

## 冷风机-风管对南方开放式牛舍的降温效果

程琼仪<sup>1,2</sup>, 刘继军<sup>1,2</sup>, 靳薇<sup>1,2</sup>, 穆钰<sup>3</sup>, 陈昭辉<sup>1,2\*</sup>, 刘善斋<sup>4</sup>

(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. 农业部规划设计研究院设施农业研究所, 北京 100125; 4. 国家肉牛体系亳州试验站, 亳州 236000)

**摘要:**为改善南方夏季开放式肉牛舍环境条件, 该文设计湿帘冷风机-纤维风管系统, 采用风管定点送风、孔口射流高速出风的模式, 将冷风均匀送至肉牛活动区域进行局部降温。该研究以栓系饲养西门塔尔牛为试验对象, 对环境、肉牛生理及增质量进行测定。结果表明: 测定期间, 在肉牛站立(1.3 m 高度)和躺卧背部高度(0.7 m 高度), 与对照舍相比, 处理舍的平均温度分别降低 2.0 和 1.8℃, 平均相对湿度皆增加 10%, 平均风速分别增加 0.69 和 0.47 m/s ( $P<0.01$ ); 试验舍内氨气和二氧化碳平均质量浓度比对照舍分别降低 0.17 和 81 mg/m<sup>3</sup>, 热负荷指数(heat load index, HLI)均值降低 2.84 ( $P<0.01$ ); 试验牛的呼吸频率降低 22 次/min、直肠温度降低 0.35℃、皮温降低 1.04℃, 差异均极显著( $P<0.01$ )。在整个试验期间, 处理舍肉牛未出现患病情况, 日增质量为 0.92 kg/d; 对照舍肉牛患病率高达 47%, 日增质量为 0.54 kg/d, 差异极显著( $P<0.01$ )。该研究表明在开放式牛舍中进行湿帘冷风机-纤维风管局部降温, 有助于缓解肉牛热应激, 应用于南方夏季高温高湿天气下技术和经济可行。

**关键词:** 降温; 湿度控制; 射流; 湿帘冷风机-纤维风管; 开放式牛舍

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.015

中图分类号: S823.9<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0126-09

程琼仪, 刘继军, 靳薇, 等. 冷风机-风管对南方开放式牛舍的降温效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 126—134.

Cheng Qiongyi, Liu Jijun, Jin Wei, et al. Effects of cooling fan-duct on cooling performance in open-sided beef barn in Southern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 126—134. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

ICPP (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007 年的评估报告显示, 21 世纪全球气候变暖, 保守估计最高温度增幅达 2.4~2.6℃<sup>[1]</sup>。而为了追求生产性能, 在畜禽育种中倾向于选择与抗热应激基因相冲突的高产基因<sup>[2-3]</sup>, 畜禽的抗热应激能力不断减弱。因此采取适宜措施势在必行。

为了缓解热应激, 通常采取的降温措施包括: 遮阳棚、风机、水空调、喷雾或喷淋结合风扇、湿帘负压通风等。遮阳棚通过降低热辐射可以有效缓解畜禽热应激<sup>[4-5]</sup>, 但仅靠遮阳棚无法避免极端高温的影响。风机通风可加强畜禽体表的对流散热, 但当环境温度接近或高于体表温度时, 对流散热非常有限或完全失效<sup>[6]</sup>。水空调是利用低温地下水与空气热交换释放冷量, 但其耗水量大, 仅适用于地下

水丰富、取水费低、规模小的畜牧场<sup>[7]</sup>。喷雾和喷淋都属于蒸发降温, 广泛用于牛舍环境控制<sup>[8-9]</sup>。喷雾通过雾滴气化降低空气温度, 但直接将雾滴喷于舍内会极大程度地增加牛舍湿度, 不适于相对湿度高于 55% 的地区<sup>[10]</sup>。喷淋可以加强牛体蒸发散热<sup>[11-12]</sup>, 但对于栓系式肉牛来说, 会使其卧床积水, 导致饲料转化率和增质量速率降低<sup>[13]</sup>。湿帘负压通风仅限于封闭式牛舍使用。可见对于采用栓系式饲养的南方开放式肉牛舍来说, 以上降温方式皆有不足之处。

针对南方夏季高温高湿的气候条件, 本试验利用湿帘冷风机-纤维风管系统, 通过射流送风方式对肉牛舍进行局部降温。湿帘冷风机对牛舍密闭性要求低, 安装维护方便<sup>[14]</sup>。纤维风管由高分子聚合物制成, 可以达到局部降温、送风均匀、节能的效果<sup>[15]</sup>, 还能防止风管凝露, 并且易于安装与维护<sup>[16]</sup>。Chen Fujiang 等的试验表明, 采用纤维风管送风能有效控制室内温度分布和风速大小<sup>[17]</sup>; 冬季在犊牛舍安装纤维风管, Nordlund 等发现舍内细菌数量显著降低, 犊牛呼吸道疾病发生率降低 75%<sup>[18]</sup>。射流能使冷风定点送至肉牛活动区域, 避免形成温度分层<sup>[19]</sup>, 同时快速排出舍内有害气体<sup>[20]</sup>。本试验通过比较环境、肉牛生理以及增质量等指标的变化, 探究

收稿日期: 2013-12-05 修订日期: 2014-03-03

基金项目: 南方地区草食家畜舍饲小气候调控技术研究(201303145); 农业部肉牛牦牛产业技术体系(CARS-38)

作者简介: 程琼仪, 女, 湖北潜江人, 研究方向为畜禽环境控制。北京中国农业大学动物科技学院, 100193。Email: 0809080121@cau.edu.cn  
\*通信作者: 陈昭辉(1981—), 男, 浙江乐清人, 讲师, 研究方向为畜牧环境工程。北京 中国农业大学动物科技学院, 100193。

