



段巧敏, 孙禹枫, 张海亮, 杨桐桐, 王泽, 李俊哲, 李籽林, 肖卫明, 王雅春. 喷淋装置对南方地区自然通风奶牛舍热环境改善效果的数值模拟研究[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(02): 139-150.

DUAN Qiaomin, SUN Yufeng, ZHANG Hailiang, YANG Tongtong, WANG Ze, LI Junzhe, LI Zilin, XIAO Weiming, WANG Yachun. Study on the improvement effect of spray device on the thermal environment of naturally ventilated dairy barn in southern China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02): 139-150.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.13

喷淋装置对南方地区自然通风奶牛舍热环境改善效果的数值模拟研究

段巧敏¹ 孙禹枫¹ 张海亮¹ 杨桐桐¹ 王泽¹ 李俊哲¹ 李籽林¹
肖卫明² 王雅春^{1*}

(1. 中国农业大学 动物科学技术学院, 北京 100193;

2. 浙江一鸣食品股份有限公司 浙江省奶牛遗传改良与乳品质研究重点实验室, 浙江 温州 325000)

摘 要 本研究针对我国南方地区夏季自然通风牛舍内奶牛热应激严重的问题, 利用现场实测和计算流体力学(CFD)的研究方法, 对南方地区某自然通风奶牛舍3种不同外界风向、风速、温度和湿度条件下, 加入喷淋装置前后, 舍内的风速场、THI场进行对比分析。结果表明: 1) 温度场各个测点的相对误差范围为0.04%~1.36%, 平均相对误差0.43%。相对湿度场各个测点的相对误差范围为0~7.43%, 平均相对误差2.22%。剔除异常值后, 气流场各个测点的相对误差范围为0.05%~83.68%, 平均相对误差38.44%。2) 数值模拟表明, 高风速区主要集中在饲喂走道、牛舍边缘部分, 风速为1.4~3.0 m/s, 低风速区主要集中在牛舍东侧奶牛活动区域, 将近一半奶牛身体附近风速低于0.4 m/s。不同风向对于牛舍边缘的影响程度不同, 东北风与南风情况下牛舍东部出现高风速区, 西北风情况下牛舍边缘气流场比较均匀。3) 加入喷淋装置后, 外界气候不同会导致喷淋造成的效果不同, 当温湿度适中风速相对较小, 喷淋装置的加入会使温湿度指数上升0.23, 差异显著($P < 0.05$), 加剧奶牛热应激; 当风速较大, 高温低湿时, 喷淋装置的加入会使温湿度指数下降0.97, 差异显著($P < 0.05$); 当风速较大低温高湿时, 喷淋装置的加入会使温湿度指数下降0.19, 差异不显著($P > 0.05$)。综上, 本研究模拟了在3种不同外界环境下喷淋装置的加入对于牛舍热环境的改变和舍内奶牛热应激的改善情况, 可为自然通风奶牛舍设计及舍内热环境调控提供依据。

关键词 CFD; 自然通风; 奶牛舍; 喷淋装置; 温湿度指数

中图分类号 S823.4

文章编号 1007-4333(2025)02-0139-12

文献标志码 A

Study on the improvement effect of spray device on the thermal environment of naturally ventilated dairy barn in southern China

DUAN Qiaomin¹, SUN Yufeng¹, ZHANG Hailiang¹, YANG Tongtong¹, WANG Ze¹,
LI Junzhe¹, LI Zilin¹, XIAO Weiming², WANG Yachun^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory of Dairy Cow Genetic Improvement and Milk Quality Research of Zhejiang Province, Zhejiang Yiming Food Co., Ltd. Wenzhou 325000, China)

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-36); 长江学者和创新团队发展计划(IRT_15R62)

第一作者: 段巧敏(ORCID:0009-0005-8822-8388), 本科生, E-mail: 2481861855@qq.com

通讯作者: 王雅春(ORCID:0000-0003-3629-2802), 教授, 主要从事分子数量遗传学研究, E-mail: wangyachun@cau.edu.cn

Abstract The study focuses on the severe heat stress of dairy cows in natural ventilation cowshed in summer in southern China. Using on-site measurements and computational fluid dynamics (CFD) research methods, a comparative analysis was conducted on the the wind speed field and THI field in a natural ventilation cowshed before and after the addition of the spray device under three different external wind directions, wind speeds, temperature and humidity conditions in a natural ventilation cowshed in southern China. The results showed that: 1) The relative error range of each measuring point in the temperature field was 0.04% - 1.36%, with an average relative error of 0.43%. The relative error range of each measuring point in the relative humidity field was 0.00 - 7.43%, with an average relative error was 2.22%. After removing the abnormal values, the relative error range of each measuring point in the air flow field was 0.05% - 83.68%, with an average relative error of 38.44%. 2) Numerical simulation showed that the high wind speed area was mainly concentrated in the feeding aisle and the edge of the cowshed, ranging from 1.4 to 3.0 m/s. The low wind speed area was mainly concentrated in the cow activity area on the east side of the cowshed, with nearly half of the cows having wind speed below 0.4 m/s. The influence of different wind directions on the edge of the cowshed was different. Under northeast and south wind conditions, there was a high wind speed area in the east of the cowshed, while under northwest wind conditions, the airflow field at the edge of the cowshed was relatively uniform. 3) After adding a sprinkler system, different external climates can lead to different effects of spraying. When the temperature and humidity were moderate and the wind speed was relatively small, the addition of the spray device will increase the temperature and humidity index by 0.23, which was significant ($P < 0.05$) and exacerbates the heat stress of dairy cows. When the wind speed was high, high temperature and low humidity, the addition of the spray device will decrease the temperature and humidity index by 0.97, and the difference was significant ($P < 0.05$). When the wind speed was high, low temperature and high humidity, the addition of the spray device will decrease the temperature and humidity index by 0.19, and the difference was not significant ($P > 0.05$). In summary, this study simulated the changes in the thermal environment of the cow house and the improvement of the heat stress of the cows in the house by adding the spray device in three different external environments. The results can provide a basis for the design of naturally ventilated dairy cowshed and the regulation of the thermal environment in the dairy cowshed.

