

周忠凯, 李 辉, 秦 竹, 等. 自然通风猪舍高压喷雾降温系统的降温效率[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 106-113.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.01.016

自然通风猪舍高压喷雾降温系统的降温效率

周忠凯^{1,2}, 李 辉^{1,2}, 秦 竹^{1,2}, 孙 倩^{1,2}, 顾洪如³, 夏礼如^{1,2}, 余 刚^{1,2}

(1.江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏 南京 210014; 2.农业部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏 南京 210014; 3.江苏省农业科学院畜牧研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为确定高压喷雾降温系统在夏季自然通风发酵床猪舍的适用性, 选择 2 栋发酵床育肥猪舍, 对不同气象条件下猪舍内的温湿度和风速进行了测定, 选择温湿度指数、热负荷指数和综合气候指数 3 种指标评估了高压喷雾降温系统对猪舍内热环境的影响。结果显示试验期间高压喷雾系统的降温效率在 18.4% 至 89.2% 之间, 平均为 59.1%; 与无喷雾猪舍相比, 高压喷雾降温系统可有效降低舍内温度 6.2 ℃, 最高降低 10.5 ℃, 湿度增加 23.9 个百分点(平均湿度为 72.2%); 整个试验期间, 喷雾猪舍平均温湿度指数 (THI) 为 74.3 (比无喷雾猪舍降低 12.2), 热应激减少 23.7%, 喷雾猪舍热负荷减少 2 713, 综合气候指数 (CCI) 平均降低 4.8 ℃。高压喷雾降温系统可以有效缓解自然通风发酵床猪舍内生猪遭受的热应激。

关键词: 猪舍; 高压喷雾降温系统; 温度; 相对湿度; 温湿度指数; 综合气候指数

中图分类号: S815.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)01-0106-08

Cooling efficiency of a high-pressure fog cooling system for natural ventilation pig barn

ZHOU Zhong-kai^{1,2}, LI Hui^{1,2}, QIN Zhu^{1,2}, SUN Qian^{1,2}, GU Hong-ru³, XIA Li-ru^{1,2}, YU Gang^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory for Protected Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To investigate the suitability of high-pressure fogging system (HPFS) for natural ventilation pig barn (NVB) with bedding system, experiments were conducted in two naturally ventilated pig barns under summer conditions. One pig barn was used as the treatment barn (fogged house, FNVB) and another was used as the control house (un-fogged house, UFNVB). Cooling efficiency of HPFS was defined by determination of dry-bulb temperature, relative humidity and air velocity in the interior of pig barns in different weather conditions. Heat stress was assessed using the temperature humidity index (THI) and the daily THI-hrs index and comprehensive climate index (CCI) for evaluation of thermal comfort in pig barn. The results showed that the cooling efficiency of the HPFS ranged from 18.4% to 89.2%, and the average value was 59.1%. The HPFS could effectively decrease the indoor temperature by 6.2 ℃. The greatest difference of temperature

between UFNVB and FNVB was 10.5 ℃. The air relative humidity in the FNVB was 72.2%, increased by 23.9%. The THI value was reduced by 12.2 in the FNVB (average value was 74.3). The values of the daily THI-hrs index and CCI under heat-stress conditions in FNVB were reduced by 2 713 and 4.8 ℃, respectively. In conclusion, high-pressure fog cooling system can effectively alleviate the heat stress of pigs in natural ventilation pig barn with

收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(12)1001-04]; 江苏省科技支撑计划项目 (BE2014342-1)

作者简介: 周忠凯 (1984-), 男, 山东茌平人, 硕士, 助理研究员, 主要从事畜禽生产过程环境质量控制与污染物排放监测研究, (E-mail) zhouzk@jaas.ac.cn

通讯作者: 余 刚, (E-mail) yug55@163.com

bedding system.

Key words: pig barn; high-pressure fog cooling system; temperature; relative humidity; temperature-humidity index; comprehensive climate index

空气温湿度是影响生猪生长和健康的主要因素,特别是夏季由于缺乏必要的降温措施,高温环境使生猪遭受长时间的热应激,导致生猪活动量和采食量减少、饮水增加、生长缓慢,甚至出现负增重等热应激反应^[1-2],严重影响生猪的物质和能量代谢等生理过程^[3]。此外,近年来由于气候变化导致极端炎热气候出现频次的增加^[4-5],对集约化生产条件下生猪的健康以及生产性能产生不利的影响。有研究结果表明当舍内环境温度高于 26.1 ℃ 时,为维持舍内适宜的温度,需要使用降温系统^[6],但同时湿度需要控制在 80% 以下^[7],以提高生猪的生产效率。

