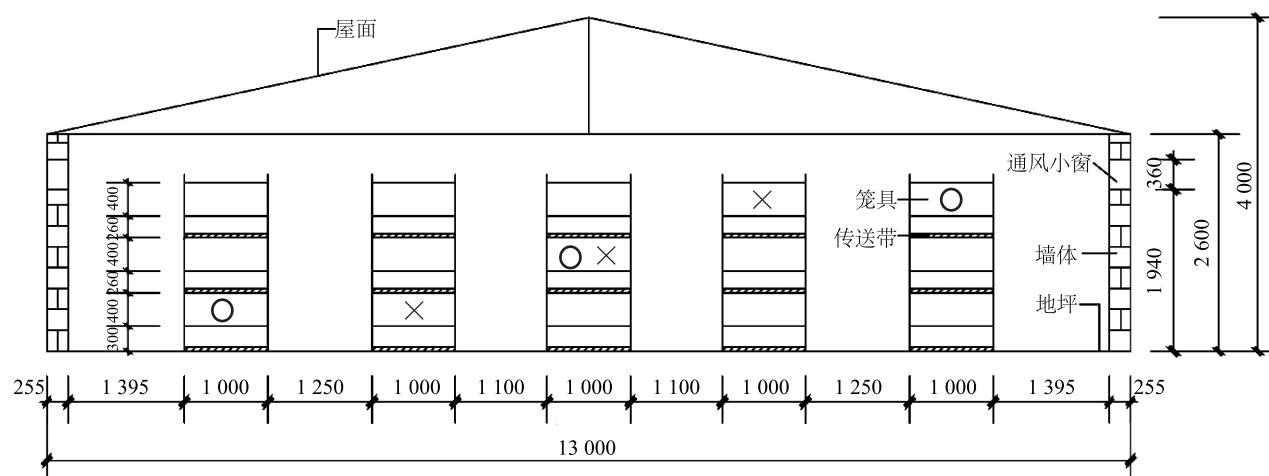
当舍内气温=21.1℃时,则 3 号、5 号和 8 号风机连续运行。

当舍内气温>21.1℃且≤22.1℃,则在 3 号、5 号和 8 号风机连续运行的基础上,打开 1 号或 2 号风机。

当舍内气温>22.1℃,开启 4 台大风机,即 3 号、5 号、6 号和 8 号风机。

1.2 试验设计

选择同批次樱桃谷肉鸭育肥后期(32~35 日龄)进行试验,即 2018 年 10 月 21 日 00:00 至 25 日 00:00。测试期为秋季,未启用加温设备,鸭粪收集传送带每天早晚自动清粪 2 次。温湿度测点共计 5 个,分别为由北向南第二列第三层与第四列第一层



“x”表示温湿度测点位置,“o”表示风速、CO₂与NH₃质量浓度测点位置。

图3 试验鸭舍剖面图(mm)

Fig.3 Structure profile of the duck house

鸭笼中部的2个测点,以及第三列第二层鸭笼起始、正中与末端的3个测点(图1,图3)。采用HOBO UX100-011型温湿度记录仪(美国Onset公司产品)进行测量,温度量程:−20~70℃,精度为±0.2℃;相对湿度量程为:1%~95%,精度为±2.5%。鸭舍外空旷地带架设小型气象站,同步监测温湿度。上述仪器测试时间均设置间隔为10 min。

鸭舍由北向南选择第一列第三层、第三列第二层以及第五列第一层处纵向均布5个点,共计15个点用于监测风速、CO₂质量浓度、NH₃质量浓度(图1,图3)。选用Testo425热敏风速仪(德国Testo公司产品)测量风速,测量范围0~20 m/s,分辨率0.01 m/s。采用MS400-3便携式检测仪(深圳逸云天公司产品)测定CO₂质量浓度、NH₃质量浓度,分辨率均为0.1 mg/m³。上述仪器记录数据的时间均为每天9:00、12:00、15:00、18:00、21:00。