Email: chenzhaozhui@cau.edu.cn

该降温系统是否具有技术可行性; 并通过分析投入产出比探究该降温系统是否具有经济可行性。

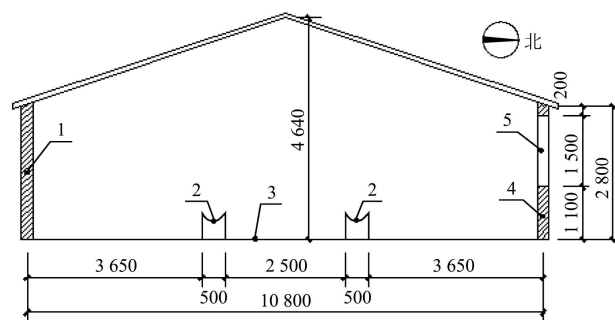
## 1 材料与方法

### 1.1 试验牛舍及试验对象

试验于 2013 年 7—8 月进行。试验地点为国家肉牛体系亳州试验站, 位于安徽省亳州市(33.55°N, 115.39°E), 该地区 7—8 月平均相对湿度约 77%, 温湿度指数 (temperature-humidity index, THI) > 72 (肉牛出现热应激临界值) 的天气约占 87%<sup>[21]</sup>。2 栋试验牛舍并排排列, 相距 10 m, 皆为东西走向。牛舍长 25.2 m, 跨度 10.8 m, 柱顶高 2.8 m, 双坡钢屋架无吊顶石棉瓦屋面, 牛舍南面为全开放式, 北面每开间 3.6 m, 设 1.5 m×1.5 m (长×宽) 洞口, 窗台高 1.1 m。舍内牛床为单走道双列布置 (如图 1)。

处理舍和对照舍各饲养 30 头肉牛, 从中分别挑选 20 头体质量和饲养日龄相近的未阉割西门塔尔公牛为试验对象, 拴系饲养, 饲槽宽度为 1 m/头, 随机分配到牛舍的南侧或北侧牛床。从处理舍和对照舍南北侧分别随机挑选 3 头试验牛对其生理指标进行测量。试验阶段肉牛日粮精粗质量比为 1:3, 精料配方如下: 玉米质量分数 66%, 棉粕质量分数 15%, 豆粕质量分数 6%, 麸皮质量分数 5%, 预混

料质量分数 5%, 小苏打质量分数 3%; 粗饲料配方为: 青贮质量分数 50%, 酒糟质量分数 50%。每日 05:00 和 17:00 进行人工喂料、清粪, 肉牛自由采食和饮水。



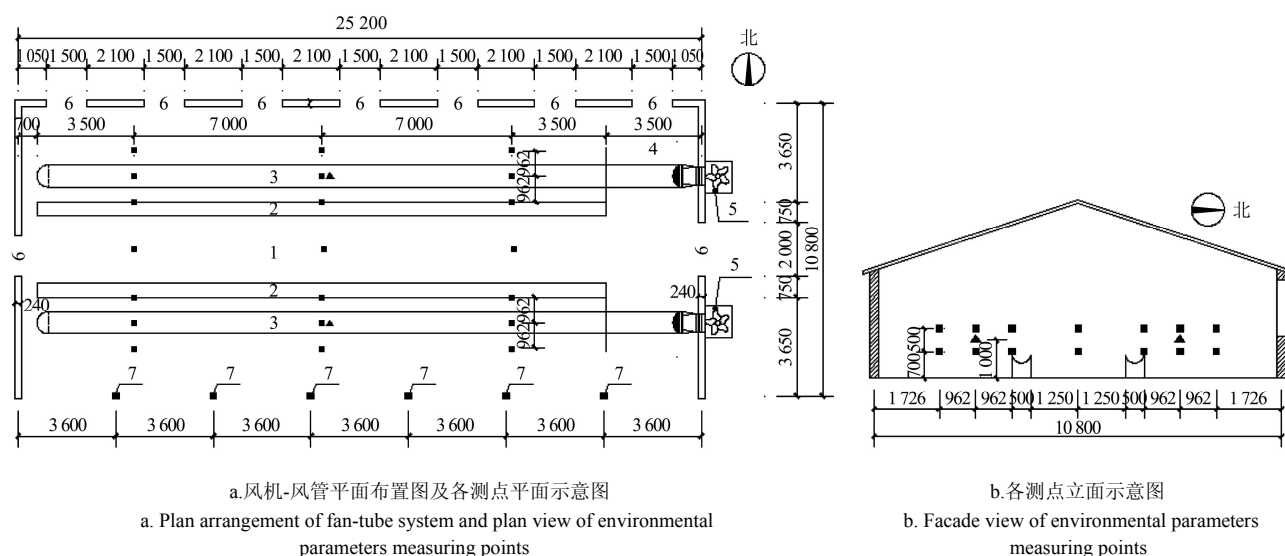
1. 柱子 2. 饲槽 3. 饲喂走道 4. 砖墙 5. 洞口  
1. Pillar 2. Manger 3. Feeding aisle 4. Brick wall 5. Hole

图 1 肉牛舍剖面示意图

Fig.1 Cross-section diagram of beef barn

### 1.2 设备安装及风管开孔方式

分别在处理舍南北两侧各安装一套湿帘冷风机-纤维风管系统, 处理舍风机风管平面布置如图 2 所示, 湿帘冷风机风量为 13 000 m<sup>3</sup>/h, 总输出风压 150 Pa。风机装于端墙外, 高出地面 30 cm, 湿帘水源为 15~20℃的地下水。



1. 饲喂走道 2. 饲槽 3. 纤维风管 4. 转牛通道 5. 湿帘冷风机 6. 洞口 7. 柱子

1. Feeding aisle 2. Manger 3. Fiber duct 4. Beef transport path 5. Wet curtain cooling fan 6. Hole 7. Pillar

注: ■ 为温、湿度、风速、氨气、二氧化碳质量浓度测点; ▲ 为黑球温度测点。

Note: ■ are measuring points of temperature, humidity, wind speed, ammonia and carbon dioxide mass concentrate; ▲ is measuring point of black global temperature.