为改善夏季高温对生猪的影响,目前对猪舍降温管理措施进行了大量的研究,由于猪舍的结构类型以及养殖模式的不同降温方式的选择存在很大的差异。其中,夏季密闭式机械通风畜禽舍通常采用负压风机-湿帘降温方式^[8-9]和水空调方式^[10],但该设备的应用对猪舍的密闭隔热性要求较高。自然通风猪舍采用的降温方式主要有滴水降温、喷淋降温和雾化降温等^[11],以上 3 种降温措施都采用了蒸发降温的原理,与机械制冷方法相比,由于其投资运行费用较低,目前被广泛采用。其中,滴水降温与喷淋降温主要通过淋湿生猪体表,通过体表水的蒸发带走热量降低猪体温度,而滴水降温主要应用于单体定位饲养的公猪和分娩母猪舍,喷淋降温方式主要应用于成猪舍,同时需要使用较多的水资源。雾化降温方式,由于雾滴直径较小,不打湿地面,在空气湿度较低的条件下,具有较好的降温效果,在自然通风猪舍内被广泛采用,目前主要雾化方式有喷雾冷风机降温^[12-13]和高压喷雾降温等方式^[14-15]。有研究结果显示^[14],高压喷雾降温系统的压力大于 5 MPa 时,即使猪舍内相对湿度较高,喷雾雾滴仍然具有较好的蒸发特性,同时可降低生猪呼吸频率和呼吸水分的蒸发,有效降低生猪遭受的热应激反应。由于喷雾系统的降温效果和雾滴的蒸发特性受到空气的温度、相对湿度、喷雾水体温度以及空气流动的影响^[16],同时采用高压喷雾降温措施的猪舍由于建筑结构和覆盖材料保温隔热性能的差异,导致相同降温管理措施在猪舍中的降温效果不同,从而对夏

季自然通风猪舍的降温管理提出更高的要求。

本研究通过分析高压喷雾降温系统在中国东部地区夏季炎热季节的适用性,对自然通风大棚发酵床猪舍夏季在不同气候条件下的降温效率,以及喷雾过程对舍内湿热环境的影响,为该地区规模化畜禽养殖场(小区)自然通风发酵床猪舍选择合理的夏季降温管理措施提供参考。

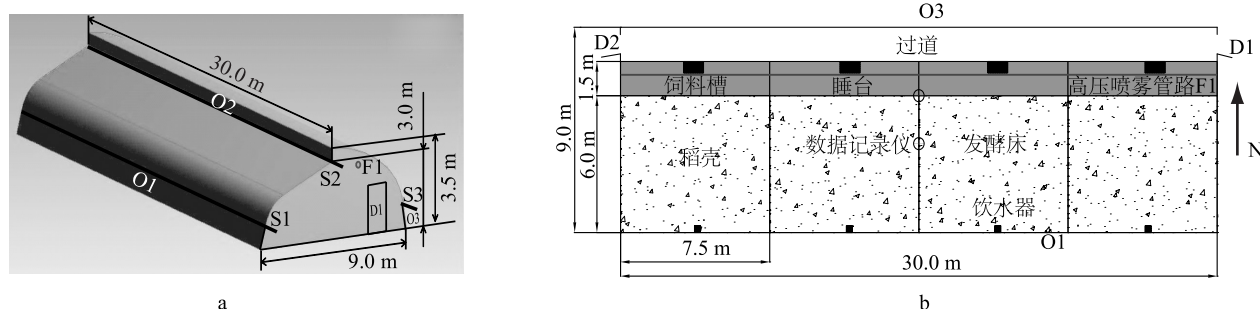
1 材料与方法

1.1 试验猪舍

在梅雨季节过后,于 2015 年 7 月 31 日至 2015 年 9 月 24 日在江苏省农业科学院六合动物科学试验基地发酵床猪场(经纬度为:32°29' N, 118°37' E; 海拔:15 m)进行。选择 2 栋半钟楼结构发酵床猪舍,分别设为试验猪舍(喷雾)和对照猪舍(无喷雾),其主要结构类型及尺寸见图 1a。猪舍采用钢架结构,表面由塑料薄膜和遮阳网覆盖,采用自然通风方式,通过控制门 D1~D2 和卷帘 S1~S3 的开关来控制猪舍通风口 O1~O3 进行通风换气。试验猪舍生猪养殖量为 54 头,测试开始和结束时的生猪体重质量分别为 45.5 kg 和 84.5 kg,分为 4 栏饲养,每栏设有 1 个饮水槽和 1 个饲料槽(图 1b)。试验期间猪舍通风口全开,生猪饲养采用自由采食方式,饮水采用鸭嘴式自动饮水系统。

1.2 高压喷雾降温系统的建立

集约化高压喷雾装置委托青岛昌润空气净化设备有限公司制造,系统由进水过滤器、贮水箱、可调压力的高压柱塞泵、回水管路、电机和电子控制系统、高压喷雾管路及喷嘴组成,系统供水 28 L/min,多余的水由回水管路返回贮水箱,采用地下水水源(平均水温 16.0 ℃)。该高压喷雾系统的 1 台高压喷雾主机可对 9 栋猪舍进行高压喷雾降温,设备投资较低。高压喷雾主机功率为 2.2 kW,工作压力 5.5 MPa。选择单路管路,管路安装在睡台的上方,距床体 2.0 m(图 1)。选择 2 号高压喷头,直径为 0.3 mm,单喷头模式,间隔 1.15 m,喷头喷雾量为 5.45 L/h。高压喷雾主机的循环间隔时间为 5 min,其中喷雾运行 2 min,停止 3 min。本研究中海压喷雾系统累计使用 32 d。