2 结果与分析

2.1 舍内外温湿度

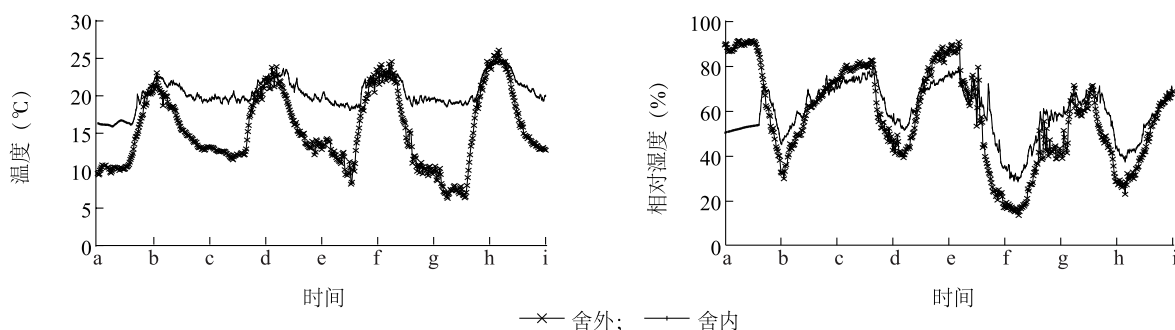
因鸭舍内温湿度测点较多,故采用平均数作图(图4)。如图4a所示,4 d测试期间舍外气温6.31~26.12℃,平均气温15.46℃;舍内气温15.98~24.85℃,平均气温20.37℃。舍内外平均温差4.91℃,最大温差12.72℃。如图4b所示,舍外最低相对湿度13.74%,最高相对湿度91.49%,平均相对湿度57.05%;舍内最低相对湿度28.94%,最

高相对湿度79.68%,平均相对湿度59.72%。舍内相对湿度变化趋势与幅度与舍外基本保持一致。

2.2 舍内风速、CO₂质量浓度、NH₃质量浓度

舍内风速、CO₂质量浓度、NH₃质量浓度测点共有15处,因监测数据较多,采用东西方向同一列采集数据的平均数进行作图,由北向南第一列第三层、第三列第二层以及第五列第一层分别记为N1、N2和N3。如图5a所示,连续4 d平均风速波动范围依次为0.41~0.81 m/s、0.30~0.72 m/s、0.35~0.60 m/s。试验期间,第1 d 9:00 N1平均风速为0.63 m/s,显著高于N2($P<0.05$),其余各组间无显著差异($P>0.05$);第2 d 21:00、第3 d 9:00 N1平均风速最高,且均显著高于N3($P<0.05$),其余各组间无显著差异($P>0.05$)。

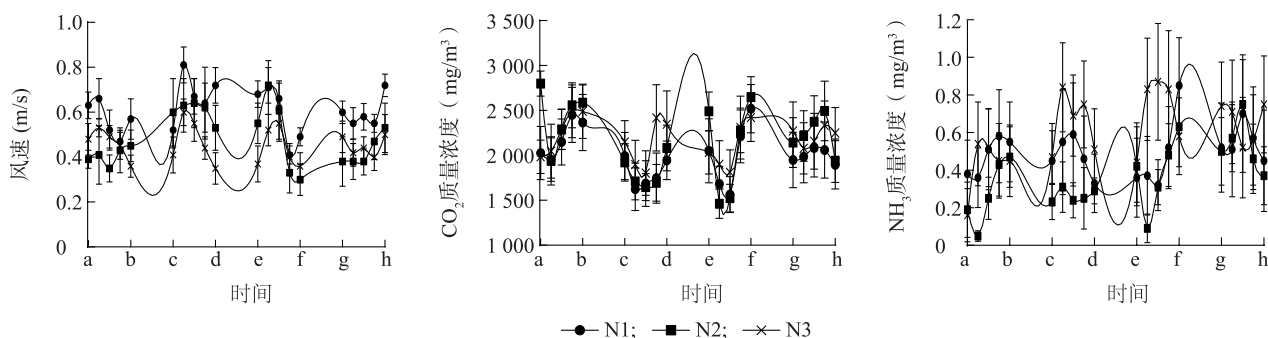
由图5b可知,连续4 d舍内N1、N2、N3 CO₂质量浓度呈现波浪形振荡,约每日12:00时CO₂质量浓度处于或接近低谷,CO₂质量浓度峰值多处于21:00或21:00~9:00,期间N1、N2、N3平均CO₂质量浓度变化范围依次为1 564~2 519 mg/m³、1 462~2 798 mg/m³、1 804~2 491 mg/m³;此外,第1 d 9:00 N2平均CO₂质量浓度显著高于N1和N3($P<0.05$),其余时间段各组间均无显著差异($P>0.05$)。图5c所示,N1、N2与N3 4 d内平均NH₃质量浓度范围分别为0.32~0.85 mg/m³、0.05~0.75 mg/m³、0.16~0.87 mg/m³,且监测期间各组间均无显著差异($P>0.05$)。



a: 10月21日0:00; b: 10月21日12:00; c: 10月22日0:00; d: 10月22日12:00; e: 10月23日0:00; f: 10月23日12:00; g: 10月24日0:00; h: 10月24日12:00; i: 10月25日0:00。