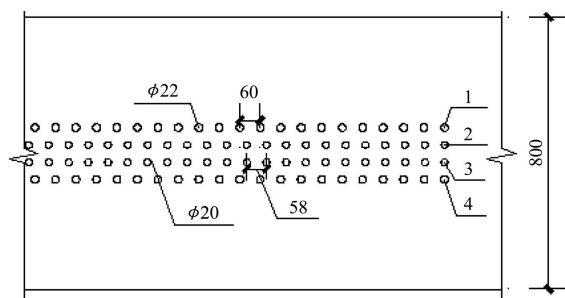
图 2 风机-风管平面布置图及环境参数测点布置图

Fig.2 Plan arrangement of fan-tube system and environmental parameters measuring points

纤维风管长 24.5 m, 直径 0.80 m, 材质为 200D 涤纶牛津布, 在 3.5 m 长的转牛通道之后开设小孔。图 3 为风管轴向和周向出风口分布示意图, 由图 3a

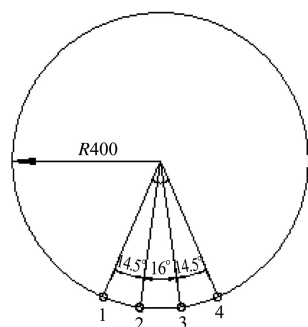
可知, 沿风管轴向, 开设 4 排孔, 孔 2 和孔 3 直径 20.0 mm, 孔中心间距为 58.0 mm, 每排 360 个孔; 孔 1 和孔 4 直径为 22.0 mm, 孔中心间距为 60.0 mm,

每排 350 个孔。由图 3b 可知, 孔 1 和孔 4 夹角为  $45^\circ$ , 孔 2 和孔 3 夹角为  $16^\circ$ , 且孔 1 和 4、孔 2 和 3 相对于 6 点钟方向左右对称 (把风管截面看成钟面)。为保证冷风最大限度地覆盖肉牛活动区域, 同时牛接触不到风管, 风管悬挂在牛床上方, 底部离地面 1.75 m。结合当地环境条件及生产情况, 降温设备运行时间段为 08:00~20:00。



a. 风管轴向出风口分布示意图

a. Outlet distribution schematic diagram on axial direction of duct



b. 风管周向出风口分布示意图

b. Outlet distribution schematic diagram on circumferential direction of duct

注: 图中 1、2、3、4 分别为孔编号。

Note: 1, 2, 3, 4 in the figure are hole numbers, respectively.

图 3 风管出风口分布示意图

Fig.3 Outlet distribution schematic diagram of duct

### 1.3 测试指标与方法

#### 1.3.1 风管送风均匀性与湿帘冷风机降温效果测定方法

为了测量风管是否均匀送风, 从风管首端有孔处开始, 沿风管轴向每隔 0.21 m 选一个截面对出风口风速进行测量, 1 段风管测 10 个截面, 每截面测 10 次取平均值。

在风机开启时, 将温湿度自动记录仪放置于连接风机与风管的铁皮弯管内, 每隔 5 min 记录 1 次出风口的温度和湿度。同时, 在室外靠近铁皮弯管处挂 1 台相同型号的温湿度自动记录仪, 记录风机进风温度和湿度。

#### 1.3.2 环境指标与测试方法

处理舍、对照舍的环境测量项目和测点一致, 测点平面布置如图 2 所示, 测量指标包括温度、相

对湿度、黑球温度、风速、氨气和二氧化碳质量浓度。测量仪器分别为温湿度自动记录仪 (型号 Apresys179-TH, 艾普瑞精密光电有限公司, 温度测量精度为  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ , 相对湿度测量精度为  $\pm 3\%$ ), 精密型温湿度仪 (型号 Testo 625, 德图仪器国际贸易有限公司, 精度为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ), 热敏式风速仪 (型号 MODEL6004, 沈阳加野科学仪器有限公司, 精度为  $\pm (5\% + 0.1) \text{ m/s}$ ), 二氧化碳检测仪 (型号 TES-1370, 泰仕电子工业股份有限公司, 精度为  $\pm 3\%$ ) 和氨气检测仪 (型号 JsA8, 深圳市吉顺安科技有限公司, 精度为  $\pm 3\%$ )。为了提高试验结果的准确性, 在牛的活动区域内分别测牛头中部、牛背部和牛尾部区域 3 个点, 测量高度为 0.7 m (肉牛躺卧背部高度) 和 1.3 m (肉牛站立背部高度), 测点如图 2 所示。黑球辐射温度测试仪 (型号 JTR04, 北京世纪建通技术开发有限公司, 精度为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ), 测量高度为 1.0 m, 测点如图 2 所示。测定时间为 2013 年 8 月 6 日—8 日、10 日—11 日、13 日—14 日, 每天 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 测定, 然后各指标取日平均值。

#### 1.3.3 环境综合评价指标

本文采用热负荷指数 (heat load index, HLI) 对肉牛舍环境进行综合评价。HLI 是结合温度、湿度、太阳辐射和风速的综合环境评价指标, 以黑球温度 (black global temperature, BG)  $25^\circ\text{C}$  为界, 被分为 2 部分:

当  $BG > 25$  时,  $HLI = 8.62 + (0.38RH) + (1.55BG) - (0.5V) + e^{(2.4-V)}$ ,

当  $BG < 25$  时,  $HLI = 10.66 + (0.28RH) + (1.3BG) - V$ 。

式中: RH 为相对湿度, %; BG 为黑球温度,  $^\circ\text{C}$ ; V 为风速, m/s; e 是自然对数<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.4 生理指标与测试方法

生理指标包括皮温、直肠温度及呼吸频率。皮温采用兽用红外线测温仪 (型号 3MQX601, 泰兴三牧兽用器械制造有限公司, 精度  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ), 直肠温度由兽用玻璃体温计测量 (九江鑫康医用仪表有限公司), 呼吸频率采用人工秒表连续 3 min 计数侧腹起伏次数<sup>[23]</sup>。生理指标测定与环境测定同时进行。

#### 1.3.5 体质量测试方法

在试验开始 (2013 年 7 月 31 日) 和结束 (2013 年 8 月 31 日) 时, 分别用电子秤 (量程 3 t, 精度  $\pm 0.5 \text{ kg}$ ) 称量处理舍和对照舍试验牛体质量。

### 1.4 数据处理与三维图绘制

试验数据结果以平均值  $\pm$  标准差表示, 统计软

件为 SPSS 20.0。2 栋牛舍环境数据采用配对  $t$  检验，肉牛生理数据以及增质量情况采用独立  $t$  检验进行统计分析。

湿帘冷风机的降温效果采用三维曲面图描述，绘图软件为 Matlab7.0，方法为三维线性插值函数法。

## 2 结果与分析

### 2.1 风管送风均匀性与湿帘冷风机效果测定

#### 2.1.1 风管送风均匀性测定

表 1 为测定期间，风管各截面出风口的风速大小。由表 1 可知，沿风管轴向各截面出风口风速先增大后减小，风速波动范围为 8.2~8.7 m/s，最大波动值为 0.47 m/s，风管始末端风速相对误差为 2.19%，10 个截面间的出风口风速变异系数为 0.0153，表明风管可以达到均匀送风的效果。

