

湿帘-风机系统对北京育肥猪舍的降温效果

王美芝^{1,2}, 赵婉莹¹, 刘继军^{1,2}, 安涛¹, 易路¹, 王刚³, 吴中红^{1,2*}

(1. 中国农业大学动物科技学院, 北京 100193; 2. 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 北京市夏季高温将对猪的生产造成严重影响, 夏季猪舍环境温度控制尤为重要。该试验研究比较了湿帘-风机和单纯风机在北京猪舍的降温效果, 设计了风机风量测量系统并实测了猪舍通风量, 每天定时分别测定两猪舍内温度、湿度、风速和舍外温、湿度并进行比较分析。结果表明: 试验期间, 湿帘-风机猪舍和单纯风机舍6个断面风速范围分别为0.51~0.84和0.51~0.68 m/s, 整体风速差异不显著 ($P>0.05$)。湿帘-风机舍舍内温度显著低于单纯风机舍 ($P<0.05$), 湿帘-风机舍和单纯风机舍舍内温度高于30.0℃的小时数占比分别为5.0%和20.2%。湿帘-风机舍同一时刻断面1(湿帘端)温度低于断面6(风机端)温度0.4~2.2℃, 单纯风机舍各时刻不同断面的温度差异不显著 ($P>0.05$)。单纯风机舍内的猪只呼吸频率均显著高于湿帘-风机舍内呼吸频率3.82次/min(12:00)和3.05次/min(14:00) ($P<0.05$)。湿帘-风机舍降温系统日用水量为1.20~6.27 m³。北京地区猪舍使用湿帘-风机系统降温效果优于单纯风机降温效果, 但湿帘-风机降温将耗用一定水资源。

关键词: 风机; 降温; 风速; 湿帘-风机系统; 猪舍

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.026

中图分类号: S817.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0197-09

王美芝, 赵婉莹, 刘继军, 安涛, 易路, 王刚, 吴中红. 湿帘-风机系统对北京育肥猪舍的降温效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 197—205. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.026 <http://www.tcsae.org>

Wang Meizhi, Zhao Wanying, Liu Jijun, An Tao, Yi Lu, Wang Gang, Wu Zhonghong. Cooling effect of water pad-fan system for fattening pig houses in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 197—205. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.026 <http://www.tcsae.org>

0 引言

高温将影响育肥猪的热应激、猪的福利和生产性能^[1]。高温下, 育肥猪将通过调节生产性能不利的热调节机制包括行为、生理和代谢等调整来维持其体温, 比如通过减少采食量减少产热量, 由此带来生长速率的下降^[2]。生长育肥猪在热应激条件下, 采食量会显著下降, Renaudeau等^[3]试验测定28、32、36℃温度下育肥猪的平均日采食量逐渐下降。同时, 猪舍内温度越高, 氨气排放量越高^[4]。

20世纪50年代美国科学家研究开发了湿帘降温系统。湿帘-风机降温系统利用水蒸汽吸热实现冷却^[5-6]。湿帘-风机降温技术是温室多种降温技术中最有效而且最为经济的降温方式^[7]。湿帘-风机降温系统在温室降温方面的效果已有较多研究^[8-10], 研究人员对该降温方式下温室降温参数进行了优化^[11], 并对湿帘-风机降温系统安装高度对降温效果的影响进行了研究^[12]。在上海等湿度较大地区, 在室外相对湿度大于80%时, 湿帘-风机和遮阳综

合措施可使温室内温度比室外降低2~3℃^[13]。湿帘-风机降温系统在高温干燥地区降低舍内温度较为高效, 研究人员利用模糊数学的方法理论评价了中国9个城市地区禽舍采用湿帘-风机降温的适宜性^[14]。龚建军等^[15]研究了四川地区妊娠猪舍采用湿帘-风机降温系统时风机安装位置不同对降温效果的影响及该降温期间猪舍内环境状况。蒲洪州等^[16]在重庆地区安装湿帘-风机的妊娠猪舍高温季节降温结果表明, 湿帘风机降温系统受湿度影响, 在湿度大于90%条件下, 最大降温幅度为1℃, 在低湿条件下虽其最大降温幅度可达9℃, 但在极端高温情况下很难将舍内温度降到适宜温度范围内。卢真真等^[17]通过试验和理论分析相结合, 分析了北京地区鸡舍利用湿帘-风机降温时在保证一定降温幅度时的必需通风量。综上所述可知, 湿帘-风机降温系统的降温效果受不同地区的气候条件影响较大, 并且不同动物种类及饲养密度的产热量不同也会对降温效果产生影响。

据北京市1971—2015年的气象资料显示, 北京市夏季极端最高气温可达41.9℃^[18]。调查显示, 北京地区的猪舍夏季多数没有降温措施^[19], 北京猪舍有必要增加降温措施。湿帘-风机降温 and 单纯风机降温在北京市气候条件下对猪舍的降温效果比较尚未见报道, 本试验选择湿帘-风机降温育肥猪舍和单纯风机降温育肥猪舍作为研究对象, 通过比较两者各环境指标的差异, 研究湿帘-风机系统和单纯风机系统对北京地区夏季猪舍的降温效果,

收稿日期: 2016-07-28 修订日期: 2017-04-12

基金项目: 生猪产业技术体系北京市创新团队项目(BAIC02-2016)

作者简介: 王美芝, 女, 副教授, 博士, 主要从事畜牧工程与畜牧环境研究。北京 中国农业大学动物科技学院, 100193。Email: meizhiwang@cau.edu.cn
*通信作者: 吴中红, 女, 副教授, 主要从事畜禽环境工程、环境对家畜生殖发育的影响方面的研究。北京 中国农业大学动物科技学院, 100193。

Email: wuzhh@cau.edu.cn

以期对北京地区猪舍夏季降温方式的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验猪舍基本情况

选择北京市大兴区某猪场建筑形式相同的两栋育肥猪舍。其中一栋为湿帘-风机舍,另一栋为单纯风机舍。两栋猪舍的建筑尺寸均为 $60.4\text{ m} \times 8.9\text{ m} \times 3.55\text{ m}$,墙体材料为 240 mm 厚砖墙内外抹灰,四面墙体材料及厚度相同,窗户为单层塑钢窗。南侧纵墙和北侧纵墙各有 20 个 $1.48\text{ m} \times 1.48\text{ m}$ 的窗户,南侧窗户下沿距离舍内地面 0.93 m ,北侧窗户下沿距舍内地面 0.85 m 。猪舍内为单列猪栏单列走道布置方式,走道宽度 1.37 m 。舍内有猪栏 12 个,猪栏尺寸为 $7.40\text{ m} \times 4.67\text{ m}$,钢栏杆猪栏高 0.99 m 。栏内实体地面宽为 2.6 m ,漏缝地板宽为 4.8 m 。每栋猪舍漏缝地板下有 4 个粪坑,坑深 0.7 m ,清粪方式为拔塞式水泡粪方式。每个猪舍有 1 个 2.1 m (高) \times 0.9 m (宽)的门。试验舍设计饲养育肥猪 420 头(猪栏面积为 414.70 m^2 ,每头育肥猪占床面积为 $0.8\sim 1.2\text{ m}^2$ ^[20]),由于条件限制,湿帘-风机降温舍和单纯风机降温舍各