D1~D2:控制门;S1~S3:卷帘;O1~O3:通风口。

图1 试验猪舍结构示意图

Fig.1 Schematic depiction of the pig barn

1.3 环境指标的测定

试验猪舍和对照猪舍分别设置温度和湿度测试点各 2 个,采样点高度为 1.0 m,安装位置详见图 1b。温度和湿度采用 HOB0 U23 温湿度记录仪 (HoboPro Data logger, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA) 测定;舍内空气流速采用 Testo405-V1 手持式热敏风速仪 (Testo AG, Lenzkirch, Germany) 测定,测试位置同温湿度采样点。大气温度、湿度、风速、风向、大气压、太阳辐射采用 HOB0U30 气象数据记录仪测定,每 10 min 采集 1 次。

1.4 高压喷雾降温系统的降温效率计算模型

高压喷雾降温效率的计算^[17-18]参照公式(1):

$$n_{\text{cool}} = \frac{T_{\text{unfog,dbi}} - T_{\text{fog,dbi}}}{T_{\text{unfog,dbi}} - T_{\text{fog,wbi}}} \quad (1)$$

式中 n_{cool} 为高压喷雾系统的降温效率, $T_{\text{unfog,dbi}}$ 为无喷雾猪舍内干球温度(℃), $T_{\text{fog,dbi}}$ 为喷雾猪舍内干球温度(℃), $T_{\text{fog,wbi}}$ 为喷雾猪舍内湿球温度(℃)。湿球温度的计算参考 Stull^[19]的换算方法,详见公式(2):

$$T_{\text{wbi/o}} = T_{\text{i/o}} \text{atan}[0.151\ 977(RH_{\text{i/o}} + 8.313\ 659)^{1/2}] + \text{atan}(T_{\text{i/o}} + RH_{\text{i/o}}) - \text{atan}[RH_{\text{i/o}} - 1.676\ 331] + 0.003\ 918 RH_{\text{i/o}}^{3/2} \text{atan}(0.023\ 101 RH_{\text{i/o}}) - 4.686\ 035 \quad (2)$$

式中, $T_{\text{i/o}}$ 为舍内或舍外温度(℃), $RH_{\text{i/o}}$ 为舍内或舍外相对湿度(%)。

舍内外空气中水汽含量的计算见公式(3)与公式(4):

$$W_{\text{i/o}} = 0.621\ 9 \frac{RH_{\text{i/o}} P_{\text{sat}}}{P_{\text{atm}} - RH_{\text{i/o}} P_{\text{sat}}} \times 1\ 000 \quad (3)$$

$$P_{\text{sat}} = 610.780 \exp\left[\frac{17.269 T_{\text{i/o}}}{237.300 + T_{\text{i/o}}}\right] \quad (4)$$

式中, $W_{\text{i/o}}$ 为舍内或舍外空气中水汽含量(g/kg), P_{atm} 为大气压(Pa), P_{sat} 为饱和蒸汽压(Pa)。

1.5 热应激指标计算模型

为确定高压喷雾降温系统对猪舍内环境的影响,选择温湿度指数(THI)、热负荷指数(Daily THI-hrs)和综合气候指数(CCI)3种指标对舍内的热环境状况进行分析。THI 计算参考 NOAA 的推荐方法^[20],该方法已经广泛应用于畜禽养殖湿热环境的评估^[21-24],详见公式(5):

$$THI = [(1.80 T_{\text{i/o}} + 32.00) - [0.55 (RH_{\text{i/o}} / 100.00)]] \cdot [(1.80 T_{\text{i/o}} + 32.00) - 58.00] \quad (5)$$

生猪热应激状态通常分为 4 类:当 $THI < 75$ 时,无热应激;当 $75 \leq THI \leq 78$ 时,为中等热应激;当 $79 \leq THI \leq 83$ 时,为严重热应激;当 $THI \geq 84$ 时,为极端严重热应激。舍内不同热应激状况由 4 类应急状态的 THI 分布比例确定。

热负荷指标^[25-26]主要揭示喷雾猪舍与无喷雾猪舍内热应激的强度和持续时间,计算方法见公式(6):

$$\text{Daily THI-hrs} = \sum_{i=1}^{24} (THI' - \text{base}) \quad (6)$$

式中, Daily THI-hrs 为每日热负荷, THI' 为每 1 h 的温湿度指数值, base 为不存在热应激的域值(75)。

综合气候指数是综合考虑空气温度、湿度、风速和太阳辐射 4 个因素计算的指数值,计算方法见公式(7):

$$CCI = T_{\text{i/o}} + RH_{\text{cf}} + WS_{\text{cf}} + RAD_{\text{cf}} \quad (7)$$