Keywords CFD; natural ventilation; dairy cowshed; spraying device; temperature and humidity index

随着现代养殖业的发展,养殖环境越来越受到人们的重视。对于奶牛养殖来说,牛舍热环境无法忽视^[1],奶牛正常体温为38.5~39.3℃^[2],适宜生存环境为5~25℃^[3]。研究表明,环境温度高于适宜温度,奶牛就会产生热应激,热应激是动物机体受到环境高温刺激所产生的一系列非特异性应答反应的总和^[4]。荷斯坦牛是耐寒不耐热的家畜^[5]。Manos^[6]于1959年建立了同于评估奶牛热应激程度的环境温湿度指数(Temperature-humidity index, THI),当THI>72时,就会产生热应激^[7],导致奶牛产奶量、乳蛋白率、乳脂肪率、免疫力、繁殖力下降和新陈代谢紊乱等情况发生^[8-10],进而导致经济效益降低。

计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)是一门运用流体动力学的基本原理,通过建立数学物理模型,设定合理的边界条件和参数,对区域内气流的速度场、温度场、压力场等进行模拟计算的

一门学科^[11]。目前CFD已广泛应用于畜舍环境的模拟研究^[12-14]。一些学者进行了CFD模拟,从而得到了现实养殖环境的一些问题,如Cunha等^[15]对巴西某负压通风家禽养殖场进行CFD模拟,研究指出鸡舍内的空气分布不均匀,环境变量难以达到成年鸡热舒适的推荐范围。但是Cunha的模型中并未加入动物模型,因此对于畜舍的气流模拟可能存在误差;Bjerg等^[16]应用数值模拟方法首次预测了在畜舍中动物和猪栏对气流的影响,研究表明动物的存在会减小气流速度,这证实了动物对于模拟结果有影响。Tong等^[17]应用CFD技术模拟隧道式通风蛋鸡舍的空气速度、空气温度、湿度和热应力指数,其模型中的蛋鸡简化为多孔介质,并引入温度、湿度等条件,通过模拟值与实测值结合验证,四季的风速和温度有较高吻合度,夏季湿度有较高吻合度,但是秋季冬季吻合度不佳,为商业蛋鸡舍设计评估通风方式提供了有效的工

具。针对动物模型的改进,邓书辉等^[18]对低屋面横向通风牛舍内温湿分布进行了三维数值模拟并将等比例动物模型引入,简化了牛体细小部位,节约了计算资源,将体表设置为壁面,且将牛口设置为质量入口,改进了模型,模拟后并与实测数据结合检验,达到了高度吻合。但是由于计算奶牛产热量具有误差,对试验结果产生了一定影响,陈昭辉等^[19]通过CFD发现纵向通风系统肉牛舍湿帘端和风机端存在温差,并为湿帘风机系统密闭牛舍优化提供依据。

目前的研究大多针对密闭畜禽舍,对于自然通风牛舍的气流场、温度场、相对湿度场模拟较少,试验牛舍无喷淋装置,而大多数自然通风牛舍采用喷淋-风扇降温系统以减少奶牛的热应激^[20],且对于南方地区不同外界环境下自然通风牛舍内喷淋-风扇系统的降温效果研究较少^[21]。本研究采用CFD技术对浙江省某奶牛舍热环境进行模拟,通过实测数据验证后模拟该舍在热应激期间采用喷淋系统的热环境,为自然通风牛舍设计和舍内环境调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验牛舍

试验牛舍位于浙江省温州市(27.40°N,120.02°

E)的某规模化奶牛场,该地区气候类型为亚热带季风气候^[22],夏季平均气温为25.5℃,平均相对湿度为80%RH,平均风速为2.16 m/s。

牧场总体建筑布局与牛舍内部情况如图1(a)、(b)所示,牛舍为开放式牛舍,整体为东西走向,屋顶为双坡彩钢板屋面,长66 m,宽60 m,檐口高5 m,屋顶坡度1:14.8。牛舍采用轻型钢建筑结构,在牛舍卧床正中央和牛采食通道两侧高2.7 m处分别安装规格不同的风扇,其中牛舍卧床上方间隔12.3 m安装风扇,每排4个,共16个,牛舍采食通道间隔4.6 m安装风扇,每排10个,共40个。测量时间内风扇全天开启。两款风扇参数如表1所示。牛舍内工艺布局采用“2条饲喂走道+6列头对头卧床+4列颈夹+8条清粪通道”的工艺模式。试验时间内牛舍存栏量约为180头。

内外温湿度测量选用工业级数显风速仪(PM6252B),该仪器湿度量程为20%~80%,精度为±3%,温度量程为-20~60℃,精度为±1.5℃,风速量程为0.80~30.0 m/s,精度为±(2.0% reading+50),红外照片拍摄选用手持热像仪(IRS65),该仪器温度量程为-20~350℃,精度为±2%。

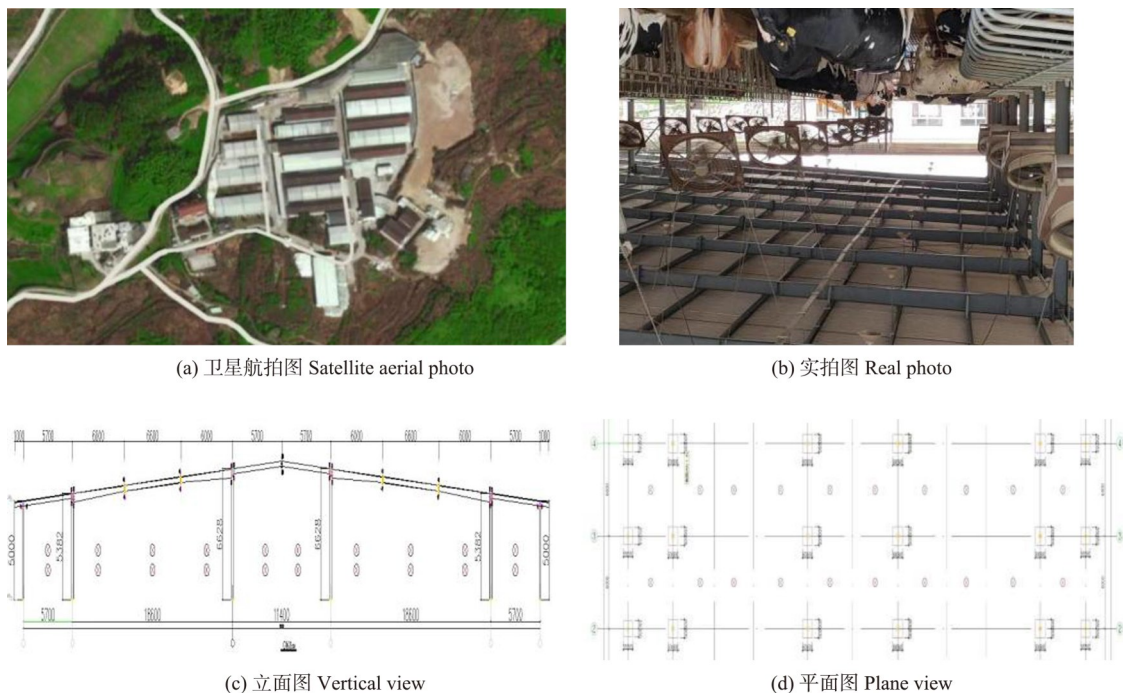


图1 试验牛舍与测点布置图

Fig. 1 Experimental dairy cowshed and measuring point layout diagram

表1 风扇参数
Table 1 Fan parameters

风扇位置 Fan position	风叶直径/mm Wind blade diameter	转速/(r/min) Revolution speed	风量/(m ³ /h) Wind rate	倾斜角度/(°) Bevel angle
奶牛卧床上方 Above the dairy bed	1 830	330	≥93 000	30
采食通道两侧 Both sides of the feeding channel	1 000	700	21 000	60