有育肥猪 94 头,种类为长白和大白混合饲养,平均每头体质量为 $100\sim 110\text{ kg}$ 。屋顶为彩钢夹芯板(厚度为 100 mm)双坡屋顶,猪舍设有 2.47 m 高单层彩钢板吊顶。2 栋猪舍均为南北朝向,湿帘位于东墙上,风机位于西墙上。大湿帘尺寸为 2.6 m (宽) \times 1.8 m (高) \times 0.15 m (厚),小湿帘尺寸为 1.3 m (宽) \times 1.8 m (高) \times 0.15 m (厚),湿帘底部距离舍内地面 0.37 m 。风机共有 4 个,型号共有 2 个,2 种型号的风机型号分别为 $1.18\text{ m} \times 1.18\text{ m}$ (大)和 $0.86\text{ m} \times 0.86\text{ m}$ (小)。2 个大风机底部距离舍内地面分别为 0.55 m 和 0.63 m ,2 个小风机底部距离舍内地面分别为 0.85 和 0.93 m 。

试验期为 2015 年 7 月 24 日—8 月 11 日。试验期间两栋猪舍的风机每天均 24 h 开启。单纯风机舍每天 24 h 靠近湿帘一侧的南侧纵墙上 2 个窗户开启(推拉窗,实际每个窗户开启面积为窗户面积的一半),每天 08:00—18:00 东墙上的一个门开启。湿帘-风机舍内湿帘人工开启时间为 10:00—18:00,湿帘开启时门窗全部关闭,每日 18:00—次日 10:00 门窗开启同单纯风机舍。

两栋试验猪舍平面图及测试点布置示意图见图 1。

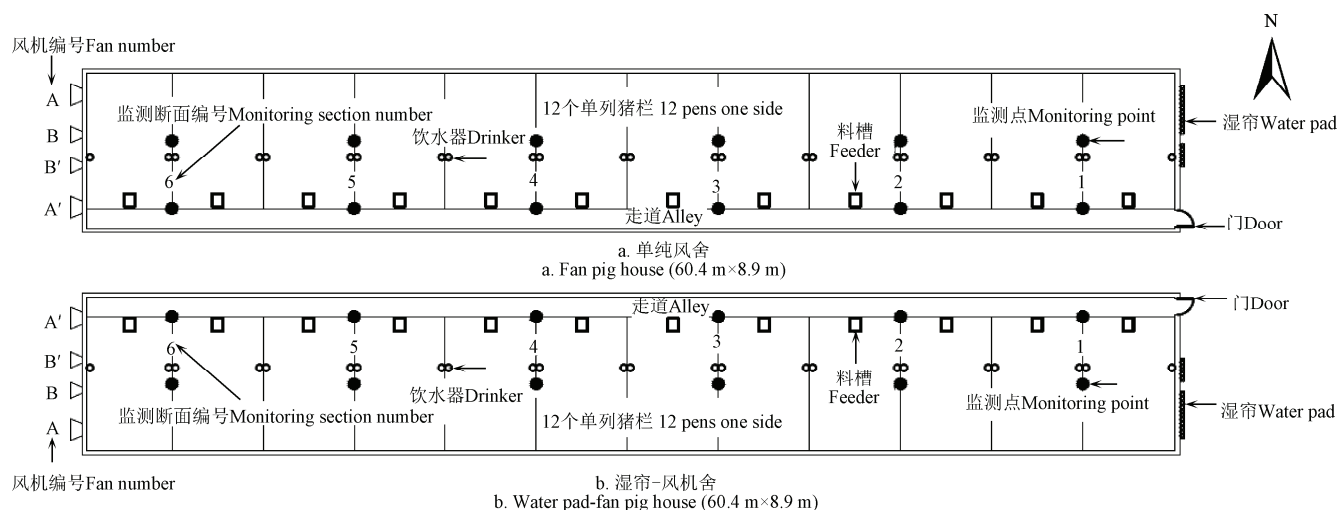


图 1 单纯风机舍和湿帘-风机舍的测量点分布图

Fig.1 Measuring points of fan pig house and water pad-fan pig house

1.2 试验测定指标及方法

1.2.1 猪舍通风量的测定

猪舍风机通风量及湿帘配置的合理性是研究单纯风机降温 and 湿帘-风机降温效果的基本条件。因试验猪舍及环境控制设备为既有猪舍和既有设备,现有风机的通风量等技术参数标识已毁损,为确定猪舍风机目前状态下的通风量,需对风机通风量进行实测。通风量的确定比较困难,通风量的确定方法有风机断面实测法、风速断面法、二氧化碳质量平衡法、示踪气体法和热平衡法^[21]。本试验采用风机断面实测法确定单台风机通风量,借鉴美国农业部南部家禽实验室研制的(FANS)风机风量测试系统^[22],对该系统进行简化设计。

风机 B 由一个 780 mm (长) \times 800 mm (宽) \times 350 mm (厚)的镀锌板底座框和一个 780 mm (长) \times 800 mm (宽)

$\times 200\text{ mm}$ (厚)的风速计安装框架组成测试系统,5 个自动记录式风速仪在水平测试杆上等距安置,风速仪距扇叶 31 cm ,距外框边界 9 cm 。风机 A 由一个 1080 mm (长) \times 1150 mm (宽) \times 550 mm (厚)的镀锌板底座框和一个 1080 mm (长) \times 1150 mm (宽) \times 200 mm (厚)的风速计安装框架组成测试系统,风速仪距扇叶 39 cm ,距外框边界 9 cm 。上下改变测试杆位置,对测试框架内不同测点(风机 A 共 25 个测点,风机 B 共 20 个测点)的风速进行监测,计算框架断面平均风速,根据框架断面平均风速和断面面积得到单台风机通风量。

风速风量测试框架中安装的自动记录式风速仪采用北京天建华仪科技发展有限公司生产的 WFWZY-1 万向风速风温记录仪,该仪表的风速分辨率为 0.01 m/s ,量程为 $0.05\sim 30\text{ m/s}$ 。

试验猪舍西端墙从北向南共 4 台风机：风机 A、风机 B、风机 B'和风机 A'，其中风机 A 和风机 A'型号相同，风机 B 和风机 B'型号相同，先通过测试风机 A 和风机 B 的断面平均风速和断面面积得出二者的通风量，然后通过风机转速与通风量的关系公式（1）^[23]求得风机 A'和风机 B'的通风量。

$$Q_1/N_1=Q_2/N_2 \tag{1}$$

式中 Q_1 、 Q_2 为风机 1 和风机 2 的通风量， m^3/h ； N_1 、 N_2 为风机 1 和风机 2 的转速， r/min 。

风机转速采用自行设计的转速测试仪进行测试，转速测试仪的设计原理为：选择漫反射式光电开关作为转速测量传感器，采用市场上较为普遍、性能稳定的 AT89C51 作为核心微处理器，对由传感器传来的信号进行处理、计算，将计算后的转速显示到 LED 数码管上。风速转速测试仪的连接示意图见图 2。