式中, CCI 为综合气候指数(℃), RH_{cf} 为湿度相关因子, WS_{cf} 为风速相关因子, RAD_{cf} 为太阳辐射相关因子。湿度、风速以及太阳辐射相关因子的计算

方法参考 Mader 等研究^[27],由于猪舍覆盖遮阳网,遮阳网的遮光率(φ)和投射率(τ_s)分别为 0.86 和 0.10,猪舍内的太阳辐射照度根据太阳总辐射照度的 25%计算^[28]。

1.6 数据整理及统计分析

为确定不同大气温度条件下,高压喷雾系统的降温效率及对环境的影响,将整个试验期间的测试数据,按照舍外大气温度数据进行分组,分别是:Ⅰ组舍外温度为 25~27℃;Ⅱ组为 28~30℃;Ⅲ组为 31~33℃;Ⅳ组为 34~36℃。数据统计分析采用 SAS9.03 软件(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) PROC GLM 程序进行,采用 Tukey 检验法,对不同猪舍内外的温度和湿度平均值进行两两比较,分析其差异显著性,显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 喷雾猪舍内温湿度的变化

试验测试期间 8:0~18:00 舍外气象数据见表 1。经过数据统计分析,2015 年 7 月 31 日—2015 年 9 月 24 日,大气日平均气温在Ⅰ组、Ⅱ组、Ⅲ组和Ⅳ组区间的天数分别为 4 d、4 d、30 d、15 d,其中日均温度小于 25℃的为 3 d。

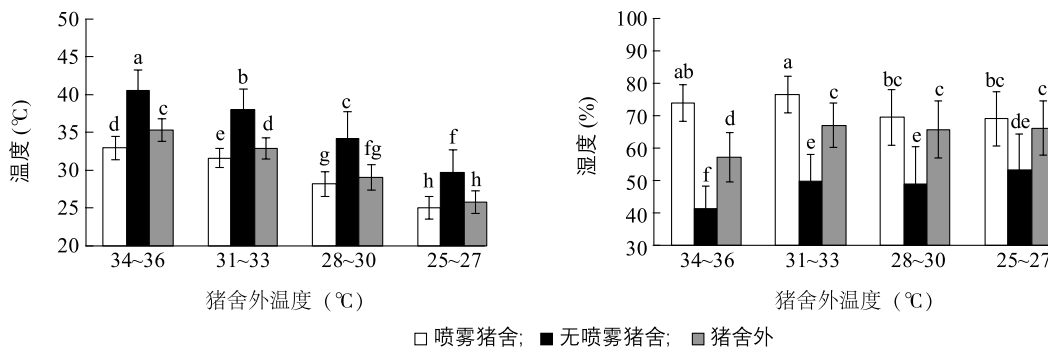


图2 喷雾猪舍内外温湿度差异(8:0~18:00)

Fig.2 Temperature and humidity difference in the fogged and un-fogged pig barn (8:0~18:00)

试验期间喷雾猪舍温度比无喷雾的猪舍平均降低 6.2℃,最高降低 10.5℃,最低降低 0.7℃;喷雾猪舍内湿度比无喷雾猪舍平均增加了 23.9 个百分点,最高增加 41.1 个百分点,最低增加 5.4 个百分点(图 3)。