共41个测点,一个位于舍外距离牛舍3 m处的开阔地带,舍内共40个测点分别位于 $h=1.5$ 和2.5 m高度处,遍布牛舍过道、奶牛躺卧、奶牛站立采食等位置,自南向北、自东向西、自上而下测点编号为1~40,测点布置如图1(c)和(d)所示。

温度、相对湿度、风速测定:第一阶段测定时间为2023-08-02 14:00到2023-08-05 13:00,测定间隔为1 h。第二阶段测定时间为2023-08-06到2023-08-12,每天中午14点测定,测定间隔为24 h。第一阶段测定数据获得连续时间内温湿度变化情况,确定热应激最严重的时间段,第二阶段测定数据用于参数设置、模型检验和更加准确了解当地气候条件。

牛舍、奶牛体表温度测定:将前期测定数据与气象站数据结合,证明8月12日气候条件有代表性。因此试验成员于2023-08-12使用手持红外热成像仪对于牛舍过道、屋顶、栏杆、地面、卧床、奶牛体表等位置的表面温度进行拍照测定。

1.2 几何模型及网格划分

本试验牛舍几何模型与实体建筑等比例创建,牛舍3D模型和流体域模型如图2(a)和(b)所示, X 轴方向为北, Z 轴方向为东。 Y 轴正方向为高度。以牛舍 Z 方向0 m, X 方向66 m, Y 方向0 m为坐标原点,由于牛舍为开放式牛舍,因此在建模时考虑到周围建筑对于牛舍内部热环境和气流场的影响,需要对牛舍周围环境进行建模,但是为了节省计算

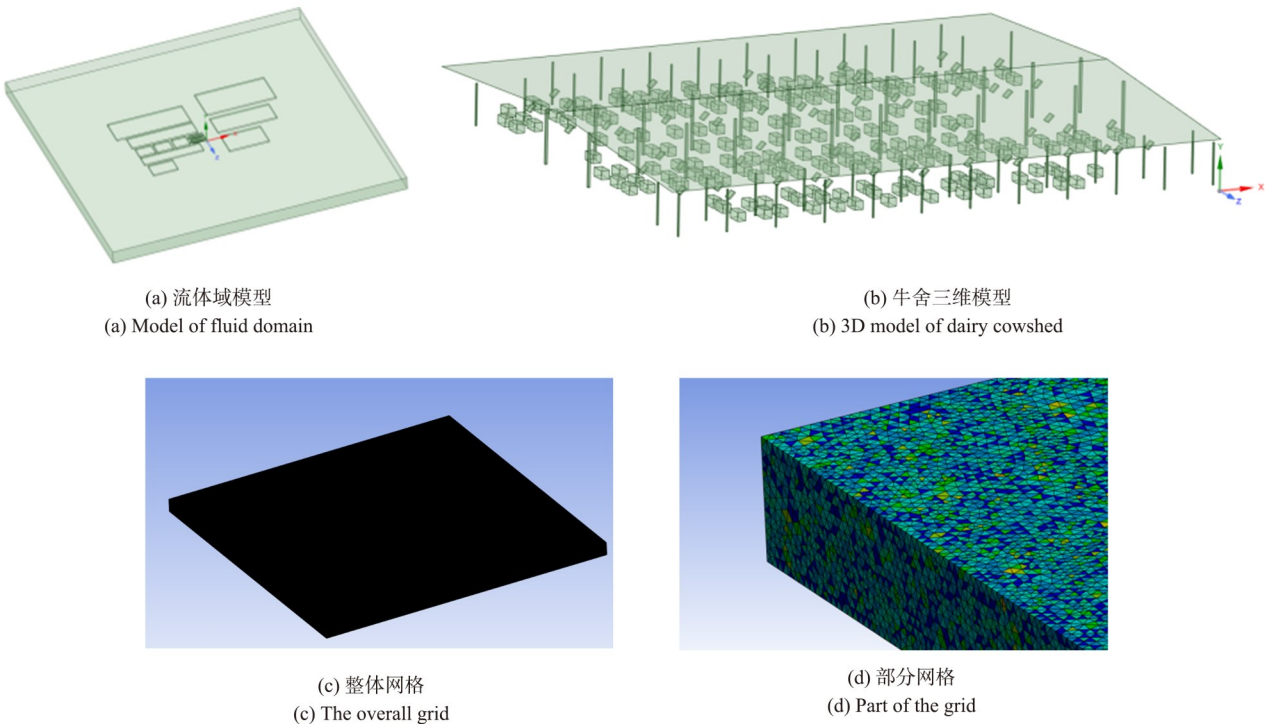


图2 牛舍模型及网格划分
Fig. 2 Cowshed model and grid division

机资源,增加运算速度,将其他建筑简化成为长方体,同时简化牛舍内部结构,忽略这些结构对于牛舍内气流和传热的影响。

由于奶牛会对整个流体域的气流和传热产生影响,因此在建模时将奶牛加入到计算模型之中,考虑到奶牛形状不规则会在划分网格时出现大量不合理的网格,导致运算速度下降,所以本研究将奶牛简化成了长方体,长方体尺寸与奶牛实际体型等比例,且奶牛数量与存栏数量大致

相符。

模拟时,网格采用非结构化四面体网格,在气流进出口处对网格进行加密处理,以确保气流场的精确模拟。经过网格无关性检测,网格单元数量为 6 277 490 个。

1.3 材料定义

通过查阅资料和计算^[23],对模型中涉及到的材料密度、导热系数、比热进行了定义,具体参数如表 2 所示。

表 2 牛舍内材料的热物性参数
Table 2 Thermal physical parameters of cowshed materials

项目 Item	密度/(kg/m ³) Density	比热/(J/(kg·℃)) Specific heat	热导率/(W/(m·K)) Thermal conductivity
奶牛 Dairy	1 100	3 500	0.5
彩钢 Color steel	7 850	550	0.041
混凝土 Concrete	2 392	970	1.28