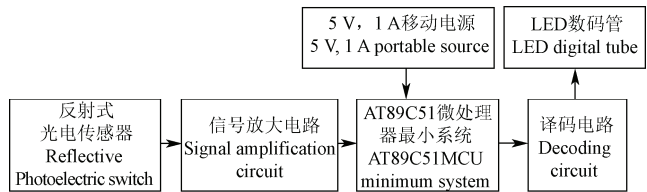


图 2 风机转速测试仪连接示意图

Fig.2 Connecting schematic diagram of speed tester of fan

漫反射式光电开关在测量范围内检测到目标物体（即风机扇叶时），会产生一个由低电平至高电平的跳变信号，从而触发单片机的外部中断，进入至中断函数体中对变量 Num 进行加‘1’操作。与此同时开启单片机定时器，当定时器计时 1 min 时对 Num 变量进行处理，计算出每分钟的风机转速（ r/min ），并将转速值显示至 LED 数码管上。

1.2.2 舍内、外环境指标和湿帘用水量的测定

舍内环境指标主要测定温湿度和风速。舍外环境指标主要测定温湿度。猪舍内不同断面温、湿度及风速监测：每隔两猪栏为一监测断面，从湿帘端到风机端共设 6 个断面（见图 1），且每一监测断面分猪栏和走道 2 个监测点，各监测点监测高度略高于育肥猪猪背高度。

舍内、外温湿度监测仪器采用 Apresys 179A-TH 温湿度自动记录仪 24 h 自动记录（精度分别为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\pm 1.8\%$ ），每 30 min 记录 1 次，舍内温湿度自动记录仪每个监测点布置 1 个，共 12 个温湿度监测点。舍外温、湿度自动记录仪布置 3 个，放置在气象专用百叶箱中，测点高度采用中国气象站的测定高度（1.5 m），百叶箱置于室外空旷无遮阴处。舍外温度取 3 个舍外温度计的平均值。

舍内不同断面风速的测定采用 MODEL6004 热线式风速仪测定，该风速仪测量范围 0.1~20 m/s，测定精度 0.1 m/s 或指示值的 5%。测量舍内风速时 1 个监测点记录 30 个数据，取平均值，每栋猪舍内共布置 12 个风速监测点。舍内风速测试时间为 2015 年 7 月 25 日—8 月 11 日，每日测定时间为 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和

18:00。

舍内猪只呼吸频率的测定是在环境温度较高的 12:00 和 14:00 时进行的，测定方法为采用人工秒表数出 1 min 计数侧腹起伏次数^[24]。

湿帘用水量监测：在湿帘进水端安装水表，监测湿帘每日用水量，每日上午 08:00 读数 1 次。每日上午 08:00 的水表读数减去前 1 天该时刻的读数为前 1 天的湿帘用水量。

2 结果与分析

2.1 猪舍通风量试验结果

试验测得 4 台风机的转速和风机 A 和风机 B 的断面平均风速，见表 1。根据公式（1）和 2 种型号风机的断面平均风速和断面面积得出 4 台风机的通风量，见表 1。

表 1 四台风机的通风量
Table 1 Ventilation rate of four fans

风机编号 Fan no.	风机转速 Fan rotation rate/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	断面平均风速 Section average wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	断面面积 Section area/ m^2	风机通风量 Fan ventilation rate/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
A	753	4.67	1.242	20 880.50
B	1 507	4.69	0.624	10 535.62
B'	1 324		0.624	9 256.24
A'	749		1.242	20 769.58
合计 Total				61 441.94

猪舍的通风量为 4 台风机通风量之和，因此猪舍的总通风量 61 441.94 m^3/h 。湿帘-风机猪舍和单纯风机猪舍安装的风机型号和数量相同，在此认为两栋试验猪舍的通风量均为 61 441.94 m^3/h 。

2.2 猪舍通风量和湿帘配置的合理性校核

育肥猪 34~100 kg 时夏季育肥猪舍内参考通风量为 127.35~203.76 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{头})$ ^[25]，每栋试验舍设计饲养育肥猪 420 头，则每栋试验舍夏季共需通风量为 53 487~85 579 m^3/h 。实测猪舍夏季风机通风量为 61 441.94 m^3/h 。实测通风量满足猪舍设计的基本要求。在蒸发降温的情况下，过帘风速设计为 1.0~1.7 m/s，试验舍的设计所需夏季风机通风量为 53 487~85 579 m^3/h ，故湿帘面积最小值应为 53 487 \times (1.0~1.7)/3 600=8.7~14.0 m^2 。本试验中湿帘面积为(2.6+1.3) $\text{m}\times$ 1.8 m =7.02 m^2 ，面积稍小于湿帘面积最小值。因此，此湿帘-风机舍的湿帘和风机系统配置基本合理。

2.3 湿帘-风机舍、单纯风机舍舍内风速分布

为对比湿帘-风机猪舍和单纯风机猪舍内不同断面风速，选择数据记录完全的 2015 年 7 月 25 日、2015 年 7 月 27 日—7 月 31 日，2015 年 8 月 3 日—8 月 9 日共 13 d，每日 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00 共 6 个断面猪栏部位的风速值，将同一时刻 1、2、3、4、5 和 6 断面猪栏测点的风速数据用 SPSS17.0 软件统计分析同一时刻、同一试验舍不同断面之间的风速差异性，结果见表 2，风速值的表达方式为平均值 \pm SD。

由表 2 可知，湿帘-风机猪舍 6 个断面风速范围为 0.51~0.84 m/s；08:00—10:00 时，湿帘-风机猪舍断面 1（湿帘端）和断面 6（风机端）风速差异不显著（ $P>0.05$ ）；

12:00—18:00, 断面 1 风速显著高于 2~6 断面风速 ($P<0.05$)。断面 1 风速大于断面 2~6 风速主要因为 10:00—18:00 湿帘开启时间猪舍门窗全关闭, 新风从湿帘端进入猪舍, 湿帘面积小于该猪舍断面面积, 距离湿帘近的部位因为进风断面面积的减小造成该部位附近断面 1 风速大于远离湿帘端各断面风速。

表 2 湿帘-风机舍和单纯风机舍不同时刻各断面猪栏风速
Table 2 Wind speed above pen at different section in water pad-fan and fan pig house at different time