表 1 风管各个出风口截面风速大小  
Table 1 Wind speed of each cross profile of duct

截面 Profile	风速 Wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )	截面 Profile	风速 Wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )
1	8.39±0.10	6	8.68±0.16
2	8.47±0.18	7	8.55±0.11
3	8.52±0.17	8	8.39±0.13
4	8.56±0.12	9	8.25±0.08
5	8.66±0.18	10	8.21±0.08

#### 2.1.2 湿帘冷风机降温效果测定

图 4 为测定期间湿帘冷风机出风口温度随环境温、湿度的变化趋势。从图 4 的拟合曲面可以看出：湿帘冷风机出风口温度受外界温、湿度共同影响，随着外界温度升高，湿度增加，出风口温度增加。

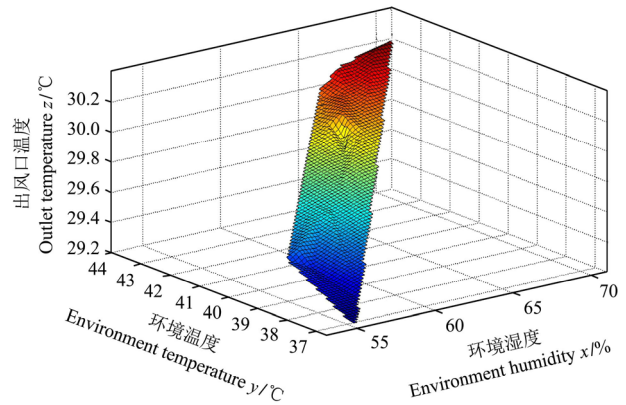


图 4 湿帘冷风机出风口温度与环境温湿度关系  
Fig.4 Relationship between wet curtain cooling fan outlet temperature and environmental temperature and humidity

### 2.2 降温系统对舍内环境的影响

#### 2.2.1 舍内温湿度变化

表 2 为测定期间处理舍、对照舍及舍外各时刻平均温、湿度。由表 2 可知，除 18:00 在 0.7 m 高度，处理舍和对照舍温度差异不显著外，其余时刻都存在极显著差异 ( $P<0.01$ )；二者湿度在测定时间段均存在极显著差异 ( $P<0.01$ )。在降温处理后，距地面 0.7 m 处，处理舍的日平均温、湿度分别为 (32.4±1.4) °C 和 (79±5) %，对照舍分别为 (34.2±2.0) °C 和 (69±6) %；距地面 1.3 m 处，处理舍日平均温、湿度分别为 (32.2±1.4) °C 和 (79±5) %，对照舍分别为 (34.2±1.8) °C 和 (69±6) %。与对照舍相比，在 0.7 和 1.3 m 高度，处理舍平均温度降幅分别为 1.8 和 2.0 °C，平均相对湿度均增加 10%。当外界环境温度为 37~38 °C 时，在风管正下方即牛背部区域，降温幅度普遍在 3 °C 以上，最高可达 4.3 °C。因此，此降温系统能有效降低环境温度，但相对湿度有所升高。

表 2 测定期间处理舍、对照舍及舍外各时刻平均温、湿度

Table 2 Average temperature and humidity of each time point in treatment, control barns and outside during measurement period

时间 Time	0.7 m 高度温度 Temperature at height of 0.7 m/°C		1.3 m 高度温度 Temperature at height of 1.3 m/°C		外界温度 Outside/°C	0.7 m 高度湿度 Humidity at height of 0.7 m/%		1.3 m 高度湿度 Humidity at height of 1.3 m/%		外界湿度 Outside/%
	处理舍 Treatment	对照舍 Control	处理舍 Treatment	对照舍 Control		处理舍 Treatment	对照舍 Control	处理舍 Treatment	对照舍 Control	
08:00	30.1±0.3A	31.1±0.2B	30.0±0.4A	31.2±0.2B	31.6±0.1	83±3A	78±1B	82±4A	78±1B	77±6
10:00	31.7±0.3A	33.1±0.2B	31.5±0.3A	33.3±0.1B	34.2±0.1	78±5A	72±1B	78±6A	72±1B	69±6
12:00	33.2±0.3A	34.9±0.2B	33.0±0.4A	34.9±0.2B	36.9±0.1	76±3A	66±1B	75±5A	66±1B	63±5
14:00	33.9±0.3A	36.6±0.2B	33.7±0.5A	36.1±0.2B	38.0±0.2	74±3A	63±1B	73±5A	63±1B	60±8
16:00	33.3±0.2A	35.5±0.1B	33.1±0.4A	35.5±0.1B	37.0±0.1	76±2A	64±0.3B	76±5A	64±0.3B	60±3
18:00	32.2±0.2A	34.0±0.03A	32.1±0.3A	34.0±0.03B	34.9±0.1	85±1A	73±1B	85±1A	73±1B	74±6

注：数据表中不同大写字母表示处理舍和对照舍差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: There are remarkable difference between treatment and control barns with different uppercase ( $P<0.01$ ).