1.4 流体域与边界条件

流场中气体的流动要遵循质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律等物理定律^[24]。风机出口设置为压力出口,根据现场实测值将风机风速设定为 4.5 m/s。流场中其他壁面与牛体均设置为无滑移的墙面边界,热力学边界设置为温度边界条件,根据红外热像仪测定的数据,将计算出的平均温度作为壁面边界的温度值。对于牛只表面温度设定,牛嘴为入口,其温度设定参照多张红外图片取平均值,为 26.85℃。牛体作为壁面,温度边界条件为牛眼、牛

腹、牛背温度取平均值,具体参数设置如表 3 所示。

1.5 工况设置

本试验模拟了不同外界热环境下牛舍内的风速以及 THI,工况设置参照浙江省温州市泰顺县 2023-05-27 到 2023-09-05 气象站所获气象数据以及 2023-08-12 实测数据。文中将>26℃定义为高温状态,RH>60%定义为高湿状态^[25]。喷淋装置安装在颈夹上方,距离地面 2.2 m 处,出水方向与地面成 90°,模拟中持续开启,水温为 23℃,流量为 2.85 L/min。具体工况设置如表 4 所示。

表 3 流体域内壁面温度边界条件
Table 3 Temperature boundary conditions of inner wall surface in fluid domain

部位 Position	温度/℃ Temperature
奶牛 Dairy	28.8
地面 Floor	24.2
屋顶 Roof	29.5

表 4 不同外界环境下模型工况设置

Table 4 The setting of model working conditions under different external environments

工况 Operating mode	风向/(°) Wind direction	风速/(m/s) Wind speed	温度/℃ Temperature	相对湿度/% Relative humidity (RH)	喷淋情况 Spray condition
工况一 Working condition 1	306	2.2	28.8	68	无
工况二 Working condition 2	306	2.2	28.8	68	有
工况三 Working condition 3	158	3.6	35.6	36	无
工况四 Working condition 4	158	3.6	35.6	36	有
工况五 Working condition 5	46	2.8	22.7	100	无
工况六 Working condition 6	46	2.8	22.7	100	有

2 结果与分析

2.1 实测结果

热成像拍摄图片如图 3 所示,使用 RDIRs 软件进行各个位置温度测量,可知当外界环境为

28.8℃,湿度为 68% 时,奶牛背部温度为 29.2℃,牛眼为 35.0℃,牛颈部为 29.9℃;牛舍屋顶为 28.5℃,地面为 24.2℃;牛舍内其他结构如立柱为 25.3℃,风扇外沿为 28.4℃。热成像图片提供的数据用于模型边界条件设置。

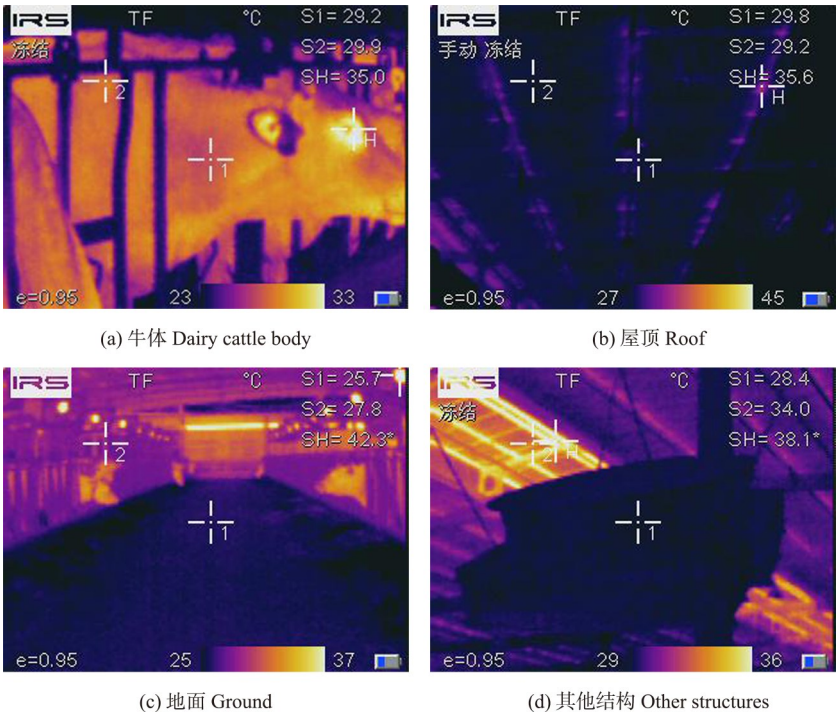


图 3 8 月 12 日热红外仪拍摄的热成像图

Fig.3 Thermal imaging taken by a thermal infrared instrument on August 12

图 4 为本研究选取的 41 个测点的温度、相对湿度和温湿度指数随时间变化的数据线图。图中 Y 轴为温

度、湿度、温湿度指数数值,Z 轴为测点编号,X 轴为测定时间。目前 TH 被畜牧工作者广泛应用于牛^[26]。

THI按下式计算:

$$THI = 0.81T + (0.99T - 14.37) \times RH + 46.3 \quad (1)$$

式中: THI是综合温度和湿度来评价炎热程度的指标; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; RH为相对湿度, %。

如图4所示, 各个测点变化规律大致相同。在测量的72 h中, 牛舍温度呈现正弦曲线式变化, 其中气温最高点出现在12时到14时(测点49: 32.7°C), 气温最

低点出现在4时到5时(舍外: 23.4°C)。牛舍湿度也呈现正弦曲线形变化, 且与温度呈负相关。其中湿度最高点出现在3时到5时(测点6: 76.3%), 湿度最低点出现在12时到13时(测点20: 44.3%)。THI随时间变化的数据线图与温度趋势基本相同。其中THI最高点出现在12时到15时(舍测点40: 72.0), THI最低点出现在5时到6时(舍外: 82.0)。