种类 Types	断面编号 Section number	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
湿帘风机舍 Water pad-fan pig house	1	0.51±0.34b	0.66±0.31a	0.74±0.26a	0.84±0.16a	0.74±0.18a	0.81±0.18a
	2	0.69±0.14a	0.57±0.15ab	0.60±0.10b	0.65±0.10b	0.54±0.10b	0.62±0.10b
	3	0.57±0.13ab	0.53±0.09b	0.56±0.07b	0.60±0.05b	0.60±0.08b	0.58±0.10b
	4	0.60±0.11ab	0.56±0.11a	0.55±0.05b	0.50±0.08c	0.57±0.07b	0.57±0.09b
	5	0.61±0.07ab	0.61±0.06a	0.59±0.06b	0.58±0.07b	0.57±0.07b	0.57±0.06b
	6	0.65±0.09ab	0.63±0.05a	0.62±0.05b	0.62±0.05b	0.61±0.06b	0.62±0.04b
单纯风机舍 Fan pig house	1	0.51±0.41a	0.61±0.34ab	0.65±0.30a	0.58±0.34a	0.61±0.32a	0.64±0.29a
	2	0.55±0.13a	0.51±0.13b	0.58±0.11ab	0.55±0.11a	0.62±0.14a	0.58±0.17a
	3	0.53±0.11a	0.51±0.06b	0.51±0.12b	0.52±0.09a	0.58±0.09a	0.55±0.09a
	4	0.58±0.10a	0.62±0.07ab	0.58±0.09ab	0.56±0.10a	0.56±0.09a	0.63±0.07a
	5	0.65±0.10a	0.62±0.08ab	0.62±0.07ab	0.58±0.11a	0.63±0.11a	0.64±0.10a
	6	0.66±0.10a	0.65±0.08a	0.68±0.10a	0.65±0.11a	0.64±0.10a	0.62±0.12a

注: 不同小写字母表示同一试验舍同列间数据差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercases indicate significant difference among the same columns in the same experimental pig house, at 0.05 level.

单纯风机舍试验各时刻断面 1 和断面 6 风速差异不显著 ($P>0.05$), 6 个断面风速范围为 0.51~0.68 m/s。单纯风机舍 1 断面风速在该猪舍进风端进风口面积除了没有上水的湿帘外, 还有打开的 2 扇窗户和 1 个门, 因此, 在通风量基本相同情况下, 单纯风机猪舍断面 1 风速 (0.58~0.65 m/s) 在 12:00—18:00 小于湿帘-风机猪舍断面 1 风速 (0.74~0.84 m/s)。育肥猪舍内夏季风速的适宜值为 1.0 m/s^[26], 该两栋猪舍内风速稍低。

利用 SPSS20.0 对风机舍和湿帘-风机舍共 13 d 同一编号断面测得所有风速进行了差异显著性分析, 结果见表 3。

表 3 湿帘-风机舍和单纯风机舍同一断面风速对比
Table 3 Wind speed at same section in water pad-fan pig house and fan pig house

断面编号 Section number	湿帘-风机舍 Water pad-fan pig house	单纯风机舍 Fan pig house
1	0.72 a	0.60 b
2	0.61 a	0.56 a
3	0.57 a	0.53 a
4	0.56 a	0.59 a
5	0.58 a	0.62 a
6	0.62 a	0.64 a
均值 Average	0.61 a	0.59 a

注: 不同小写字母表示同列间数据差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercases indicate significant difference among the same columns, at 0.05 level.

由表 3 可知, 湿帘-风机舍和单纯风机舍断面 1 风速是湿帘-风机舍显著大于单纯风机舍 ($P<0.05$), 两舍其他断面均差异不显著 ($P>0.05$)。湿帘-风机舍和单纯风机舍综合风速差异不显著 ($P>0.05$)。

2.4 两猪舍降温期间温湿度对比
将每一时刻各舍温湿度平均值 (每个舍 12 个测点, 即 6 个所测断面的平均值) 和室外温湿度平均值分别进行作图, 见图 3。

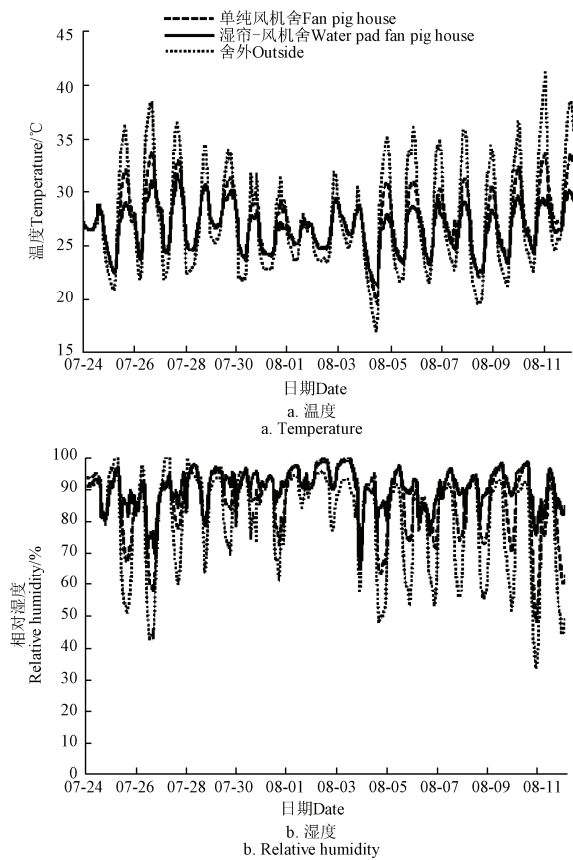


图 3 舍内外温湿度对比
Fig.3 Comparison of temperature and relative humidity inside and outside two pig houses

图 3 中，试验期间 2015 年 7 月 24 日 00:00—8 月 11 日 17:00 中，室外温度范围 17.1~41.1℃，舍外相对湿度范围 33.6%~100%；单纯风机舍舍内平均温度范围 19.6~33.8℃，相对湿度范围 48%~100%；湿帘-风机舍舍内平均温度范围 21.3~31.7℃，相对湿度范围 65%~100%。

湿帘-风机舍降温幅度较大的 2 个时刻分别为 2015 年 8 月 10 日 15:00 和 16:00。2015 年 8 月 10 日 15:00，舍外温度和相对湿度分别为 41.1℃和 33.6%，此刻湿帘-风机舍舍内温度和相对湿度分别为 28.8℃（较舍外降低 12.3℃）和 75.8%；单纯风机舍舍内温度和相对湿度分别为 33.5℃（较舍外降低 7.6℃）和 48.5%。2015 年 8 月 10 日 16:00，舍外温度和相对湿度分别为 41.1℃和 38.0%，此刻湿帘-风机舍舍内温度和相对湿度分别为 28.9℃（较舍外降低 12.2℃）和 80.4%；单纯风机舍舍内温度和相对湿度分别为 33.3℃（较舍外降低 7.8℃）和 52.0%。湿帘-风机舍降温幅度较大的 2 个时刻舍外温、湿度为试验期间温度最高和相对湿度最低的时刻。湿帘-风机舍最高降温幅度较舍外降低 12.3℃，该时刻单纯风机舍较舍外降低 7.6℃，二者降温幅度相差 4.7℃。