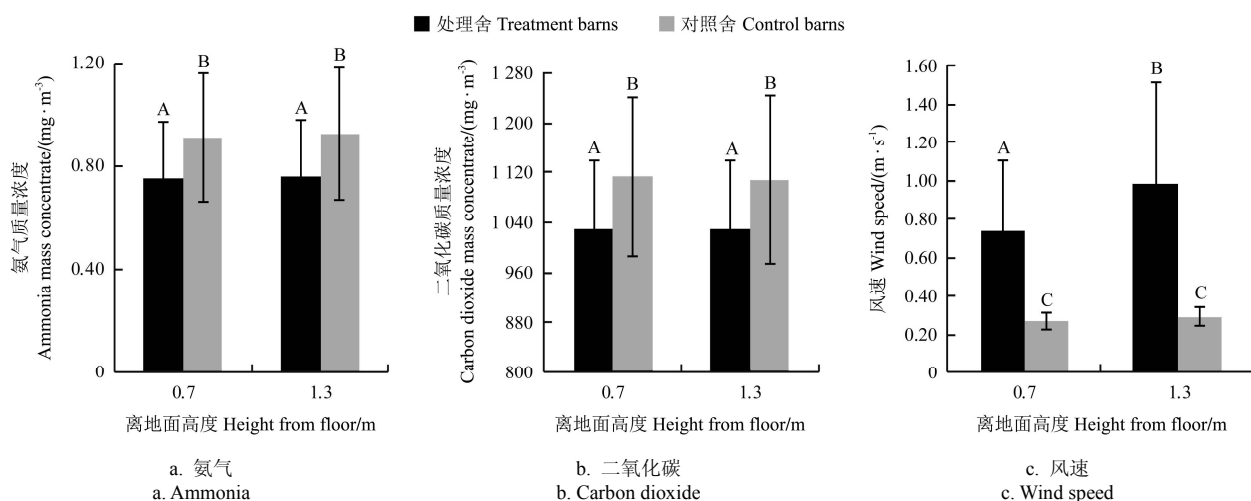
#### 2.2.2 舍内有害气体质量浓度和风速的变化

图 5 为测定期间处理舍和对照舍氨气、二氧化

碳质量浓度和风速的日平均值。由图 5 可知，在降温处理后，处理舍和对照舍的氨气、二氧化碳质量

浓度差异极显著 ( $p<0.01$ )。距地面 0.7 m 处, 处理舍的氨气和二氧化碳质量浓度均值分别为  $(0.75\pm0.22)$  和  $(1030\pm110)\text{mg/m}^3$ , 对照舍分别为  $(0.91\pm0.25)$  和  $(1113\pm129)\text{mg/m}^3$ ; 距地面 1.3 m 处, 处理舍的氨气和二氧化碳质量浓度均值分别为  $(0.76\pm0.22)$  和  $(1029\pm109)\text{mg/m}^3$ , 对照舍分别为

$(0.93\pm0.26)$  和  $(1108\pm136)\text{mg/m}^3$ 。在距地面 0.7 和 1.3 m 处, 处理舍氨气和二氧化碳质量浓度均无显著差异 ( $p<0.01$ ), 与对照舍相比, 处理舍 2 高度氨气和二氧化碳质量浓度均值降幅分别为 0.17 和  $81\text{mg/m}^3$ 。说明降温系统可有效降低舍内氨气和二氧化碳的质量浓度。



注: 不同大写字母表示处理舍和对照舍差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: There are remarkable difference between treatment and control barns with different uppercase ( $P<0.01$ ).

图 5 测定期间试验舍和对照舍氨气、二氧化碳质量浓度和风速日平均值

Fig.5 Daily average mass concentration of ammonia, carbon dioxide and wind speed in treatment and control barns during measurement period

该降温系统对舍内风速有极显著的提高 ( $p<0.01$ )。在测定期间, 距地面 0.7 m 处, 处理舍牛头中部、牛背部与牛尾部的平均风速为  $(0.74\pm0.37)\text{m/s}$ , 对照舍为  $(0.27\pm0.05)\text{m/s}$ ; 距地面 1.3 m 处, 处理舍平均风速为  $(0.98\pm0.54)\text{m/s}$ , 对照舍为  $(0.29\pm0.05)\text{m/s}$ 。与对照舍相比, 处理舍在 0.7 和 1.3 m 高度平均风速分别增加 0.47 和 0.69 m/s, 但仍小于国家标准 (下限  $1\text{m/s}$  [24])。由于风管出风口与测点的距离影响测点风速, 所以在风管正下方 0.45 m 处 (1.3 m 高度), 牛背部区域风度可达到 2 m/s; 距风管正下方 1.05 m 处 (0.7 m 高度), 牛背部区域风速可达到 1.3 m/s。说明降温系统可提高舍内风速, 促进肉牛体表对流传导散热, 有效缓解肉牛热应激。

### 2.2.3 热负荷指数

根据肉牛的喘息情况和皮温, HLI 被分为 4 个等级: 热中性环境 ( $\text{HLI}<70.0$ ); 温热环境 ( $70.1<\text{HLI}<\text{下限临界值}$ ); 炎热环境 ( $\text{下限临界值}\leq\text{HLI}\leq\text{上限临界值}$ ); 极热环境 ( $\text{HLI}>\text{上限临界值}$ )。当 HLI 高于下限临界值时, 肉牛开始动用物理和化学调节, 出现热应激; 大于上限临界值时, 肉牛体热调节失衡, 出现热积聚, 体温升高。对于身体健康、

饲养日龄 80~130 d、无荫蔽、饮水温度  $21\sim30^\circ\text{C}$ 、积粪厚度 50 mm 左右的黑色安格斯牛, 其上、下限临界值分别为 86.0 和 77.0。本次的试验对象为生理健康、舍饲 130 d 以上、被毛黄白相间的西门塔尔肉牛, 遮阳面积  $5.3\text{m}^2/\text{头}$ , 饮用  $15\sim20^\circ\text{C}$  的地下水, 粪便清扫及时。根据此肉牛品种、生理状况及饲养条件校正临界值, 则其上、下限临界值分别为 96.0 和  $87.0$  [22]。

表 3 为测定期间处理舍和对照舍各时刻平均 HLI, 由表 3 可知, 进行降温后, 与对照舍相比, 除 08:00 处理舍 HLI 显著降低外 ( $P<0.05$ ), 其余时刻均为极显著降低 ( $P<0.01$ )。处理舍平均 HLI 为  $(94.17\pm1.00)$ , 试验牛处于仍有热应激的炎热状态 ( $87.0\leq\text{HLI}\leq96.0$ ); 对照舍平均 HLI 为  $(97.01\pm0.78)$ , 试验牛处于强烈热应激的极热状态 ( $\text{HLI}>96.0$ )。因此, 降温系统可以有效缓解肉牛热应激。