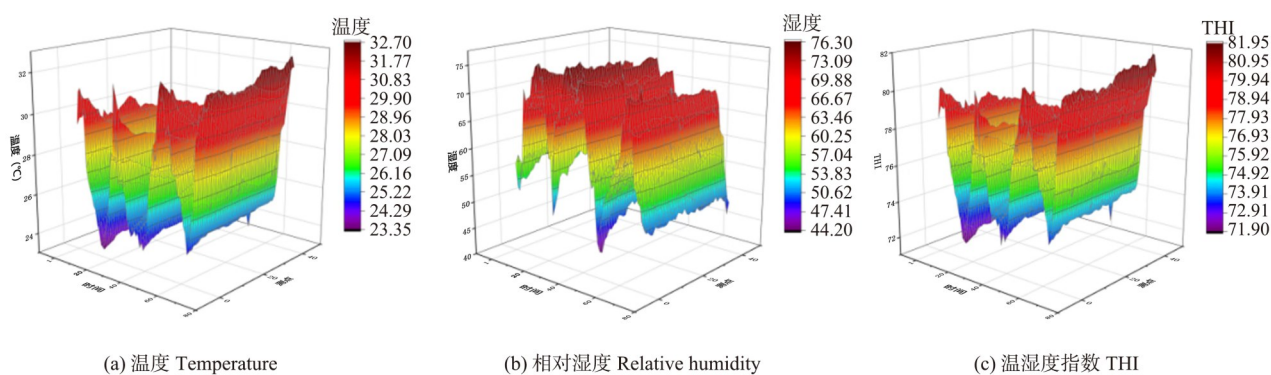


图4 各测点实测值随时间变化图像

Fig. 4 Image of the measured values of each measuring point changing over time

2.2 模拟验证

气流场、温度场和相对湿度场均采用平均相

对误差作为模拟值精确度的衡量指标, 图5为本试验各测定点实测值与模拟值的比较。通过分析温

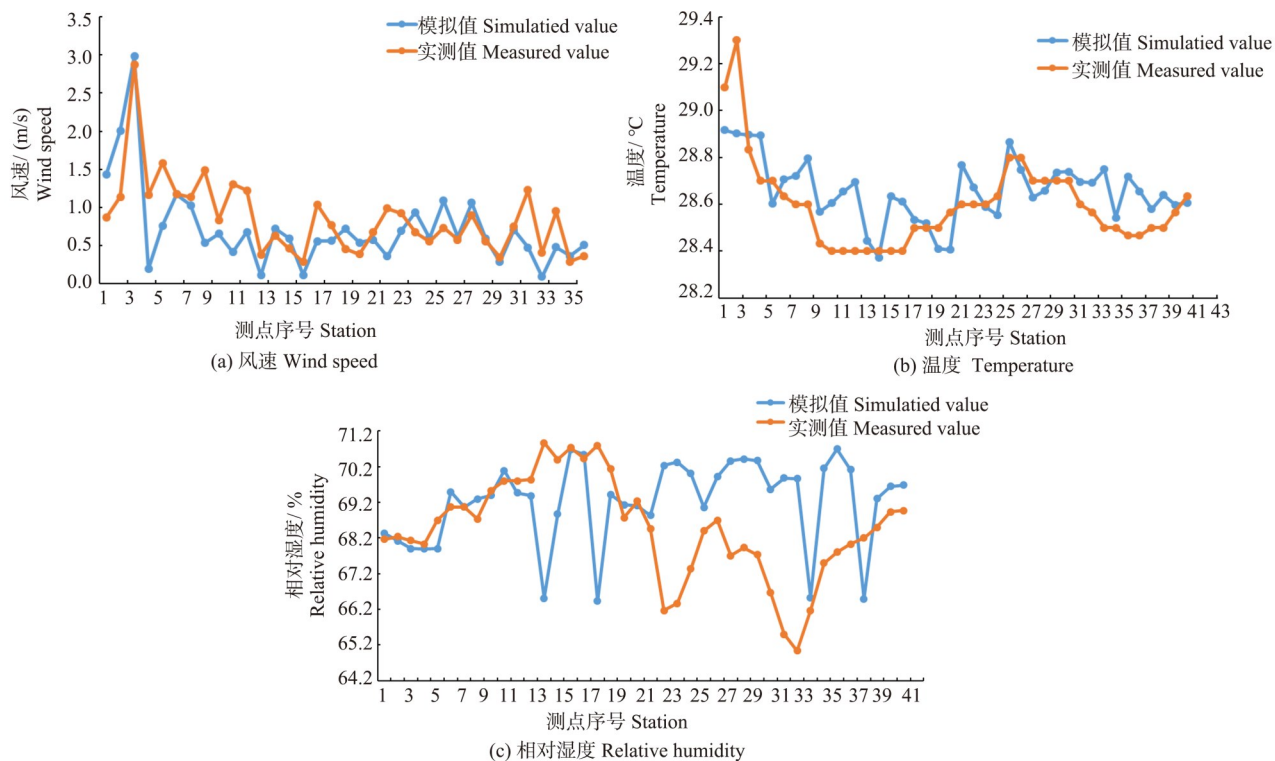


图5 各测点风速、温度、相对湿度模拟值与实测值

Fig. 5 Simulated and measured values of wind speed, temperature, and relative humidity at each measurement point

度场的吻合度发现,40个温度测点的相对误差范围为0.04%~1.36%,平均相对误差0.43%。通过对相对湿度场的吻合度进行分析发现40个湿度测点的相对误差范围为0.00%~7.43%,平均相对误差2.22%。通过分析气流场的吻合度发现,在40个风速测定点中,5个测点实测风速过小,认为是实测时与模拟时奶牛位置不同,导致奶牛挡风,判断为异常值。剔除异常值后,气流场的相对误差范围为0.05%~83.68%,平均相对误差为38.44%。

2.3 模拟结果

图6展示了不同外界气候条件下舍内1.2 m高

度处的风速场和THI场,对于风速场,从整体上看,工况五时舍内的平均风速最大,工况三和工况五在牛舍西侧均存在高风速区,工况一牛舍内存在较多低风速区;对于北侧牛只活动区域,工况一的平均风速显著低于其他工况;工况一、三时牛舍西侧内存在较大范围的低风速区;对于南侧卧床区域,工况一风速最大,工况五和工况三的平均风速差异不显著。对于THI场,外界环境对牛舍内THI的影响均显著,工况一牛舍内THI为74.23~77.83,工况三牛舍内THI为76.75~80.45,工况五牛舍内THI为72.11~76.01,工况一、三情况下舍内大部分区域THI低于舍外,而工况三时舍内大部分区域高于舍外。