湿帘-风机降温幅度较低的时刻为 2015 年 7 月 27 日 14:00，该时刻舍外温度和相对湿度分别为 36.5℃和 60.1%，此刻湿帘-风机舍舍内平均温度为 31.7℃（较舍外降低 4.8℃）和 84.5%，单纯风机舍舍内平均温度和相对湿度分别为 32.9℃（较舍外降低 3.7℃）和 78.0%。

蒸发降温是一个绝对加湿的过程，通过水分的蒸发降低空气温度，在这个过程中，显热转化为潜热，并且高湿环境会减弱蒸发降温的效果，很多的研究表明蒸发冷却在干燥高温地区有很好的降温效果。上述结果表明，在北京地区，湿帘-风机降温在高温、低湿的时段降温效果较好。

为分析在北京地区使用湿帘-风机降温 and 单纯风机降

温的猪舍在夏季降温的整体情况，对试验期间 2015 年 7 月 24 日 00:00—8 月 11 日 17:00 的 450 h 内两猪舍的温度分布范围进行了统计，结果见表 4。

由表 4 可知，在试验期间的 450 h 中，湿帘-风机猪舍和单纯风机猪舍舍内温度低于 28.0℃的小时数占比分别为 71.6%和 61.8%，高于 30.0℃的小时数占比分别为 5.0%和 20.2%。可见，湿帘-风机降温方式在北京地区使用时并不能将舍内温度全部控制在 30.0℃以内，但是与单纯风机降温相比，可以将舍内温度高于 30.0℃的小时数占比从 20.2%降低为 5.0%。

表 4 单纯风机舍、湿帘-风机舍内不同温度分布范围的时长
Table 4 Hours of different temperature in fan pig house and water pad-fan pig house

单纯风机舍 Fan pig house			湿帘-风机舍 Water pad-fan pig house		
温度 Temperature/℃	小时数 Hours/h	占比 Percent/%	温度 Temperature/℃	小时数 Hours/h	占比 Percent/%
19.58~27.9	278	61.8	21.34~27.9	322	71.6
28.0~29.9	81	18.0	28.0~29.9	107	23.8
30.0~33.8	91	20.2	30.0~31.7	21	5.5
合计 Total	450	100		45	100

注：试验日期：2015-07-24 00:00 至 08-11 17:00。
Note: Testing time was from 2015-07-24 00:00 to 08-11 17:00.

2.5 两猪舍内不同断面温、湿度对比

为对比湿帘-风机猪舍和单纯风机猪舍内不同断面温湿度，选择湿帘-风机降温效果较好的 2015 年 7 月 26 日、8 月 9 日和 8 月 10 日湿帘和风机均运行时段 10:00-18:00 的温湿度数据，将同一时刻 1、2、3、4、5 和 6 断面猪栏和走道各 1 个测点的温、湿度数据按照同一断面求平均，将 3 d 同一时刻的同一断面的温湿度值用 SPSS17.0 软件统计分析不同断面同一时刻的温湿度差异性，结果见表 5 和表 6。

表 5 湿帘-风机舍和单纯风机舍各断面温度
Table 5 Temperature at different sections in water pad-fan house and fan pig house at different time

处理 Treatment	断面编号 Section no.	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
湿帘风机舍 Water pad-fan pig house	1	27.9±0.3b	28.1±0.3c	28.2±0.4c	28.6±0.5c	28.6±1.4b	28.5±1.0b	28.9±1.4a	29.0±1.5a	29.6±1.3a
	2	27.9±0.8b	28.5±0.7bc	28.3±0.6c	28.7±0.8c	29.1±1.5ab	28.5±1.1b	29.0±1.7a	28.8±1.6a	29.5±1.3a
	3	28.4±0.7ab	29.0±0.6ab	29.0±0.5b	29.5±0.6bc	29.6±1.1ab	29.4±0.9ab	29.6±1.2a	29.4±1.2a	29.7±1.1a
	4	28.8±0.7ab	29.4±0.6ab	29.6±0.3ab	30.1±0.5ab	30.3±0.9ab	30.0±0.7a	30.2±1.0a	29.8±0.9a	29.9±1.0a
	5	29.1±0.6a	29.8±0.5a	30.0±0.3a	30.6±0.5a	30.8±0.8a	30.6±0.7a	30.5±0.8a	30.1±0.6a	30.0±0.8a
	6	29.1±0.5a	29.8±0.5a	30.1±0.3a	30.7±0.4a	30.8±0.6a	30.6±0.5a	30.5±0.6a	30.1±0.5a	30.0±0.8a
单纯风机舍 Fan pig house	1	30.8±1.1a	31.8±1.0a	32.5±0.9a	33.0±0.9a	33.4±0.8a	33.8±0.8a	33.2±0.7a	32.3±0.7a	31.1±0.9a
	2	30.4±0.9a	31.6±0.8a	32.2±0.8a	33.0±0.8a	33.4±0.7a	33.6±0.9a	33.4±0.7a	32.8±0.7a	31.9±0.7a
	3	30.2±0.8a	31.3±0.8a	32.1±0.8a	32.7±0.7a	33.0±0.6a	33.2±0.7a	32.9±0.6a	32.2±0.6a	31.3±0.7a
	4	30.1±0.8a	31.1±0.8a	31.8±0.7a	32.3±0.6a	32.7±0.6a	32.8±0.7a	32.5±0.6a	31.9±0.5a	31.0±0.6a
	5	30.5±0.8a	31.5±0.7a	32.1±0.8a	32.8±0.7a	33.2±0.7a	33.3±0.7a	33.0±0.6a	32.4±0.6a	31.5±0.6a
	6	30.0±0.7a	30.9±0.6a	31.4±0.7a	32.4±0.8a	32.7±0.8a	32.8±0.7a	32.5±0.5a	31.6±1.0a	30.6±0.9a

注：不同小写字母表示同一试验舍同列间数据差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercases indicate significant difference among the same columns in the same experimental pig house, at 0.05 level.