2.2 高压喷雾降温系统的降温效率

图 4 显示,不同舍外温度条件影响高压喷雾系

表 1 试验期间(8:0~18:00)气象数据

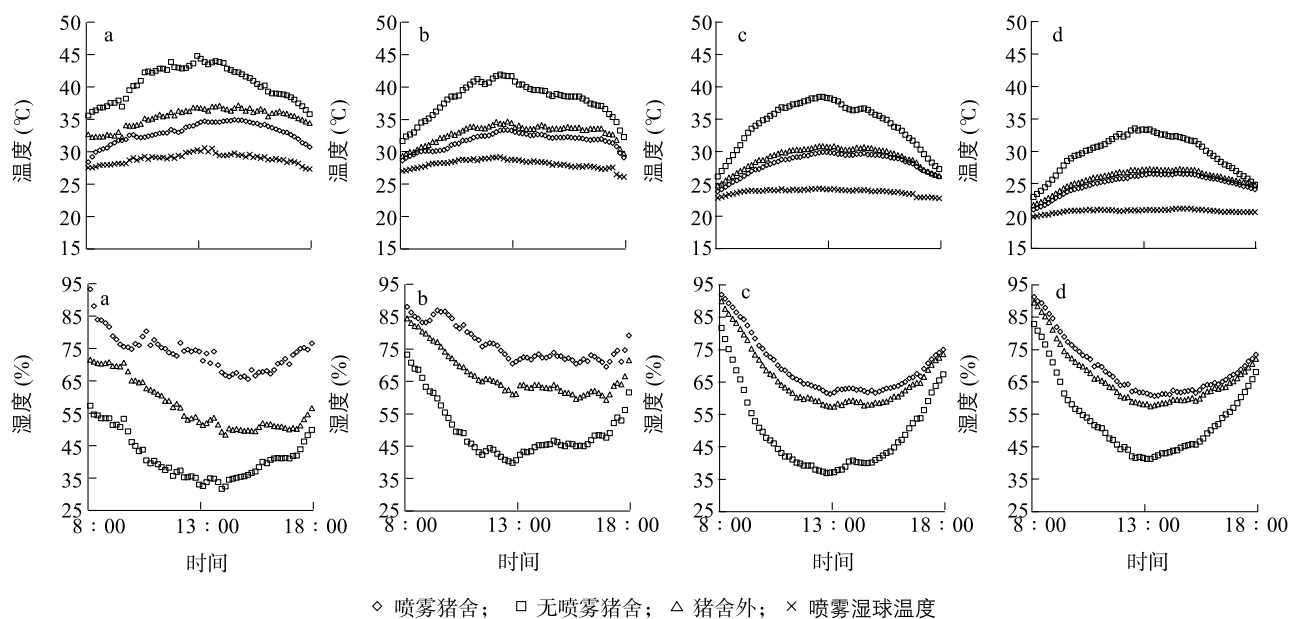
Table 1 Meteorological data during the test period (8:0~18:00)

变 量	平均值	标准差	最小值	最大值
气温 (°C)	30.7	4.2	21.7	37.2
太阳辐射 (W/m ²)	511	114	34	1008
空气湿度 (%)	61.6	6.3	48.4	90.0
风速 (m/s)	2.48	0.44	0	4.09
风向 (°)	173	71	0	286
$W_o^* - W_o$ (kg/kg)	11.6	4.2	1.8	22.4

W_o^* :空气中饱和水汽含量; W_o :空气中实际水汽含量。

舍内外温湿度差异性比较见图 2。舍外日平均温度 25~36℃条件下,喷雾猪舍内平均温度和湿度分别为 29.4℃和 72.2%,舍外分别为 30.7℃和 61.6%,无喷雾猪舍内分别为 35.6℃和 48.3%,无喷雾猪舍内温度显著高于喷雾猪舍和舍外温度($P<0.05$);舍外温度条件在 31~36℃时喷雾猪舍内温度显著低于舍外温度($P<0.05$),而舍外温度在 25~30℃时喷雾猪舍内与舍外温度的差异不显著($P>0.05$)。无喷雾猪舍内湿度显著低于喷雾猪舍内和舍外湿度($P<0.05$),其中,在舍外温度 31~36℃时,喷雾猪舍内湿度显著高于舍外湿度($P<0.05$),而在舍外温度为 25~30℃时喷雾猪舍内与舍外湿度的差异不显著($P>0.05$)。

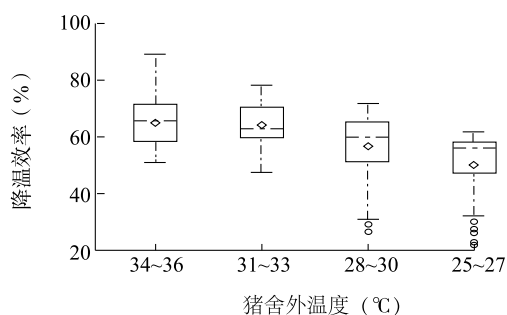
统的降温效率,整个试验期间降温效率为 18.4%~89.2%,平均为 59.1%。其中,舍外平均温度为 31~33℃和 34~36℃时喷雾降温系统的平均降温效率分别为 64.2%和 65.2%,差异不显著($P>0.05$),显著高于舍外平均温度为 28~30℃和 25~27℃时的 56.9%和 50.2%($P<0.05$)。说明随着舍外温度的降低喷雾降温系统的降温效率呈现下降的趋势。



a:猪舍外温度 34~36 °C;b:猪舍外温度 31~33 °C;c:猪舍外温度 28~30 °C;d:猪舍外温度 25~27 °C。

图3 使用高压喷雾期间猪舍内外温度与湿度指标变化

Fig.3 Changes of the temperatures and relative humidity in the fogged and un-fogged pig barn



不同字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图4 不同舍外温度条件下高压喷雾系统的降温效率

Fig.4 Cooling efficiency of the high-pressure fogging system under different outside temperature conditions

高压喷雾降温效率(n_{cool})与舍外饱和空气中水汽含量和实际含湿量的差值($W_o^* - W_o$)存在显著相关关系($r=0.951\ 06, P<0.000\ 1$)(图5)。随着空气中水汽含量差值的增加降温效率也增加,两者之间的关系可用以下方程表示, $n_{cool} = 1.048\ 43(W_o^* - W_o) + 45.940\ 69, R^2 = 0.904\ 5$ 。