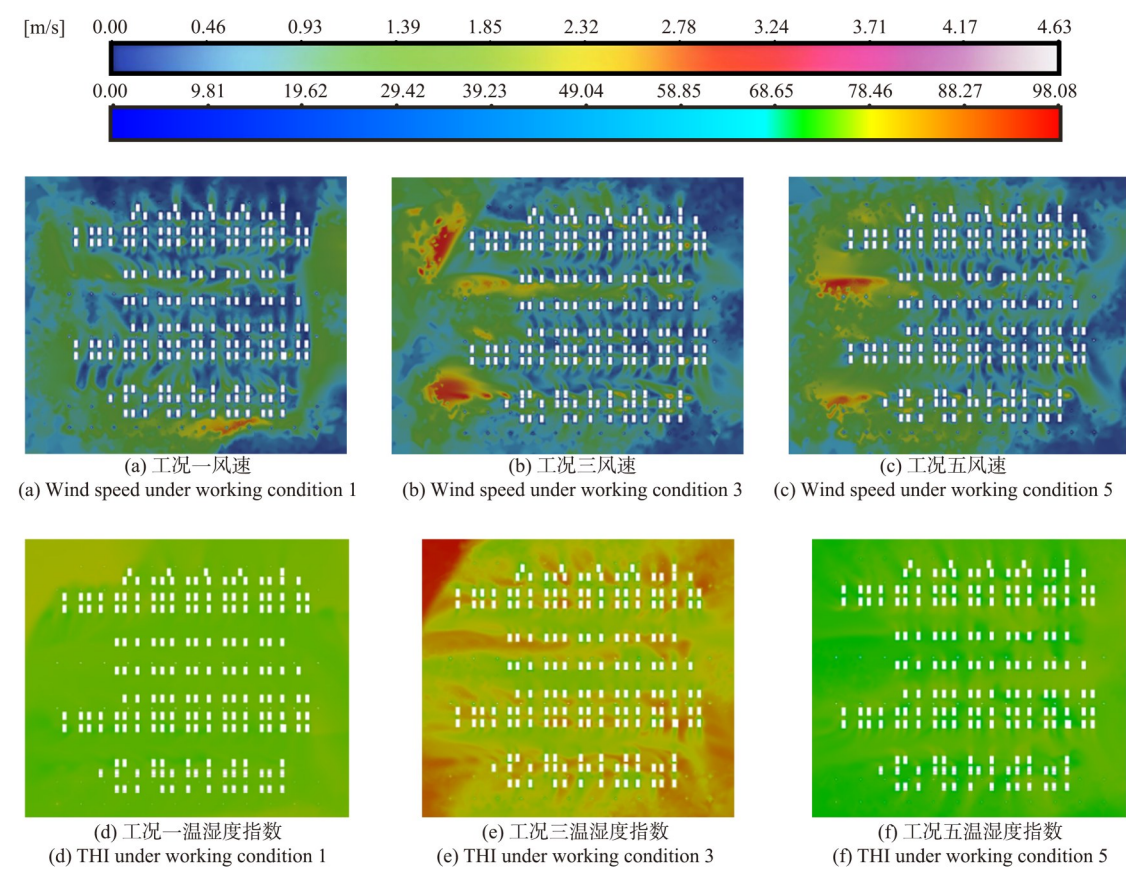
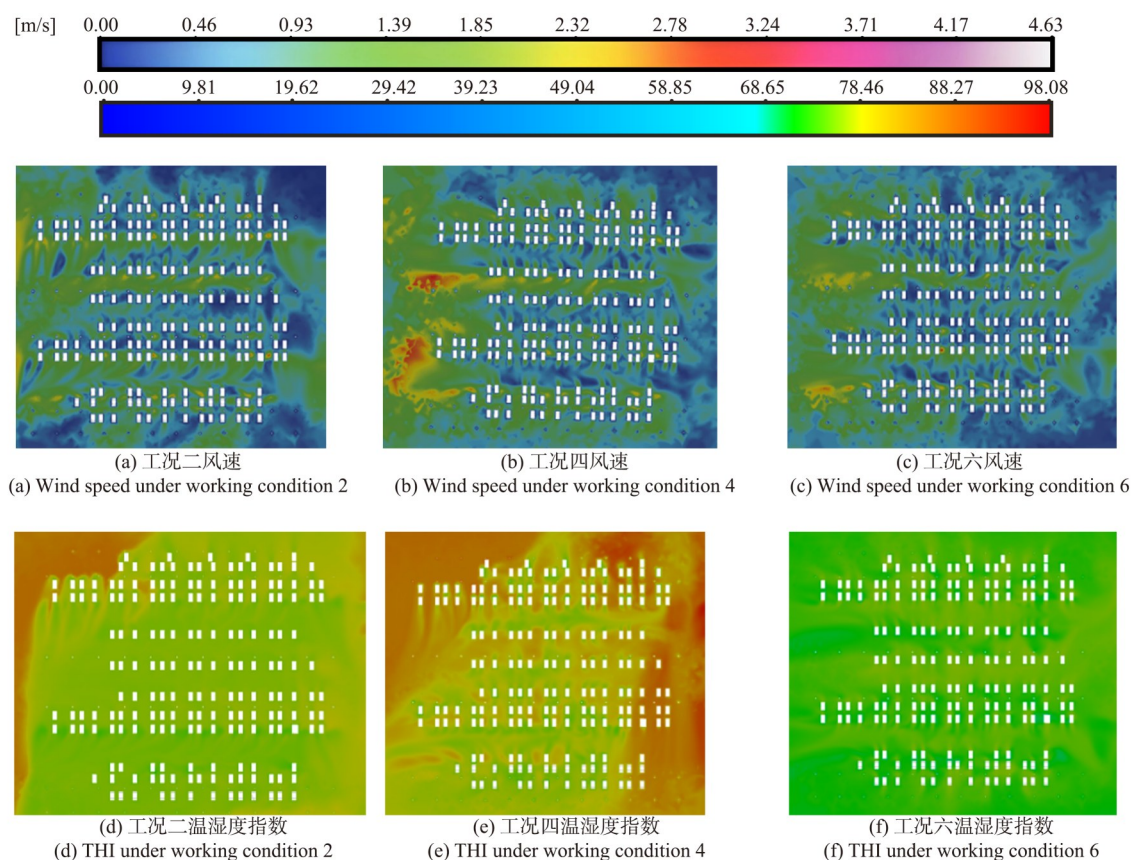


图6 无喷淋状态Y=1.2 m截面处云图

Fig. 6 Contour diagram at Y=1.2 m cross-section without spray

图7为不同温湿度情况下牛舍中加入喷淋装置的风速场和THI场云图,根据云图可知,与无喷淋状态相比,工况二高风速区集中在牛舍西侧,饲喂通道低风速区减少,但是低风速区面积增大;工况四西侧高风速区风速减小;工况六低风速区增加,西侧高风速区风速减小。工况二牛舍内THI为74.88~

79.18,工况四牛舍内THI为75.78~79.23,工况六牛舍内THI为71.63~75.82。数据采用SAS 9.2.1软件进行t检验,工况二较工况一牛舍内部的THI平均上升0.23差异显著($P<0.05$),工况四较工况三平均下降0.97差异显著($P<0.05$),工况六较工况五平均降低0.19,差异不显著($P>0.05$)。

图7 有喷淋状态 $Y=1.2$ m 截面处云图Fig. 7 Contour diagram at $Y=1.2$ m cross-section with spray

3 讨论

实测结果与气象站数据趋势基本一致,认为测量准确。但是本研究实测温度、湿度与风速出现异常值,其原因可能是测量一次耗时较长,在太阳辐射增强阶段测量后期的测点比测量前期测点温度高,湿度低。陈昭辉等^[19]模拟了夏季湿帘风机通风降温系统牛舍的温湿度场,出现由于肉牛产热而产生的高温部位,因此,牛群密度会对测量结果有影响,奶牛密度高的位置气温较高,这与本试验结果相同。