表 6 湿帘-风机舍和单纯风机舍各断面相对湿度
Table 6 Relative humidity at different sections in water pad-fan house and fan pig house at different time

处理 Treatment	断面编号 Section no.	% 10:00 11:00 12:00 13:00 14:00 15:00 16:00 17:00 18:00								
		10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
湿帘风机舍 Water pad-fan pig house	1	90.1±8.3a	90.4±6.0a	90.5±5.1a	89.1±5.0a	87.5±5.2a	87.6±5.1a	86.2±8.8a	87.3±9.4a	85.1±8.0a
	2	87.3±12.4a	86.4±10.7a	86.8±8.9a	85.0±8.0b	83.5±9.1ab	86.1±5.2a	82.3±12.0a	85.2±9.6a	82.5±9.3a
	3	87.3±10.2a	85.4±10.4a	84.9±8.0a	82.2±8.8b	81.1±7.6ab	81.0±7.8ab	80.9±10.2a	83.5±8.8a	82.6±8.1a
	4	86.5±9.8a	84.8±9.2a	83.3±7.7a	80.5±8.4b	79.2±7.6ab	79.2±7.4ab	79.4±9.2a	82.4±7.5a	83.1±7.4a
	5	83.0±9.3a	80.9±9.6a	77.9±8.9a	75.8±9.1b	74.1±8.4ab	74.1±8.0b	75.2±8.7a	78.7±7.0a	80.3±7.0a
	6	81.4±7.8a	78.3±8.2a	76.8±7.7a	74.5±8.1b	73.4±7.3b	73.5±6.6b	74.5±7.3a	78.2±5.7a	80.0±5.4a
单纯风机舍 Fan pig house	1	72.6±12.5a	66.9±13.5a	63.9±11.6a	61.5±12.4a	57.9±11.7a	56.7±11.1a	59.7±11.0a	67.8±9.3a	76.2±7.6a
	2	75.1±10.8a	68.8±11.2a	66.1±11.0a	62.4±9.8a	60.7±10.6a	58.7±10.8a	60.0±9.9a	64.6±8.8a	71.1±7.6a
	3	74.1±11.3a	67.9±12.0a	64.7±11.4a	62.5±10.9a	59.6±11.1a	58.2±10.1a	60.1±10.2a	66.1±8.5a	72.2±6.8a
	4	74.6±10.8a	69.0±12.4a	66.2±11.6a	63.4±10.8a	60.9±10.8a	59.6±10.4a	61.1±10.1a	66.6±7.8a	72.7±6.2a
	5	74.1±10.8a	68.3±12.1a	65.7±11.2a	62.3±11.2a	60.2±12.2a	58.7±11.3a	60.4±10.2a	66.6±7.2a	73.3±6.6a
	6	78.2±8.1a	73.3±8.8a	71.0±9.5a	66.0±10.8a	64.1±11.8a	61.9±12.3a	65.3±9.1a	69.5±8.2a	75.4±6.5a

注：不同小写字母表示同一试验舍同列间数据差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercases indicate significant difference among the same columns in the same experimental pig house, at 0.05 level.

由表 5 可知，湿帘-风机舍 10:00—18:00 之间，同一时刻断面 1 温度比断面 6 低 0.4 ~2.2℃，其中 16:00、17:00 和 18:00 三个时刻同一时刻不同断面温度差异不显著（ $P>0.05$ ），10:00-15:00 同一时刻断面 1 温度显著比断面 6 低 1.2~2.2℃（ $P<0.05$ ）。

由表 5 和表 6 可知，单纯风机舍各时刻不同断面的温度差异不显著（ $P>0.05$ ），单纯风机舍各时刻不同断面的相对湿度差异不显著（ $P>0.05$ ），湿帘-风机舍在 10:00、11:00、12:00、16:00、17:00、18:00 时不同断面的相对湿度差异不显著（ $P>0.05$ ），湿帘-风机舍在 13:00、14:00、15:00 时不同断面的相对湿度差异显著（ $P<0.05$ ）。

利用 SPSS20.0 对 2015 年 7 月 26 日—8 月 11 日(全天)风机舍和湿帘-风机舍所有测点的温、湿度进行了差异显著性分析，结果见表 7。

表 7 湿帘-风机舍与单纯风机舍的温湿度对比
Table 7 Temperature and relative humidity in water pad-fan pig house, fan pig house

处理 Treatment	温度 Temperature/℃	相对湿度 Relative humidity/%
舍外 Outside	27.68±4.87a	80.55±15.40c
单纯风机舍 Fan pig house	27.36±2.77a	86.55±10.32b
湿帘-风机舍 Water pad-fan pig house	26.62±2.17b	90.18±6.33a

注：不同小写字母表示同列间数据差异显著（ $P<0.05$ ），下同。
Note: Different lowercases indicate significant difference among the same columns, at 0.05 level, the same as below.

由表 7 可知，舍外温度和单纯风机舍舍内温度差异不显著（ $P>0.05$ ），湿帘-风机舍舍内温度显著低于单纯风机舍舍内温度和舍外温度（ $P<0.05$ ）。湿帘-风机舍舍内相对湿度显著高于单纯风机舍舍内相对湿度和舍外相对湿度，单纯风机舍舍内相对湿度显著高于舍外相对湿度。

2.6 两猪舍猪只呼吸频率比较

利用 SPSS20.0 对单纯风机舍和湿帘-风机舍 2015 年 7 月 25 日—8 月 10 日每日 12:00 和 14:00 的温度和猪只呼吸频率进行差异显著性分析，结果见表 8。

表 8 湿帘-风机舍和单纯风机舍的温度及猪只呼吸频率
Table 8 Temperature and respiration rate of pigs in water pad-fan pig house and fan pig house

处理 Treatment	12:00 呼吸频率 Respiration rate	12:00 温度 Temperature	14:00 呼吸频率 Respiration rate	14:00 温度 Temperature
单纯风机舍 Fan pig house	59.37±11.73a	29.82±1.78a	59.72±11.67a	30.67±1.96a
湿帘-风机舍 Water pad-fan pig house	55.55±10.28b	28.33±1.03b	56.67±11.62b	28.97±1.24b

注：试验日期：2015-07-25 至 08-10。
Note: Testing time was from 2015-07-25 to 08-10.

由表 8 可知，在 12:00 和 14:00 时，单纯风机舍内温度均显著高于湿帘-风机舍（ $P<0.05$ ），单纯风机舍内的猪只呼吸频率均显著高于湿帘-风机舍舍内呼吸频率 3.82 次/min（12:00）和 3.05 次/min（14:00）（ $P<0.05$ ）。

猪只汗腺不发达，通过皮肤蒸发散热的能力有限，超过热中性区上限后猪主要靠喘息提高蒸发散热量，因此呼吸频率的变化可以在一定程度上反应猪对温度变化的适应情况。本试验研究结果表明在温度为 28℃时，育肥猪的呼吸频率为 55~56 次/min，在环境温度为 29~30℃时，猪只的呼吸频率为 60 次/min。有研究发现，80 kg 左右的育肥猪在 18~24℃时呼吸频率无明显变化（44.7~47.5 次/min），在温度超过 24℃时呼吸频率快速增加，平均每升高 1℃增加 3.0~3.3 次/min，在环境温度为 28℃时，呼吸频率为 60.7 次/min，环境温度为 32℃时，呼吸频率为 72.6 次/min^[27-28]，与本试验研究结果基本相符。

2.7 湿帘用水量

在试验的 19 d 中，选取降温幅度较好的 10 d，由湿帘-风机舍湿帘的用水量与最大降温幅度（舍外温度-舍内温度）制得表 9 进行比较。

由表 9 可知，湿帘日用水量为 1.20~6.27 m³，最大降温幅度为 4.0~12.3℃。由于舍外温湿度对降温幅度的影响，所以最大降温幅度不一定随着湿帘用水量的增加而增大。