2.3 喷雾猪舍温湿度指数(THI)的变化

表2为不同猪舍温湿度指数、热负荷指数以及综合气候指数值。表2表明,猪舍遭受热应激的时间通常发生在上午8:00到下午18:00之间。试验期间(8:00-18:00)喷雾猪舍内THI比无喷雾猪舍平均降低12.2,最高降低21.3,最低降低2.6;喷

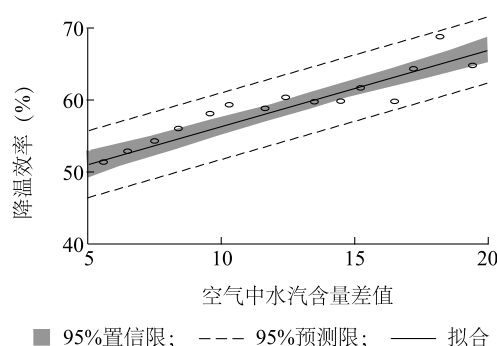


图5 高压喷雾系统降温效率与大气中水汽含量差值的相关关系

Fig.5 The relationship between the cooling efficiency of high-pressure fogging system and difference of moisture content

雾猪舍内THI比舍外平均降低了2.9,最高降低6.4,最低降低了0.8,喷雾猪舍内THI指标值平均为74.3,显著低于无喷雾猪舍内的86.5($P<0.05$);整个试验期间喷雾猪舍生猪遭受的热应激($THI \geq 75$)比无喷雾猪舍减少23.7%,严重热应激和极端严重热应激($THI \geq 79$)减少27.3%。热负荷指标分析结果显示,整个试验期间,无喷雾猪舍内热负荷值为2970,显著高于喷雾猪舍内的257,是喷雾猪舍热负荷的11.6倍。热负荷指数的增加说明无喷雾猪舍遭受热应激的强度和时间显著高于喷雾猪舍。试验期间舍外的综合气候指数(CCI)平均为

38.9℃, 喷雾猪舍内和无喷雾猪舍内综合气候指数分别为 37.5℃、42.3℃, 与无喷雾猪舍相比喷雾猪舍平均 CCI 降低 4.8℃(表 2)。本研究中猪舍采用

塑料薄膜和遮阳网外围护结构, 夏季易出现高温, 使用高压喷雾降温系统可有效减缓生猪的热应激反应, 实现自然通风发酵床猪舍内的局部降温。

表 2 不同猪舍温湿度指数 (THI)、热负荷指数 (Daily THI-hrs) 以及综合气候指数 (CCI)

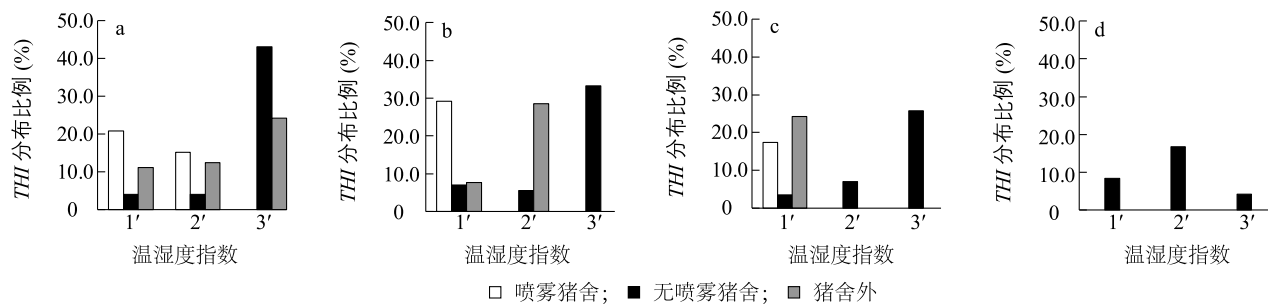
Table 2 The temperature humidity index (THI), daily THI-hrs index (Daily THI-hrs) and comprehensive climate index (CCI) in different pig barns

位置	温度范围 (°C)	温湿度指数 (THI)				THI 分布比例 (%)			Daily THI-hrs	CCI (°C)
		平均值	标准差 (STDEV)	最大值	最小值	THI≥75	THI≥79	THI≥84		
喷雾猪舍	34~36	77.8	2.6	81.3	70.2	10.7	2.1	0	257c	42.1±1.7
	31~33	76.0	2.1	78.9	71.2					40.8±1.9
	28~30	73.4	2.8	76.4	66.3					35.2±1.2
	25~27	69.9	2.4	72.4	63.8					31.8±1.5
无喷雾猪舍	34~36	94.5	5.3	102.6	84.1	34.4	29.4	21.5	2970a	46.7±2.6
	31~33	89.2	5.2	96.5	76.7					45.6±3.0
	28~30	84.5	6.5	92.4	69.6					40.6±3.0
	25~27	77.9	5.2	84.6	66.4					36.3±2.8
舍外	34~36	83.8	3.3	87.7	77.6	16.5	7.3	1.6	551b	42.0±2.3
	31~33	79.1	2.6	82.2	72.4					39.9±2.7
	28~30	74.9	3.0	78.1	67.3					38.8±2.5
	25~27	71.1	2.5	73.7	64.6					34.8±2.0