模拟验证表面温度、相对湿度、风速的测试值与模拟值之间的相对误差分别为0.43%、0.59%和38.44%,Tomasello等^[27]计算了20个不同外界条件下舍内测点实测值与模拟值误差,误差范围为0.08%~39.22%,据此认为模型可模拟自然通风条件下的流体域情况。本研究建立的牛舍模型可以作为一种有效的工具,用于设计和评估牛舍新的通风或降温系统。

牛只的体温蒸发和对流散热会受到气流影响^[28]。对于牛舍风速场模拟结果,由于舍内风扇向东吹风导致外界风场与风扇形成的风形成对流,形成了不同的风速区。从整体上看,高风速区集中在边缘地区,这一区域没有奶牛活动,因而造成了通风资源的浪费。各个工况比较可得,东北风与南风条件下牛舍边缘风速较高,这可能是因为流体域内其他建筑和地形的阻挡作用,减弱了西北风的影响。此外东北风情况下低风速区最少,牛只活动区域风速最大。

为直观了解舍内 THI 状况,本研究将温度场和相对湿度场耦合展示,牛舍 THI 场模拟结果表明,外界温湿度不同情况下舍内 THI 相较于舍外的变化程度不同,舍内主要热源为奶牛,其对流散热量和辐射量与机体活动有关,并且牛体与环境温差越大,传热量越大^[26],因此当外界温度过高时奶牛散热量减少导致舍内降温措施效果更加明显,而当舍外温度较低时,牛体产热量增加,牛体周围温度上升,导致降温措施效果相对较差^[29-31];另外,由于牛

体呼吸、排泄和饮水水槽的影响,舍内湿度较大,风会加强舍外干燥空气与舍内潮湿空气的交换,导致THI在不同区域变化幅度有差异。

对于不同外界条件下加入喷淋装置对THI场的改变,高温高湿情况下加入喷淋装置THI显著上升;高温低湿情况下加入喷淋装置THI显著降低;低温高湿情况下加入喷淋装置THI变化不显著,经观察夏季地面气象数据,该地大部分时间为高湿状态,考虑牛舍内湿度问题^[32],该地区不适宜添加喷淋装置,吴武平等^[33]在实测试验中也得出了同样的结论:在南方地区,舍内喷雾通风降温方式造成的湿度增加会极大阻碍降温效果,造成一种闷热的不良效果,牛舍舒适度下降。本结果证明在当地高温低湿的情况下加入喷淋装置会显著降低THI从而改善奶牛热应激,但是南方地区高温低湿气候较少,所以试验牛舍不适宜加入喷淋装置。

4 结 论

本研究对南方地区自然通风牛舍内温湿分布和风速进行了三维数值模拟和现场实测,在此基础上对不同外界环境下添加喷淋装置效果进行模拟分析。得出以下结论:

1)温度、相对湿度、风速的测试值与模拟值之间的相对误差分别为0.43%、2.22%和38.44%,风速实测值与模拟值表现出的变化趋势一致,表明该模型及网格划分有较好的可靠性和合理性;

2)数值模拟表明,外界风向对于牛舍风场分布有明显影响,外界环境对牛舍内THI的影响均显著,高温高湿和高温低湿情况下舍内大部分区域THI低于舍外,低温高湿时舍内大部分区域高于舍外。

3)外界风速、风向、温度、相对湿度不同,加入喷淋装置后效果不同。高温高湿时,喷淋装置的加入会显著升高THI,加剧奶牛热应激,高温低湿时,喷淋装置的加入会显著降低THI,改善奶牛热应激,低温高湿时,THI变化不显著。

因此本研究认为,当外界温度较高,相对湿度较小时,建议开启喷淋装置,湿度较大时,不宜开启喷淋装置,本研究可为南方地区自然通风奶牛舍设计及舍内环境调控提供依据。

参考文献 References

[1] 项锡恩,邓铭,孙宝丽,郭勇庆. 热应激对奶牛生产和健康的影响及其减

缓措施研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2024,60(1):54-60

Xiang X E, Deng M, Sun B L, Guo Y Q. Research progress on the effect of heat stress on production performance and health of dairy cows and its mitigation measures [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024, 60 (1):54-60(in Chinese)

[2] 陈峰杰,杜斌,李福星,曹生生. 奶牛热应激发病机理影响因素及预防措施[J]. 中国牛业科学, 2016,42(1):78-80

Chen F J, Du B, Li F X, Cao S S. Influence of the pathogenesis of heat stress in dairy cows and its preventive measures [J]. *China Cattle Science*, 2016,42(1):78-80 (in Chinese)

[3] Roenfeldt S. You can't afford to ignore heat stress [J] *Dairg herd management*,1998,35(5):6-8

[4] Dikmen S, Hansen P J. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment [J]. *Journal of Dairy Science*, 2009,92(1):109-116

[5] 石帅,孙志华,赵珊珊,刘浩,李威,孙林海. 气候变化对我国不同地区奶牛热应激的影响[J]. 畜牧与兽医, 2023,55(6):41-48

Shi S, Sun Z H, Zhao S S, Liu H, Li W, Sun L H. Impact of climate changes on heat stress of cows in different regions of China[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023,55(6):41-48 (in Chinese)

[6] Manos N E. Discomfort index[J]. *Science*, 1959,130(3389):1624

[7] Zeng J, Cai J, Wang D M, Liu H Y, Sun H Z, Liu J X. Heat stress affects dairy cow health status through blood oxygen availability [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2023,14(1):112

[8] Fan C Y, Su D, Tian H, Li X J, Li Y, Ran L, Hu R T, Cheng J B. Liver metabolic perturbations of heat-stressed lactating dairy cows [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018,31(8):1244-1251

[9] M'Hamdi N, Darej C, Attia K, El Akram Znaidi I, Khattab R, Djelailia H, Bouraoui R, Taboubi R, Marzouki L, Ayadi M. Modelling THI effects on milk production and lactation curve parameters of Holstein dairy cows[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021,99:102917

[10] Hagiya K, Hayasaka K, Yamazaki T, Shirai T, Osawa T, Terawaki Y, Nagamine Y, Masuda Y, Suzuki M. Effects of heat stress on production, somatic cell score and conception rate in Holsteins [J]. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho*, 2017,88(1):3-10

[11] 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, 2003

Wang F J. *Principle and Application of CFD Software for Computational Fluid Dynamics Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2003 (in Chinese)

[12] Mostafa E, Lee I B, Song S H, Kwon K, Seo I H, Hong S W, Hwang H S, Bitog J P, Han H T. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system[J]. *Biosystems Engineering*, 2012,112(4):293-303