表 9 湿帘用水量及最大降温幅度

Table 9 Water consumption and cooling range of water pad-fan system

日期 Date	用水量 Water consumption/m ³	最大降温幅度 Most temperature difference/℃
07-25	2.65	7.3
07-26	4.20	8.2
07-27	6.27	5.4
07-30	3.70	4.0
08-06	1.20	6.7
08-07	1.55	6.9
08-08	1.50	6.4
08-09	1.71	7.2
08-10	2.76	12.3
08-11	2.55	8.5

3 讨 论

试验猪舍中猪只头数为 94 头, 设计猪舍满载头数为 420 头, 为探讨饲养密度对降温效果的影响, 对试验状况和满载情况猪舍新风进风温度的变化进行了理论分析。

一头 100 kg 的育肥猪在 20 ℃ 时的全热产热量经计算为 215 W, 在舍内温度为 25 ℃ 时, 一头 100 kg 的育肥猪舍内温度为 20 ℃ 时全热量乘以调整系数 $(1+4\times 10^{-5}(20-t)^3=0.995)$ 后为 214 W, 显热量经计算约为全热的 55.5%^[29]。试验育肥猪舍满载 420 头猪和试验状况 94 头猪比较, 假设每头猪平均体质量为 100 kg, 则在舍内温度为 25 ℃ 时, 满载比试验状况多产显热量为 $214\text{ W}\times(420-94)\times 55.5\% = 38\,719\text{ W}$ 。试验猪舍体积为 $60.4\text{ m}\times 8.9\text{ m}\times 2.47\text{ m} = 1\,327.77\text{ m}^3$, 试验猪舍通风量为 $61\,441.94\text{ m}^3/\text{h} = 17.07\text{ m}^3/\text{s}$, 通风换气次数为 46 次/h。假设新风进风温度为 $t_{n1}=25\text{ }^\circ\text{C}$, 在此状况下, 满载比试验状况多产的显热量 $Q_s=38\,719\text{ W}$, 可提高试验猪舍新风进风温度, 理论公式^[30]为:

$$Q_s=G_w c_p(t_{n2}-t_{n1}) \quad (2)$$

式中 G_w 为新风通风量, kg/s。在此, 猪舍内空气密度为 $1.146\text{ kg}/\text{m}^3$ ^[31], $G_w=19.56\text{ kg}/\text{s}$; c_p 为舍内空气的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, 在此为 $1.013\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ^[31]; t_{n2} 为猪体产热将猪舍内新风通风量温度由 25 ℃ 提高至的温度, ℃; t_{n1} 为猪舍新风进风温度, ℃, 在此取 25 ℃。

由公式 (2) 可得, 满载猪只时, 现有新风通风量情况下, 与现有饲养密度相比, 猪体增加的显热量可将新风进风温度由 25 提高至 27 ℃, 即提高 2.0 ℃。

可见, 在相同的通风量时, 饲养密度不同降温效果不同。试验猪舍在满载时若要达到本试验条件相同的降温效果, 通风量需要增大, 增大的通风量可通过公式 (2) 计算。

4 结 论

1) 在猪舍通风量和湿帘配置基本合理情况下, 猪舍是否使用湿帘对猪舍整体风速无显著影响。

2) 湿帘-风机降温系统能够显著改善北京市育肥猪舍的环境条件。试验期间, 湿帘-风机舍内温度显著低于单纯风机舍 ($P<0.05$)。在北京地区使用时, 湿帘-风机

降温系统与单纯风机相比, 可以将舍内温度高于 30.0 ℃ 的小时数占比从 20.2% 降低为 5.0%。

3) 湿帘-风机降温系统在改善猪舍内环境的同时, 也改变了猪舍内部的温度分布均匀度。在 10:00—15:00 舍外温度较高时, 湿帘-风机舍内温度分布不均匀, 从断面 1 (湿帘端) 到断面 6 (风机端) 温度逐渐上升 ($P<0.05$)。16:00—18:00, 湿帘-风机舍内温度值均匀, 湿帘的使用不会造成各断面温度有较大影响。无论什么时间段, 只使用风机不使用湿帘时各断面温度值较为均匀。

4) 湿帘-风机降温系统能够显著改善育肥猪的生理状况。试验期间, 单纯风机舍内的猪只呼吸频率均显著高于湿帘-风机舍舍内呼吸频率 3.82 次/min (12:00) 和 3.05 次/min (14:00) ($P<0.05$)。

5) 湿帘-风机降温系统的最大降温幅度不一定随着湿帘用水量的增加而增大。试验期间, 当湿帘日用水量最大时 ($6.27\text{ m}^3/\text{d}$), 当天最大降温幅度为 5.4 ℃; 当湿帘日用水量为 $2.76\text{ m}^3/\text{d}$ 时, 当天最大降温幅度达到试验期间最大值 (12.3 ℃)。

[参 考 文 献]

- [1] Verstegen M W A, Aarnink A J A, Huynh T T T, et al. Effects of floor cooling during high ambient temperatures on the lying behavior and productivity of growing finishing pigs[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2004, 47(5): 1773—1782.
- [2] Renaudeau D, Gourdiere J L, St-Pierre N R. A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs [J]. Journal of Animal Science, 2011, 89: 2220—2230.
- [3] Renaudeau D, Anais C, Tel L, et al. Effect of temperature on thermal acclimation in growing pigs estimated using a nonlinear function[J]. Journal of Animal Science, 2010, 88(11): 3715—3724.
- [4] Philippe F X, Cabaraux J F, Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 141(3/4): 245—260.
- [5] Kosmos S R, Riskowski G L, Christianson L L. Force and static pressure resulting from airflow through screen[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(5): 1467—1472.
- [6] Arbel A, Yekutieli O, Barak M. Performance of a fog system for cooling greenhouses[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(2): 129—136.
- [7] Sethi V P, Sharma S K. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications[J]. Solar Energy, 2007, 81(12): 1447—1459.
- [8] 赵淑梅, 山口智治, 周清, 等. 现代温室湿帘风机降温系统的研究[J]. 农机化研究, 2007(9): 147—152.
Zhao Shumei, Tomoharu Yaguchi, Zhou Qing, et al. Study on pad and fan cooling system in modern greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(9): 147—152. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张璐瑶, 黄翔, 李鑫. 湿帘降温系统在陕西某温室的降温特性[J]. 西安工程大学学报, 2014, 28(3): 333—337.