图4 鸭舍内外温、湿度变化

Fig.4 Variations of indoor and outdoor temperature, relative humidity in duck house



a: 10月21日09:00; b: 10月21日21:00; c: 10月22日09:00; d: 10月22日21:00; e: 10月23日09:00; f: 10月23日21:00; g: 10月24日09:00; h: 10月24日21:00。

图5 鸭舍内风速、CO₂质量浓度、NH₃质量浓度的变化

Fig.5 Variations of indoor wind speed, CO₂ mass concentration and NH₃ mass concentration in duck house

2.3 气流场与温度场 CFD 仿真模拟

2.3.1 鸭舍模型建立 为全面展示鸭舍内主要环境参数的分布特征,本研究对温度与风速进行三维数值模拟。该模拟将热空气简化为不可压定常流,流场中气体的流动需遵守质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律以及组分守恒定律^[16]。运用 Unigraphics 软件按实际鸭舍尺寸等比例创建 3D 几何模型,且计算模型考虑通风期间温度与湿度的相对变化。为方便研究,将不开启的湿帘、鸭笼与食槽等结构进行简化处理,忽略其对气流的影响。试验期间肉鸭养殖量巨大,对气流会产生一定的影响,故将每列每层鸭笼、鸭粪传送带分别进行整体处理,以不同的多孔介质形式给出,计算对气体阻碍的影响。

2.3.2 网格划分 如图 6 所示,采用 ICFM-CFD 对鸭舍整体进行网格划分,整个模型网格最大边长设置为 50 mm,对笼具、鸭粪多孔介质域与鸭舍域交界面进行适当的网格加密,加密尺寸为 3 mm,网格膨胀系数为 1.4,整体模型单元数为 6 389 884。

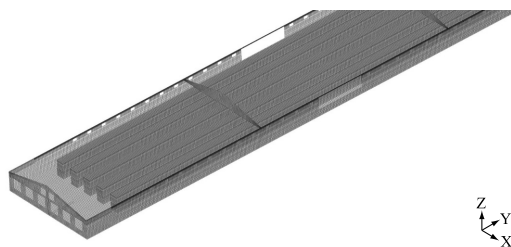


图6 鸭舍整体网格划分图

Fig.6 Mesh map of duck house

2.3.3 边界条件 根据热工学理论基础,舍内空气满足以下气体状态方程:

$$P = \rho RT \quad (1)$$

式中: P 为流体压力; R 为摩尔气体常数,空气取值 287.06; T 为流体温度。由该公式可知,常温条件下空气密度变化极小,故采用 idea-gas 对鸭舍内空气进行处理,并作为常物性对待,不考虑空气温度、黏度等随压力的变化。

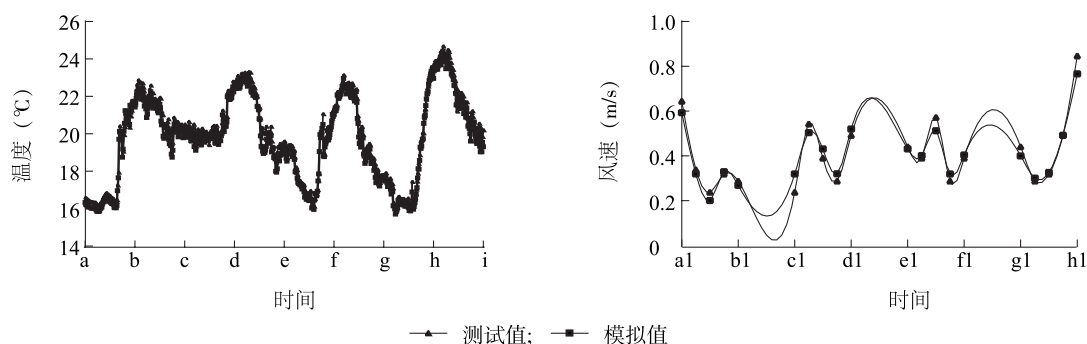
采用马赫尔数来判别流体是否为压缩流体,如下式所示:

$$M = \frac{u}{c} = \frac{u}{\sqrt{kRT}} \quad (2)$$

将本试验鸭舍内风速代入式中,得出 $M < 0.3$,因此将舍内气体归类为不可压缩流体。

此外,本试验鸭舍 CFD 模型采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

2.3.4 CFD 模型验证 为验证建立的鸭舍仿真模型计算的正确性,将仿真模拟值与实测值进行比对,结果如图 7 所示:室内温度、风速模拟仿真值与实测值的变化趋势一致,平均相对误差分别为 0.8% 与 1.3%,表明数值模拟与现场实测有较好的吻合度。



a:10月21日0:00;b:10月21日12:00;c:10月22日0:00;d:10月22日12:00;e:10月23日0:00;f:10月23日12:00;g:10月24日0:00;h:10月24日12:00;i:10月25日0:00。a1:10月21日09:00;b1:10月21日21:00;c1:10月22日09:00;d1:10月22日21:00;e1:10月23日09:00;f1:10月23日21:00;g1:10月24日09:00;h1:10月24日21:00。

图7 温度、风速实测值与模拟值比较

Fig.7 Comparison of measured temperature or wind speed values with simulated results

2.3.5 鸭舍温度分布 CFD 模拟 针对试验鸭舍内每层鸭笼,本研究模拟出相应高度的水平剖面温度分布图。如图 8 所示,沿通风方向舍内各层面中部温度高于两端区域,尤其第1~2层中部至风机口,温度呈现总体下降趋势,且鸭笼处温度总体高于过道。

2.3.6 鸭舍风速分布 CFD 模拟 图 9 显示了本试验鸭舍内每层鸭笼对应的水平剖面气流分布图。鸭舍内纵向气流呈现不均匀特性,每层中部至风机口处的气流流速均大于其他区域,鸭舍中部呈现明显的阻滞;此外,舍内第三层通过南北两侧的通风小窗进入的气流呈现对冲效应,且舍内纵向中间风速高于两侧。

3 讨论

随着现代养禽业集约化程度的提高,环境因素影响动物生长与健康愈发显著^[17-20]。本研究围绕最小通风模式对秋季立体笼养鸭舍内环境质量影响进行研究。结合生产实践与研究报道,育成期肉禽的最适生长温度为18~24℃,理想相对湿度为60%~70%^[3,17]。本研究测试期间,鸭舍内平均温度为15.98~24.85℃,基本与最适温度范围相符,且舍内温度波动幅度小于舍外环境,说明鸭舍密闭效果

较好;但舍内相对湿度为28.94%~79.68%,相对湿度长期过低(<40%)或过高(>75%)易影响舍内空气质量,同时对家禽生长性能、抗氧化能力与免疫功能产生不利的影响,因此养鸭过程中需采取一定的保湿或除湿措施来调节舍内湿度水平^[17,21]。下一步将研究恒温恒湿技术在层叠式笼养肉鸭舍的应用,提高鸭舍内环境温湿度调控水平。

通常增大风速可进一步排除舍内污浊空气。本研究中鸭舍采取侧小窗进风、纵向通风的模式,并结合舍内气温实施最小通风模式,试验期间鸭舍内风速波动范围0.30~0.81 m/s。吴艳等在四层层叠式笼养鸭舍环境参数研究中开启12~14台风机,平均风速波动范围0.33~2.77 m/s,通风策略不同应该是其风速与本研究有差异的主要原因^[2]。CO₂主要源于肉鸭呼吸与粪便的释放,是反应舍内空气新鲜程度的重要指标,通常与舍内风速呈显著负相关,且相关研究推荐传送带清粪式禽舍内 CO₂ 质量浓度控制上限为5 000 mg/m³^[22-23]。本研究鸭舍测试期间 CO₂ 平均质量浓度变化范围为1 462~2 798 mg/m³,尚处在合理范围内,且呈现中午低晚上高的波浪形振荡,应与夜晚温度较低而开启最小通风有关。此外,测试期间 NH₃ 质量浓度在0.05~0.87 mg/m³内波动,日常清粪