## 2.3 降温系统对肉牛生理状态的影响

### 2.3.1 肉牛呼吸频率的变化

肉牛热应激时, 呼吸频率会显著增加 [25-26]。这是因为环境温度升高, 导致肉牛的非蒸发散热减弱, 呼吸和出汗等蒸发散热方式增强。Hahn 的研究

表明当环境温度高于热中性温度上限时，肉牛的呼吸频率和环境温度有极大的正相关性<sup>[25,27]</sup>。表 3 为测定期间处理舍和对照舍试验牛各时刻的平均呼吸频率，由表 3 可知，在测定期间，进行降温后，与对照舍相比，处理舍试验牛的呼吸频率极显著降低 ( $P<0.01$ )，处理舍平均呼吸频率为 (64±8) 次/min，对照舍试验牛为 (86±13) 次/min，处理舍比对照舍平均降低 22 次/min，在 18:00 时降幅最大，达到 33 次/min。以上结果表明，降温系统可有效降低试验牛的呼吸频率，缓解其热应激。

表 3 测定期间处理舍和对照舍各时刻平均 HLI 和呼吸频率  
Table 3 Average HLI and respiration rate of each time point in treatment and control barns during measurement period

时间 Time	HLI		呼吸频率 Respiration rate/(次·min <sup>-1</sup> )	
	处理舍 Treatment	对照舍 Control	处理舍 Treatment	对照舍 Control
08:00	92.8±2.28a	96.54±1.47b	54±5A	65±9B
10:00	92.93±2.58A	97.01±0.95B	55±5A	75±10B
12:00	94.53±2.85A	97.64±2.30B	68±9A	87±11B
14:00	94.24±2.71A	97.96±1.23B	70±9A	94±9B
16:00	94.91±3.14A	97.08±1.54B	73±9A	96±17B
18:00	95.59±2.25A	97.87±1.30B	65±3A	98±15B
平均值	94.17±1.00A	97.01±0.78B	64±8A	86±13A

注：不同小写字母表示处理舍和对照舍差异显著 ( $P<0.05$ )，不同大写字母表示处理舍和对照舍差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: There are significant difference between treatment and control barns with different lowercase ( $P<0.05$ ), and remarkable difference with different uppercase ( $P<0.01$ ).

### 2.3.2 肉牛直肠温度和皮温的变化

直肠温度也常用来表征肉牛是否处于体热平衡<sup>[28]</sup>，其正常波动范围为 37.5~39.1℃<sup>[29]</sup>。表 4 为测定期间处理舍和对照舍各时刻试验牛的平均直肠温度和皮温，由表 4 可知，进行降温后，处理舍试验牛各时刻的直肠温度均在 39.1℃ 以下，其均值为 (38.68±0.16)℃，对照舍为 (39.03±0.28)℃。与对照舍相比，处理舍试验牛的平均直肠温度有极显著降低 ( $P<0.01$ )，平均降幅为 0.35℃，在 18:00 时降幅最大，达到 0.52℃。

皮温对环境敏感，与温度存在较强的正相关。这是因为当温度升高时，机体散热困难，皮肤通过升温增加体表与环境的温差，提高散热效率。由表 4 可知，进行降温后，处理舍试验牛平均皮温为 (36.91±0.56)℃，对照舍为 (37.95±0.66)℃。与对照舍相比，处理舍试验牛的平均皮温有极显著降低 ( $P<0.01$ )，平均降幅为 1.04℃，在 14:00 时降幅

最大，达到 1.23℃。

以上结果表明，在测量期间，降温系统可有效降低试验牛的直肠温度和皮温，缓解其热应激。

表 4 测定期间处理舍和对照舍各时刻平均直肠温度和皮温  
Table 4 Average rectal and skin temperature of each time point in treatment and control barns during measurement period

时间 Time	直肠温度 Rectal temperature/℃		皮温 Skin temperature/℃	
	处理舍 Treatment	对照舍 Control	处理舍 Treatment	对照舍 Control
08:00	38.57±0.12A	38.76±0.10B	36.09±0.70A	36.93±0.37B
10:00	38.61±0.14A	38.83±0.17B	36.34±0.77A	37.31±0.36B
12:00	38.56±0.05A	38.86±0.16B	37.08±0.59A	38.25±0.75B
14:00	38.65±0.04A	39.06±0.31B	37.33±0.54A	38.56±0.69B
16:00	38.71±0.09A	39.12±0.31B	37.45±0.36A	38.41±0.71B
18:00	39.00±0.14A	39.52±0.27B	37.19±0.41A	38.24±0.54B
平均值	38.68±0.16	39.03±0.28	36.91±0.56	37.95±0.66

注：不同大写字母表示处理舍和对照舍差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: There are remarkable difference between treatment and control barns with different uppercase ( $P<0.01$ ).

## 2.4 试验牛增质量及健康状况比较

### 2.4.1 试验牛增质量比较

表 5 为整个试验期间处理舍和对照舍试验牛的增质量，由表 5 可知，进行降温后，处理舍和对照舍试验牛的日增质量分别 (0.92±0.34) 和 (0.54±0.27) kg/d。与对照舍相比，处理舍的平均日增质量提高 0.38 kg/d，差异极显著 ( $P<0.01$ )。因此，降温系统能有效地提高试验牛的增质量速率。

表 5 整个试验期间处理舍和对照舍试验牛增质量  
Table 5 Body weight gain of beef in treatment and control barns throughout whole experimental period

	初始体质量 Initial body weight/kg	试验结束体质量 Final body weight/kg	日增质量 Daily weight gain/(kg·d <sup>-1</sup> )
处理舍 Treatment	529.42±52.14A	557.08±47.30a	0.92±0.34A
对照舍 Control	500.77±32.63A	517.08±33.32b	0.54±0.27B

注：不同小写字母表示处理舍和对照舍差异显著 ( $P<0.05$ )，不同大写字母表示处理舍和对照舍差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: There are significant difference between treatment and control barns with different lowercase ( $P<0.05$ ), and remarkable difference with different uppercase ( $P<0.01$ ).