- Zhang Luyao, Huang Xiang, Li Xin. Cooling performance of evaporative cooling pad-fan unit in greenhouse in shanxi[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2014, 28(3): 333—337. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王铁良, 李天来, 白义奎, 等. 湿帘降温系统在东北型节能日光温室中的降温效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2007(6): 837—840.
- Wang Tieliang, Li Tianlai, Bai Yikui, et al. Experimental research on the application of wet screen-air blower cooling system in northeast style energy saving solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007(6): 837—840. (in Chinese with English abstract)
- [11] 胥芳, 蔡彦文, 陈教科, 等. 湿帘-风机降温下的温室热/流场模拟及降温系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 35(9): 201—208.
- Xu Fang, Cai Yanwen, Chen Jiaoliao, et al. Temperature/flow field simulation and parameter optimal design for greenhouse with fan-pad evaporative cooling system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2015, 35(9): 201—208. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张树阁, 宋卫堂, 滕光辉, 等. 湿帘风机降温系统安装高度对降温效果的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 91—94.
- Zhang Shuge, Song Weitang, Teng Guanghui, et al. Cooling effect of different insulation height of wet-curtain fan-cooling system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 91—94. (in Chinese with English abstract)
- [13] Xu J, Li Y, Wang R Z, et al. Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates[J]. Applied Energy, 2015, 138(6): 291—301.
- [14] Wang C Y, Cao W, Li B M, 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): 370—375.
- [15] 龚建军, 雷云峰, 何志平, 等. 高温季节“湿帘-风机”系统降温效果研究[J]. 家畜生态学报, 2016, 37(1): 46—52.
- Gong Jianjun, Lei Yunfeng, He Zhiping, et al. Investigation on cooling effect of cooling pad-fan system during hot season[J]. Acta Ecologiae Animals Domastici, 2016, 37(1): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [16] 蒲洪洲, 郭宗义, 王金勇, 等. 湿帘风机降温系统在高温高湿地区猪场降温效果的研究[J]. 猪业科学, 2016, 33(6): 92—93.
- [17] 卢真真, 吴中红, 王美芝, 等. 湿帘风机降温系统对鸡舍必需通风量的影响[J]. 动物生产, 2008, 44(23): 50—54.
- Lu Zhenzhen, Wu Zhonghong, Wang Meizhi, et al. Effects of pad and fan cooling system on necessary ventilation rate of hen house[J]. Animal production, 2008, 44(23): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [18] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [19] 王美芝, 田见晖, 刘继军, 等. 北京市繁殖猪舍高温环境控制状况[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 222—227.
- Wang Meizhi, Tian Jianhui, Liu Jijun, et al. Environment control status of high temperature in reproductive piggery in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 222—227. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17824.1-2008, 规模猪场建设[S].
- [21] Sun G, Guo H Q, Peterson J, et al. Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms laguë[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, 58: 1434—1448.
- [22] Gates R S, Casey K D, Xin H, et al. Fan assessment numeration system (fans) design and calibration specifications[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1709—1715.
- [23] Blunden J, Aneja V P, Westerman P W, et al. Measurement and analysis of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a mechanically ventilated swine confinement building in North Carolina[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 3315—3331.
- [24] Scharf B, Michael J L, Robert L W, et al. Determinants of bovine thermal response to heat and solar radiation exposures in a filed environment[J]. International Journal of Biometeorology, 2011, 55(4): 469—480.
- [25] Midwest Plan Service Structures and Environment Handbook[M]. 1983.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T17824.3—2008, 规模猪场环境参数及环境管理[S].
- [27] Brown-brandl T M, Elgenberg R A, Nienaber J A, et al. Thermoregulatory profile of a newer genetic line of pigs[J]. Livestock Production Science, 2001, 71(2/3): 253—260.
- [28] Brown-brandl T M, Nienaber J A, Turner L W, et al. Acute heat stress effects on heat production and respiration rate in swine[J]. Journal of Animal Science, 2005, 83(6): 1385—1396.
- [29] Pedersen, S & Sällvik, K. CIGR, 4th report of working group on climatization of animal houses heat and moisture production at animal and house levels[C]//Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences: International Commission of Agricultural Engineering, Section II. Denmark, 2002.
- [30] 马最良, 姚杨. 民用建筑空调设计[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [31] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

Cooling effect of water pad-fan system for fattening pig houses in Beijing

Wang Meizhi^{1,2}, Zhao Wanying¹, Liu Jijun^{1,2}, An Tao¹, Yi Lu¹, Wang Gang³, Wu Zhonghong^{1,2*}

(1. College of Animal Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Beijing 100193, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: High temperature in summer will cause serious impact on the production performance of pigs. So it is very important to control temperature in the pig houses in Beijing, China. An experiment was conducted to compare the cooling effect of the water pad-fan and only fan in pig house in Beijing from July 24th to August 11th, 2015. Before testing the cooling effect, a manual test system for measuring fan ventilation rate was designed and applied to check if the ventilation rate of the experimental pig houses was appropriate. The water pad-area for the experimental pig house was checked too. A total of 188 finishing pigs (each pig 100-110 kg) were prepared for the experiment and divided into 2 pig houses averagely. Temperature and relative humidity outside the pig houses and temperature, relative humidity and wind speed at 6 sections in the pig houses were monitored. The results showed that the ventilation rate and water pad-area were up to the standard recommended by “Midwest Plan Service Structures and Environment Handbook”. During the experimental period, the wind speed range at Section 1-6 in the water pad-fan pig house and the fan pig house was 0.51-0.84 and 0.51-0.68 m/s, respectively. There was insignificant difference between the water pad-fan pig house and the fan pig house for whole wind speed ($P>0.05$). The water pad-fan system could reduce the temperature inside the pig house by 12.3 °C at most compared to the temperature outside while the fan system could reduce the temperature inside the pig house by 7.6 °C compared to the temperature outside in the same experimental period. But when the temperature and relative humidity outside the pig houses were 36.5 °C and 60.1%, respectively, the water pad-fan system could not control the temperature inside the pig house below 31.7 °C. During the 450 h experimental period, the time percentage for the water pad-fan pig house and fan pig house with indoor temperature of below 28.0 °C was 71.6% and 61.8%, respectively, and that above 30.0 °C was 5.0% and 20.2%, respectively. The temperature at Section 1 was 0.4-2.2 °C lower than that at Section 6 in the water pad-fan pig house while the temperature difference at different sections in the fan pig house was not significant ($P>0.05$). The relative humidity difference at different sections both in the water pad-fan pig house and in the fan pig house was not significant ($P>0.05$). Respiration rates in the water pad-fan pig house were reduced by 3.82 bpm (breaths per minute) at 12:00 and 3.05 bpm at 14:00 compared to those in the fan pig house ($P<0.05$), and respiration rate was affected by temperature ($P<0.05$). Being one kind of evaporative cooling method, the water pad-fan system would consume 1.20-6.27 m³ water per day during the days with good cooling effect and the temperature was reduced by 4.0-12.3 °C compared to the temperature outside the pig houses. The temperature range reduced was not consistent with the water consumption at all time because the relative humidity was not the same in different days. These results indicate that the water pad-fan cooling system is better than the fan cooling system in pig houses in Beijing, China.

Keywords: fans; cooling; wind speed; water pad-fan system; pig house