结合有效通风可有效降低 NH_3 质量浓度^[24]。

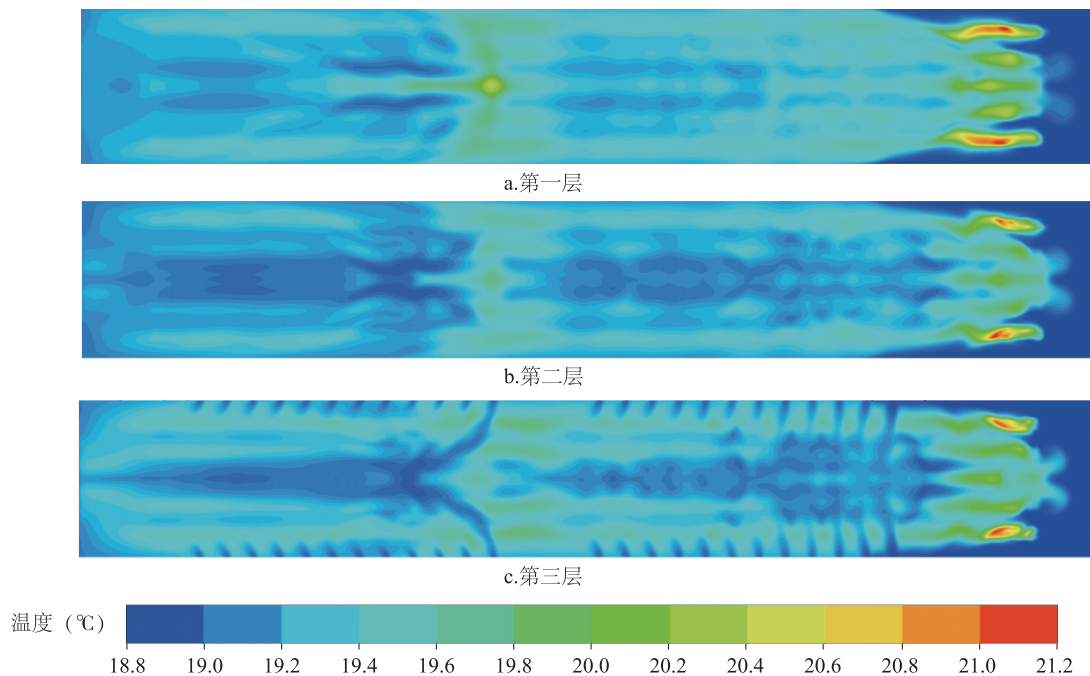


图 8 鸭舍内各层鸭笼水平剖面温度分布图

Fig.8 Contours of temperature along horizontal profile of each tier cage in duck house

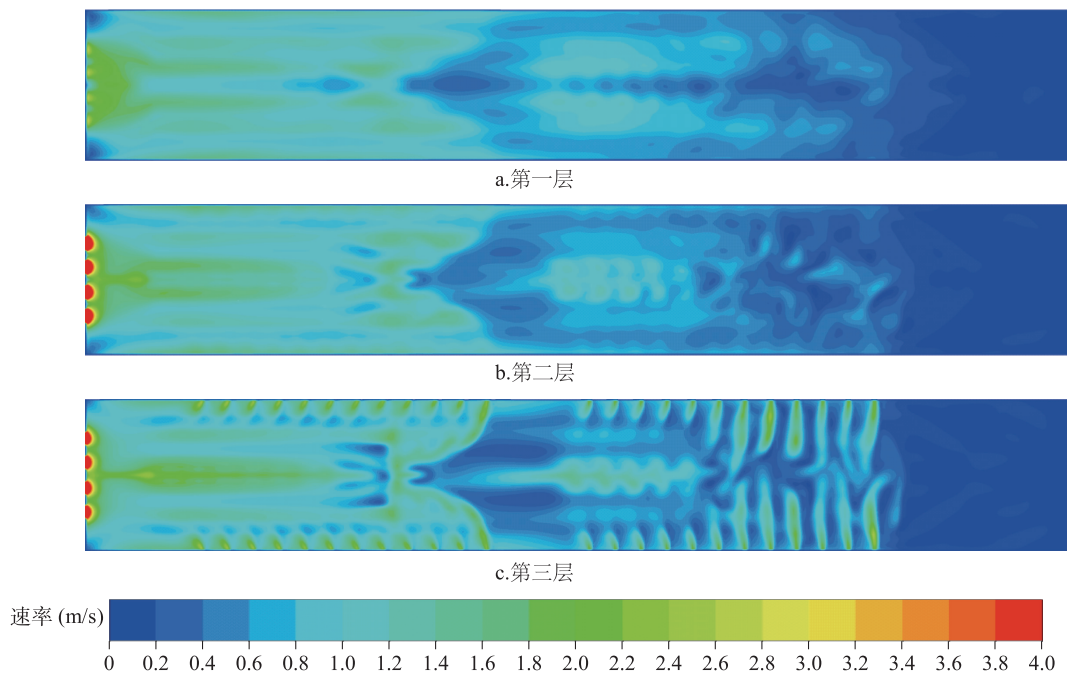


图 9 鸭舍内各层鸭笼水平剖面气流分布图

Fig.9 Contours of velocity magnitude along horizontal profile of each tier cage in duck house