### 2.4.2 试验牛健康状况比较

试验前，处理舍和对照舍试验牛皆处于健康状态。在整个试验期间，对照舍试验牛一直处于热积聚状态 (HLI>96.0)，30 头试验牛中有 14 头因高温高湿出现了不同程度的病变，患病率高达 47%；处理舍 30 头试验牛在整个试验阶段精神状态良好，吃料正常，皆未出现患病症状。

### 3 经济效益分析

试验期间 2 栋牛舍牛饲料饲喂量一致, 饲料成本没有差异。湿帘冷风机-风管系统购置安装费为 19 000 元, 按设备 5 a 折旧计算, 折旧费 3 800 元/a。每台湿帘冷风机功率为 1 kW·h, 当地电价为 0.49 元/度, 风机每天运行 12 h, 在七、八月开启此套降温设备, 运行费用为 729.12 元。整个试验期间处理舍试验牛相比对照舍日增质量提高 0.38 kg/d, 假设整栋处理舍内 30 头牛有相同的增质量趋势, 活牛按当地价格 25.60 元/kg 计算, 总收益为 18 094.08 元。通过计算, 此套设备每年可获得净利润为 13 564.96 元。

### 4 讨 论

运行降温系统后, 在测定期间, 由于系统采用了蒸发降温, 处理舍湿度有所升高, 但仍处于肉牛适宜的湿度范围 55%~85%内<sup>[29]</sup>; 在 12:00~18:00, 处理舍平均温度仍高于育肥牛的适宜温度上限 32℃<sup>[29]</sup>, 出现此现象的原因可能是开放式畜舍与外界环境热交换迅速, 影响了降温效果。

在降温系统运行期间, 与对照舍相比, 处理舍氨气和二氧化碳质量浓度均有极显著的降低, 这是由于出风口风速高, 而有害气体排出速率与进入舍内气流速率成正比<sup>[20]</sup>, 同时射流对周围空气诱导能力强, 能带动 20~40 倍出风量的空气流动<sup>[16]</sup>, 所以舍内有害气体能迅速排出。

在测定期间, 肉牛头部区域风速为  $(0.49 \pm 0.21)$  m/s, 远小于夏季适宜风速 1 m/s<sup>[24]</sup>。这是由于肉牛头部区域距离出风口较远, 射流风速衰减快<sup>[30]</sup>, 导致此区域风速较低。但肉牛的中枢温度感受器及体温调节中枢都位于下丘脑, 忽略对头部的降温会使其采食量降低, 影响营养物质的消化吸收, 降低增质量。在以后的试验设计中, 应在提高肉牛头部区域风速的基础上, 合理完善风管开孔设计。

### 5 结 论

1) 纤维风管首端出风口风速 8.39 m/s, 末端风速 8.21 m/s, 10 个截面间的出风口风速变异系数为 0.0153, 可认为此风管送风均匀。

2) 湿帘冷风机-纤维风管系统能显著改善开放式肉牛舍的环境条件。在测定期间, 与对照舍相比, 在离地面 1.3 和 0.7 m 处, 处理舍的平均温度分别降低 2.0 和 1.8℃, 平均相对湿度皆增加 10%, 平均

风速分别增加 0.69 和 0.47 m/s ( $P < 0.01$ ); 对照舍内氨气和二氧化碳平均质量浓度分别降低 0.17 和 81 mg/m<sup>3</sup>, HLI 均值降低 2.84 ( $P < 0.01$ )。

3) 湿帘冷风机-纤维风管系统能显著改善肉牛生理状况, 提高日增质量。在测定期间, 与对照舍相比, 处理舍试验牛平均呼吸频率降低 22 次/min、平均直肠温度降低 0.35℃、平均皮温降低 1.04℃ ( $P < 0.01$ ); 在整个试验期间, 处理舍肉牛精神状态良好, 日增质量为 0.92 kg/d, 而对照舍有 47% 肉牛出现患病现象, 日增质量为 0.54 kg/d。因此, 该降温设备具有技术可行性。

4) 湿帘冷风机-纤维风管系统运行 2 个月可获利润 13 564.96 元。因此, 该降温设备具有经济可行性。

#### [参 考 文 献]

- [1] 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(1): 57—69.
- [2] West J W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(6): 2131—2144.
- [3] Dikmen S, Cole J B, Null D J, et al. Heritability of rectal temperature and genetic correlations with production and reproduction traits in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(6): 3401—3405.
- [4] Sullivan M L, Cawdell-Smith A J, Mader T L, et al. Effect of shade area on performance and welfare of short-fed feedlot cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(9): 2911—2925.
- [5] Tucker C B, Rogers A R, Schütz K E. Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2008, 109(2): 141—154.
- [6] 乔克, 彭义, 刘力, 等. 重庆市半开放式猪舍夏季温热环境观测分析[J]. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2006, 28(2): 345—348.  
Qiao Ke, Peng Yi, Liu Li, et al. Observation and analysis of thermal environmental conditions of semi-enclosed livestock houses in summer in Chong Qing[J]. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 2006, 28(2): 345—348. (in Chinese with English abstract)
- [7] 提博宇, 王美芝, 徐旨弘. 开放式兔舍水空调技术夏季降温效果[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 258—263.  
Ti Boyu, Wang Meizhi, Xu Zhihong, et al. Cooling effect on open rabbit house with water conditioner system in summer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(7): 258—263. (in Chinese with English abstract)