[13] Seo I H, Lee I B, Moon O K, Hong S W, Hwang H S, Bitog J P, Kwon K S, Ye Z Y, Lee J W. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals [J]. *Biosystems Engineering*, 2012,111(1):91-106

- [14] 陈昭辉, 任方杰, 于桐, 汤漫, 蒋瑞祥, 刘继军, 李树静, 苏昊. 加装大风量风机对夏季湿帘降温奶牛舍的防暑降温效果分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 198-208
- Chen Z H, Ren F J, Yu T, Tang M, Jiang R X, Liu J J, Li S J, Su H. Analysis of the effect of installing large air volume fans on summer heat prevention and temperature reduction of wet curtain cooling cowsheds in summer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5): 198-208 (in Chinese)
- [15] de A Cunha G C, Lopes Neto J P, Furtado D A, Borges V P, Freire E A, do Nascimento J W B. Diagnosis and validation by computational fluid dynamics of poultry house with negative pressure ventilation[J]. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2019, 23(10): 761-767
- [16] Bjerg B, Morsing S, Svidt K, Zhang G. The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(3): 317-326
- [17] Tong X J, Hong S W, Zhao L Y. CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 178: 275-293
- [18] 邓书辉, 施正香, 李保明. 低屋面横向通风牛舍温湿度场CFD模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 209-214
- Deng S H, Shi Z X, Li B M. CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 209-214 (in Chinese)
- [19] 陈昭辉, 马一畅, 刘睿, 郭霏, 刘继军, 杨食堂. 夏季肉牛舍湿帘风机纵向通风系统的环境CFD模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 211-218
- Chen Z H, Ma Y C, Liu R, Guo F, Liu J J, Yang S T. Numerical simulation of environmental conditions for fan-pad evaporative cooling system of beef cattle barn in summer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 211-218 (in Chinese)
- [20] 张琴妹, 金宜全, 吴天佑, 倪杰, 宫玥, 王封霞, 杨志强, 张瑞华, 夏青, 王敏, 赵金鹏. 热应激对奶牛行为的影响及应对措施[J]. 中国奶牛, 2023(7): 34-38
- Zhang Q M, Jin Y Q, Wu T Y, Ni J, Gong Y, Wang F X, Yang Z Q, Zhang R H, Xia Q, Wang M, Zhao J P. Influence of heat stress on dairy cows and preventive measures[J]. *China Dairy Cattle*, 2023(7): 34-38 (in Chinese)
- [21] 沈留红, 程李杰, 尤留超, 雍康, 罗正中, 陈久兵, 骆巧, 余树民, 曹随忠. 热应激与喷淋-风扇系统对不同泌乳阶段奶牛生理和生产性能的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(9): 1602-1610
- Shen L H, Cheng L J, You L C, Yong K, Luo Z Z, Chen J B, Luo Q, Yu S M, Cao S Z. Effects of heat stress and spray-fan cooling system on physiology and production efficiency of dairy cows in different lactation stages[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(9): 1602-1610 (in Chinese)
- [22] 曹罗丹, 李加林. 基于遥感与GIS的浙江省洪涝灾害综合风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 111-119
- Cao L D, Li J L. Integrated risk assessment of flood disaster in Zhejiang Province based on RS and GIS [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(4): 111-119 (in Chinese)
- [23] 胡达明, 赵士怀, 黄夏东, 王云新. 建筑节能设计中围护结构用材料的隔热性能及其相关性探讨[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2007(4): 8-11
- Hu D M, Zhao S H, Huang X D, Wang Y X. Discussion on thermal insulation performance and correlation of building envelope materials in building energy-saving design [J]. *Building Block & Block Building*, 2007(4): 8-11 (in Chinese)
- [24] 方达宪. 流体力学[M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2018
- Fang D X. *Hydromechanics* [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2018 (in Chinese)
- [25] Kadzere C T, Murphy M R, Silanikove N, Maltz E. Heat stress in lactating dairy cows: A review[J]. *Livestock Production Science*, 2002, 77(1): 59-91
- [26] 刘继军. 家畜环境卫生学: 精编版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016
- Liu J J. *Environmental hygiene of livestock: Simplified edition* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese)
- [27] Tomasello N, Valenti F, Cascone G, Porto S M C. 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
- [28] Pakari A, Ghani S. Comparison of different mechanical ventilation systems for dairy cow barns: CFD simulations and field measurements [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 186: 106207
- [29] Nakamura K, Morrison S F. A thermosensory pathway that controls body temperature[J]. *Nature Neuroscience*, 2008, 11(1): 62-71
- [30] Ruf T, Geiser F. Daily torpor and hibernation in birds and mammals[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2015, 90(3): 891-926
- [31] Geiser F. Metabolic rate and body temperature reduction during hibernation and daily torpor[J]. *Annual Review of Physiology*, 2004, 66(1): 239-274
- [32] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽场环境质量标准: NY/T 388-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Environmental quality standards for the livestock and poultry farm: NY/T 388-1999[S]. Beijing: China Standards Press of China, 1999 (in Chinese)
- [33] 吴武平, 李川, 吴华东, 黄爱民, 张泳桢, 杨食堂, 舒邓群. 开放式牛舍舍内喷雾和屋面喷淋通风降温改善肉牛生产性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 187-193
- Wu W P, Li C, Wu H D, Huang A M, Zhang Y Z, Yang S T, Shu D Q. Cooling by interior spraying ventilation and roofing sprinkling ventilation on open beef cattle barn improving production performance of beef cattle [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 187-193 (in Chinese)



第一作者简介:段巧敏,女,汉族,中共预备党员,本科生,现就读于中国农业大学动物科学技术学院动科211班,现任动物科学技术学院青春党建工作室主任,曾获2022年国家励志奖学金,2023年国家励志奖学金、学习三等奖学金、学习进步奖学金。目前主要从事计算流体力学研究,对于畜牧场规划设计,畜舍环境模拟等方面有较大兴趣。



通讯作者简介:王雅春,中国农业大学动物科技学院教授、博士生导师。国家奶牛产业技术体系遗传改良研究室主任、育种规划及核心群建立岗位的岗位科学家,全国奶牛遗传改良计划专家委员会主任,中国奶业协会育种专业委员会常务副主任,国家畜禽遗传资源委员会牛专业委员会委员,全国畜牧业标准化技术委员会委员。主要从事奶牛、乳肉兼用牛育种规划及核心群建立,耐热、耐寒、抗逆、长寿和高繁等功能性状遗传基础解析、选育技术等研究。主讲《畜牧生物统计学》等专业基础课。主持多项国家级、省部级奶牛遗传资源创新及育种技术研发课题,曾获得多项国家、省部级科技奖励。