统计时间为 768 h。同一列中不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

对不同气候条件下每日 THI 的分布比例进行分析, 结果(图 6)表明使用高压喷雾降温系统可显著降低生猪的严重热应激反应。在舍外温度为 34~36℃时, 喷雾猪舍和无喷雾猪舍生猪遭受的严重热应激 (THI≥79) 分别占 15.3% 和 47.3%, 相比无喷雾猪舍, 喷雾猪舍生猪遭受的严重热应激减少 32.0 个百分点; 舍外温度分别为 25~27℃、28~30℃、

31~33℃时, 喷雾猪舍生猪没有遭受严重的热应激 (THI≥79) 反应, 而无喷雾猪舍生猪遭受的严重热应激分别占 20.9%、32.6% 和 38.9%。使用高压喷雾的猪舍生猪没有发生极端严重热应激 (THI≥84), 而无高压喷雾的猪舍生猪遭受极端严重热应激的时间在 4 种不同气候条件下分别占 4.2%、25.7%、33.3%、43.1%。



a: 34~36℃; b: 31~33℃; c: 28~30℃; d: 25~27℃。1': 75 ≤ THI ≤ 78; 2': 79 ≤ THI ≤ 83; 3': THI ≥ 84。

图 6 不同舍外温度条件下 THI 分布的比例 (24 h)

Fig.6 Distribution ratio of THI under different outside temperature conditions (24 h)

2.4 高压喷雾降温系统的电力和水消耗

电力和水资源的消耗是高压喷雾系统应用的主要制约因素。夏季高温季节通常有 40 d 左右,使用时间通常为 8:00-18:00。本研究中海压喷雾降温系统实际使用时间为 32 d,每头猪水消耗平均为 10.1 L/d,每头猪电力消耗平均为 0.163 kW/(h·d)。

3 讨论

目前对于畜禽舍蒸发降温效率的研究大部分集中在密闭式畜禽舍-湿帘降温系统。由于密闭型畜禽舍保温隔热性能较好,降温效率选择舍外干湿球温度和使用降温系统的舍内干球温度数据^[29]计算,降温效率在 52.1%至 90.1%之间^[9],平均值高于本研究自然通风猪舍-高压喷雾降温系统的降温效率(59.1%)。有研究者对塑料大棚中高压喷雾系统的降温效率进行了研究,结果显示平均降温效率为 53%^[30],具有很好的可比性。

对于开放式畜禽舍,舍外温度变化、外围护结构的隔热性能以及动物的数量影响高压喷雾系统的降温效率。朱志平对开放式猪舍冷风机喷雾降温效果进行了研究,结果显示平均降幅为 3~7℃,相对湿度增加 10%^[13]。本研究结果显示试验期间喷雾猪舍内日平均湿度为 72.2%,与无喷雾猪舍平均湿度 48.3%相比平均增加 23.9 个百分点,与舍外相比湿度平均增加了 8.3 个百分点,虽然增加了猪舍内湿度,但在最佳湿度控制范围(50%~80%)之内^[31],与朱志平的研究结果^[13]具有很好的可比性。与舍外相比喷雾猪舍内温度平均值仅仅降低 1.3℃,最高仅降低 4.3℃,但与无喷雾猪舍相比,温度平均降低 6.2℃,最高降低 10.5℃,具有较好的降温效果。舍内较低的湿度有利于雾滴的蒸发,日间使用高压喷雾降温技术在自然通风发酵床猪舍中具有很好的适用性,而夜晚猪舍的湿度相对较高,平均湿度值大于 80%,不建议夜晚使用高压喷雾降温系统。

整个试验期间无喷雾猪舍中,75≤THI≤78 的分布比例为 5.0%,79≤THI≤83 的分布比例为 7.9%,THI≥84 的分布比例为 21.5%,使用高压喷雾系统的猪舍分别为 8.6%、2.1%和 0,显著降低了喷雾猪舍的热应激值。喷雾猪舍热负荷与无喷雾猪舍相比减少 2 713,综合气候指数(CCI)降低 4.8℃,高压喷雾降温可显著减少猪舍内热应激特别是严重

热应激(THI≥79)的发生。按照实际使用时间计算,当舍外日平均温度大于 25℃时,高压喷雾降温系统的水消耗量为每头猪 10.1 L/d。有学者对密闭型机械通风猪舍内高压喷雾系统水的使用量进行研究,结果显示水消耗量为每头猪 4.9 L/d^[14],喷淋降温系统水的使用量达到每头猪 19.0 L/d^[32],与其他降温方式相比本试验的高压喷雾降温系统可有效降低水的用量。

参考文献:

- [1] PLACE S E, MITLOEHNER F M. The nexus of environmental quality and livestock welfare [J]. Annual Review of Animal Biosciences, 2014, 2:555-569.
- [2] NISSIM S. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants [J]. Livestock Production Science, 2000, 67:1-18.
- [3] BAUMGARD L H, RHOADS J R P. Effects of heat stress on post-absorptive metabolism and energetics [J]. Annual Review of Animal Biosciences, 2013, 1: 311-337.
- [4] KUCZYNSKI T, BLANESVIDAL V, LI B M, et al. Impact of global climate change on the health, welfare and productivity of intensively housed livestock [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2011, 4(1):1-22.
- [5] NARDONE A, RONCHI B, LACETERA N, et al. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems [J]. Livestock Science, 2010, 130: 57-69.
- [6] PANAGAKIS P, AXAPOULOS P. Comparing fogging strategies for pig rearing using simulations to determine apparent heat-stress indices [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99: 112-118.
- [7] BRIDGES T C, GATES R S, TURNER L W. Stochastic assessment of evaporative misting for growing-finishing swine in Kentucky [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(5): 685-693.
- [8] WANG C, CAO W, LI B, et al. A fuzzy mathematical method to evaluate the suitability of an evaporative pad cooling system for poultry houses in China [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(3): 395-405.
- [9] LUCAS E M, RANDALL J M, MENESES J F, et al. Potential for evaporative cooling during heat stress periods in pig production in Portugal (Alentejo) [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76: 363-371.
- [10] 谢雨晴,刘潇蔚,王美芝,等. 有窗密闭式猪舍水空调技术夏季降温效果[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(10): 49-55.
- [11] 马承伟,苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [12] DONG H, TAO X, LI Y, et al. Comparative evaluation of cooling systems for farrowing sows [J]. American Society of Agricultural Engineers, 2001, 17: 91-96.

- [13] 朱志平. 开放式猪舍通风与喷雾蒸发降温系统的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2002.
- [14] HAEUSSERMANN A, HARTUNG E, JUNGBLUTH T, et al. Cooling effects and evaporation characteristics of fogging systems in an experimental piggery [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97: 395-405.
- [15] BOTTO L, LENDELOVÁ J, STRMEVOVÁ A, et al. The effect of evaporative cooling on climatic parameters in a stable for sows [J]. *Research in Agricultural Engineering*, 2014, 60 (Special Issue): 85-91.
- [16] TOIDA H, KOZAI T, OHYAMA K, et al. Enhancing fog evaporation rate using an upward air stream to improve greenhouse cooling performance. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2): 205-211.
- [17] ABDELGHANY A M, KOZAI T. Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94 (1): 97-109.
- [18] FRANCO A, VALERA D L, PEÑA A. Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: cooling boxes versus cellulose pads [J]. *Energies*, 2014, 7: 1427-1447.
- [19] STULL R B. Wet-Bulb temperature from relative humidity and air temperature [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50 (11): 2267-2269.
- [20] BOHMANOVA J, MISZTAL I, COLE J B. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(4): 1947-1956.
- [21] SEGNALENI M, BERNABUCCI U, VITALI A, et al. Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57: 451-458.
- [22] SEGNALENI M, NARDONE A, BERNABUCCI U, et al. Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55: 253-263.
- [23] WEGNER K, LAMBERTZ C, DAŞ G, et al. Climatic effects on sow fertility and piglet survival under influence of a moderate climate [J]. *Animal*, 2014, 8(9): 1526-1533.
- [24] ZHOU Z, QIN Z, LI H, et al. Evaluation of temperature-humidity index in a growing-finishing pig bedding system [C]//NI J Q, LIM T T, WANG C. *Animal environment and welfare-proceedings of international symposium*. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 34-41.
- [25] PAPANASTASIOU D, BARTZANAS T, PANAGAKIS P. Assessment of a typical Greek sheep barn based on potential heat-stress of dairy ewes [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, 30 (6): 953-959.
- [26] PANAGAKIS P, CHRONOPOULOU E. Preliminary evaluation of the apparent short term heat-stress of dairy ewes reared under hot summer conditions [J]. *Applied Eng in Agric*, 2010, 26(6): 1035-1042.
- [27] MADER T L, JOHNSON L J, GAUGHAN J B. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals [J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88: 2153-2165.
- [28] 张艳玲. 遮阳网对夏季温室小气候影响的研究[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- [29] FRANCO A, VALERA D L, PEÑA A. Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: Cooling boxes versus cellulose pads [J]. *Energies*, 2014, 7: 1427-1447.
- [30] LI S, WILLITS D H. Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 69-77.
- [31] CIGR. Report of working group on climatization of animal houses [EB/OL]. (1984) [2016-04-25] <http://www.cigr.org/documents/CIGR-Workinggroupreport1984>.
- [32] AXAOPOULOS P, PANAGAKIS P. Simulation comparison of evaporative pads and fogging on air temperature inside a growing swine building [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(1): 215-219.

(责任编辑:张震林)