- [8] Xuan Y M, Xiao F, Niu X F, et al. Research and application of evaporative cooling in China: A review (I)—Research[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3535—3546.
- [9] Chaibutr N, Chanongsang S, Suadsong S. Effects of evaporative cooling on the regulation of body water and milk production in crossbred Holstein cattle in a tropical environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2008, 52(7): 575—585.
- [10] Berman A. Predicted limits for evaporative cooling in heat stress relief of cattle in warm conditions[J]. *Journal of Animal Science*, 2009, 87(10): 3413—3417.
- [11] 丁露雨, 王美芝, 陈昭辉, 等. 南方开放式肉牛舍夏季喷雾降温效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 224—231.
- Ding Luyu, Wang Meizhi, Chen Zhaohui, et al. Effects of spraying cooling on open beef cattle barn in Southern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(2): 224—231. (in Chinese with English abstract)
- [12] Berma A. Increasing heat stress relief produced by coupled coat wetting and forced ventilation[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(12): 4571—4578.
- [13] Abney C S, Galyean M L. Seasonal and environmental effects on energy requirements and performance of high-producing cattle[C]// *Mid-South Ruminant Nutrition Conference, America*, 2006: 43—50.
- [14] 傅春泉, 徐苏凌, 张建中, 等. 湿帘冷风机降温在南方奶牛舍中的应用[J]. *中国奶牛*, 2011(7): 54—56.
- [15] 肖传卿. 常用通风管道的种类及性能评价[J]. *林业科技情报*, 2003, 35(3): 39—43.
- Xiao Chuanqing. Type and property evaluation of ordinary vent-channel[J]. *Forestry Science and Technology Information*, 2003, 35(3): 39—43. (in Chinese with English abstract)
- [16] 朱华威. 纤维织物空气分布系统的工程应用[J]. *制冷空调与电力机械*, 2009, 30(2): 12—14.
- Zhu Huawei. Application of fabric air dispersion system in engineering project[J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery*, 2009, 30(2): 12—14. (in Chinese with English abstract)
- [17] ChenFujiang, Chen Huanxin, Xie Junlong, et al. Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2121—2129.
- [18] Kenneth V Nordlund. Practical considerations for ventilating calf barns in winter[J]. *Veterinary Clinics of North America : Food Animal Practice*, 2008, 24(1): 41—54.
- [19] Caputo A C, Pelagagge P M. Upgrading mixed ventilation systems in industrial conditioning[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(14): 3204—3211.
- [20] Lambert A R, Lin C L, Mardorf E, et al. CFD Simulation of contaminant decay for high reynolds flow in a controlled environment[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2010, 54(1): 88—99.
- [21] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 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: 1—165.
- [22] Gaughan J B, Mader T L, Holt S M, et al. A new heat load index for feedlot cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 86(1): 226—234.
- [23] Scharf B, Michael J L, Robert L W, et al. Determinants of bovine thermal response to heat and solar radiation exposures in a field environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(4): 469—480.
- [24] NY/T388-1999, 中华人民共和国农业行业标准: 畜禽场环境质量标准[S].
- [25] Hahn G L. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads[J]. *Journal of Animal Science*, 1999, 77(suppl.2): 10—20.
- [26] Avenda ño - Reyes L, Hern á ndez - Rivera J A, Alvarez - Valenzuela F D, et al. Physiological and productive responses of multiparous lactating Holstein cows exposed to short-term cooling during severe summer conditions in an arid region of Mexico[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(6): 993—999.
- [27] Hahn G, Parkhurst A, Gaughan J. Cattle respiration rate as a function of ambient temperature[J]. *ASAE Paper NMC97*, 1997: 121.
- [28] Brown-Brandl T M, Eigenberg R A, Hahn G L, et al. Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49(5): 285—296.
- [29] 王根林. 养牛学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 171—173.
- [30] 张智力, 张旭, 王迪军, 等. 低温送风射流特性的研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(7): 893—896.
- Zhang Zhili, Zhang Xu, Wang Dijun. Study on characteristics of low temperature jet[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2004, 32(7): 893—896. (in Chinese with English abstract)



## Effects of cooling fan-duct on cooling performance in open-sided beef barn in Southern China

Cheng Qiongyi<sup>1,2</sup>, Liu Jijun<sup>1,2</sup>, Jin Wei<sup>1,2</sup>, Mu Yu<sup>3</sup>, Chen Zhaohui<sup>1,2\*</sup>, Liu Shanzhai<sup>4</sup>

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

2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Beijing 100193, China;

3. Institute of Facility Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

4. National System for Beef Experimental Station in Bozhou, Bozhou 236000, China)

**Abstract:** To improve the summer environmental conditions for open-sided beef barns in Southern China, a wet curtain cooling fan-fiber duct system was designed to locally cool the barns based on air jet distribution. The wet curtain cooling fan was used as a cooling source with air volume at 13 000 m<sup>3</sup>/h and 150 Pa of total pressure. A fiber duct was used as the end of the duct of the air distribution system to deliver cold air evenly to the beef activity area for local cooling. The duct was 0.8 m in diameter and designed with four rows of holes at the bottom with diameters of 20.0 mm and 22.0 mm, respectively; the spacing between two adjacent holes along the axial direction of the duct was 58.0 mm and 60.0 mm, respectively. The air dispensing mode of the system was jetting. The duct was hung above the stalls, and bottom of it was 1.75 m from the floor, and 0.96 m from the manger. Considering the local environmental conditions and farm management, the operation time of the cooling system was from 08:00 to 20:00. The study was conducted with Simmental beef in an open-sided barn with feed and water available ad libitum. Data of wind speed along the duct in the axial direction, the cooling effect of the wet curtain cooling fan, the environmental parameters of the barns, and the physiology and body weight gain of beef were collected. Air speed was 8.39 m/s at the head of the fiber duct and 8.21 m/s at the end of the duct. The variation coefficient of wind speed among 10 cross profiles was 0.0153, which showed that the air duct could be considered uniform in air supply, with rational design and layout of holes. The outlet temperature of the wet curtain cooling fan increased with ambient temperature and humidity rising. During the measurement period, at beef standing height (1.3 m from floor) and at reclining back height (0.7 m from floor), compared with the control barn, average wind speed increased by 0.69 and 0.47 m/s, respectively ( $P<0.01$ ); the average temperature of the treatment barn decreased by 2.0 and 1.8°C, respectively; and, the average relative humidity increased by 10 percent at two heights. However, humidity was still within the appropriate range of 55-85 percent. Compared with the control barn, the average mass concentration of ammonia and carbon dioxide in the treatment barn decreased by 0.17 and 81 mg/m<sup>3</sup>, respectively; and the average HLI decreased by 2.84 ( $P<0.01$ ). Compared with beef in the control barn, the respiratory rate of the experimental beef was decreased by 22 beats / min, rectal temperature was decreased by 0.35°C, and skin temperature was decreased by 1.04°C ( $P<0.01$ ). Throughout the experimental period, the beef in the treatment barn never experienced any sickness, and daily weight gain was 0.92 kg/d; while the morbidity rate of beef in control barn was up to 47 percent, and daily weight gain was 0.54 kg/d ( $P<0.01$ ). Operation of this system for two months could earn 13 564.96 Yuan of profit. The results showed that the application of a wet curtain cooling fan-fiber duct in an open-sided beef barn was effective in relieving heat stress of beef. The application of this system in Southern China, which is hot and humid, is technically and economically feasible.

**Key words:** cooling; humidity control; jets; wet curtain cooling fan-fiber duct; open-sided beef barn

(责任编辑: 张俊芳)