本研究采用 CFD 对试验鸭舍进行温度与风速三维数值模拟,进一步深入分析舍内温度与气流的分布特性。试验期间,舍内各层面纵向中部的温度

高于两端区域,分布较为不均,多层立体笼具导致气流阻滞应是造成肉鸭所产热量在鸭舍中部汇聚的原因,这在气流分布图中也得到一定的验证。此外,鸭

舍内第三层南北两侧通风小窗因对称分布导致进入气流发生对冲,进而汇聚并致使中间气流流速高于两侧。因此,可考虑通过调整通风小窗位置、立体笼具层高等措施来进一步优化鸭舍内气流的循环流通,并维持温度与气流分布更加均匀。

参考文献:

- [1] 侯水生. 2018 年度水禽产业发展现状、未来发展趋势与建议[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(3): 124-128.
- [2] 吴 艳, 皮劲松, 李成凤, 等. 夏季四层层叠式笼养鸭舍环境参数测定与分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(11): 32-36.
- [3] 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.
- [4] 王树才, 王玉泉, 李振强. 提高鸭蛋清洁度的层叠式笼养蛋鸭笼底网的优化设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 211-217.
- [5] 景文渊, 袁 军, 乔 克, 等. 猪舍在不同开窗方式下的气流场模拟研究[J]. 西南师范大学学报, 2016, 41(12): 68-73.
- [6] 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.
- [7] SHEN D, WU S, DAI P Y, et al. Distribution of particulate matter and ammonia and physicochemical properties of fine particulate matter in a layer house [J]. Poultry Science, 2018, 97(12): 4137-4149.
- [8] ZHAO Y, SHEPHERD T A, LI H, et al. Environmental assessment of three egg production systems Part I: Monitoring system and indoor air quality[J]. Poultry Science, 2015, 94(3): 518-533.
- [9] ZHAO Y, ZHAO D, MA H, et al. Environmental assessment of three egg production systems Part III: Airborne bacteria concentrations and emissions[J]. Poultry Science, 2016, 95(7): 1473-1481.
- [10] 李俊营, 詹 凯, 唐建宏, 等. 六层层叠式笼养鸡舍夏季环境质量测定与分析[J]. 上海农业学报, 2017, 33(1): 120-124.
- [11] 郑树利, 徐友伟, 郭 铃. 高密度蛋鸡舍最小通风温度场分析[J]. 中国家禽, 2018, 40(20): 42-46.
- [12] PAWAR S R, CIMBALA J M, WHEELER E F, et al. Analysis of poultry house ventilation using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1373-1382.
- [13] KIM K S, YOON J Y, KWON H J, et al. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 245-255.
- [14] MOSTAFA E, LEE I B, SONG S H, et al. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(4): 293-303.
- [15] KIC P, ZAJICEK M. A numerical CFD method for the broiler house ventilation analysis[J]. Journal of Information Technology in Agriculture, 2011, 4(1): 1-7.
- [16] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-11.
- [17] 孙永波, 王 亚, 萨仁娜, 等. 不同湿度对肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(24): 4720-4728.
- [18] 于 群, 柳平增, 李宝全, 等. 基于 MSP430 的禽舍智能控制系统设计及应用[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 236-240.
- [19] 刘烨虹, 刘修林, 侯若羿, 等. 基于 WSN 的蛋鸡活动量监测系统[J]. 南方农业学报, 2018, 49(7): 1453-1459.
- [20] 孟祥海, 况 辉, 周海川. 环保新政与畜禽规模养殖绿色化转型[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 343-346.
- [21] 周 莹, 彭骞骞, 张敏红, 等. 相对湿度对间歇性偏热环境下肉鸡体温、酸碱平衡及生产性能的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(12): 3726-3735.
- [22] 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.
- [23] 沈 丹, 戴鹏远, 吴 胜, 等. 冬季封闭式肉种鸡舍空气颗粒物、氨气和二氧化碳分布特点及 PM_{2.5} 理化特性分析[J]. 畜牧兽医学报, 2018, 49(6): 1178-1193.
- [24] 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 American Society of Agricultural Engineers, 2005, 48(5): 1927-1941.

(责任编辑:陈海霞)