

缓解奶牛热应激的喷淋水滴粒径研究

丁涛¹ 孙宝玺^{1,2} 施正香^{1,3} 王宗伦^{1,2} 姚春霞^{1,2} 张驰也^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市供水管网与安全节能中心, 北京 100083;
3. 农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为探讨夏季缓解奶牛热应激喷淋水滴粒径对降温效果的影响,通过现场实验测试了3种平均喷淋水滴粒径(0.829、0.947、1.127 mm)缓解奶牛热应激效果。实验中利用热像仪采集奶牛体表温度,同时测定呼吸频率、直肠温度生理指标,并在此基础上利用Merkel焓差理论分析计算奶牛喷淋降温换热量。结果表明,喷淋过程中,3种粒径(0.829、0.947、1.127 mm)在奶牛脖颈区域平均降温为0.7、1.1、0.9℃,腹部区域平均降温为0.7、1.4、1.5℃,平均呼吸频率分别降低0.6、4.2、2.1次/min;喷淋结束后,3种粒径在奶牛脖颈区域平均降温为0.2、0.4、0.6℃,腹部区域平均降温为0.1、0.5、0.6℃,平均呼吸频率降低-0.4、1.4、1.2次/min。喷淋前后奶牛直肠温度均控制在稳定范围内,且平均喷淋水滴粒径0.947 mm和1.127 mm低于0.829 mm时的奶牛平均直肠温度。3种平均喷淋水滴粒径对应的奶牛单位时间换热量分别为417.4、469.9、430.4 W,其中0.947 mm平均喷淋水滴粒径下换热量最大。因此,平均喷淋水滴粒径0.947 mm更适用于夏季奶牛喷淋降温。

关键词: 奶牛; 喷淋水滴粒径; 热应激

中图分类号: S817.3; S852.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0264-06

Investigation on Spraying Droplet Diameter for Alleviating Heat Stress of Cows

DING Tao¹ SUN Baoxi^{1,2} SHI Zhengxiang^{1,3} WANG Zonglun^{1,2} YAO Chunxia^{1,2} ZHANG Chiye^{1,2}
(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center of Safety and Energy Saving Technology for Water Supply Network System, Beijing 100083, China
3. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of relieving heat stress of cows was verified by three kinds of average spraying droplet diameter (SDD) (0.829 mm, 0.947 mm and 1.127 mm) through field test. In the test, the body surface temperature of dairy cow was collected by thermal imager; the respiratory rate and physiological index of rectal temperature were measured at the same time. Based on this, the theory of enthalpy difference of Merkel was used to calculate the heat transfer of spraying cooling. The results showed that during the process of spraying, for three kinds of SDD (0.829 mm, 0.947 mm and 1.127 mm), the average reductions of temperature were 0.7℃, 1.1℃ and 0.9℃ in the region of neck; in the region of abdominal, the average reductions of temperature were 0.7℃, 1.4℃ and 1.5℃, respectively; and the average respiratory rates were decreased by 0.6, 4.2 and 2.1 times per minute, respectively. After spraying, for three kinds of SDD, the average reductions of temperature were 0.2℃, 0.4℃ and 0.6℃ in the region of neck; in the region of abdominal, the average reductions of temperature were 0.1℃, 0.5℃ and 0.6℃, respectively, and the average respiratory rates were decreased by -0.4, 1.4 and 1.2 times per minute, respectively. The rectal temperature was controlled within the stable range before and after spraying. The average rectal temperatures under SDD of 0.947 mm and 1.127 mm were lower than that under SDD of 0.829 mm. Under three kinds of SDD, the heat exchanges of cows in unit time were 417.4 W, 469.9 W and 430.4 W, respectively, which showed that heat exchange reached the maximum under SDD of 0.947 mm. In summary, the SDD of 0.947 mm was more suitable for the cooling of dairy cows in summer.

Key words: dairy cow; average spraying droplet diameter; heat stress

收稿日期: 2017-01-05 修回日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31402115)、国家奶牛产业技术体系项目(CARS-37)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015SYL001)和国家级大学生创新性计划项目(201610019072)

作者简介: 丁涛(1974—),女,副教授,博士,主要从事流体动力学和农业生物环境研究,E-mail: dingtao@cau.edu.cn

引言

夏季高温是导致奶牛热应激的直接因素。热应激状态会使奶牛采食量下降、呼吸频率和心率增加，产奶量降低，严重时可能导致奶牛死亡^[1-4]。在多种降温方式中，喷淋降温被认为是降温效果最直接、明显的方式之一^[5]，在养殖场得到广泛的应用。

国内外学者在喷淋降温缓解奶牛方面做了大量研究，首先，有学者针对喷淋降温系统中喷嘴组合方案、喷嘴优化选择和喷淋水滴特性等方面进行研究^[6-9]；其次有学者针对喷淋时长、间隔时间对降温效果的影响进行了试验评估^[10]；蔡景义等^[11]和刘海林等^[12]分别从呼吸频率、直肠温度、心率、产奶量、血液指标不同角度来衡量喷淋通风方式对缓解奶牛热应激的效果；此外，在喷雾降温方式中吴武平等^[13]和丁露雨等^[14]对肉牛的直肠温度、呼吸频率和日增产量进行了测定。但目前喷淋降温研究还未涉及喷淋现场奶牛换热量和平均喷淋水滴粒径对缓解热应激的效果分析。

针对以上问题，本文通过现场实验测试研究奶牛喷淋降温的效果。选取 3 种平均喷淋水滴粒径性能良好的喷头（日本池内 9060、9080、90100）^[9]，利用热像仪记录奶牛体表温度，温湿度记录仪、风速仪分别记录测试环境温湿度和风速，基于焓差理论计算喷淋条件下的奶牛体表和周围空气之间的换热量，建立平均喷淋水滴粒径与喷淋前、后奶牛呼吸频率、体表温度、直肠温度和换热量之间的关系，明确平均喷淋水滴粒径对奶牛热应激缓解效果的影响，为实际生产提供理论指导。

1 材料与实验测试方法

1.1 实验地点及对象

2016 年 7 月 1 日—7 月 31 日在天津市神驰农牧发展有限公司奶牛养殖场进行。奶牛舍为开放式成年泌乳牛舍，南北走向，左右两侧为对称布局。牛舍长度 171 m，单跨 5.9 m，共计 29 跨，单侧宽度为 13 m。舍内风机为新型扩散器抗流风机^[15]，额定电压 380 V，额定功率 0.4 kW，额定转速 700 r/min。颈枷位置风机均匀布置，相邻风机间距 12 m。风机工作时间为 08:00—17:00。奶牛舍整体布置如图 1 所示。

1.2 实验测试方法

牛舍呈对称分布，实验测试中选取奶牛舍右侧作为研究区域（图 2a 所示），将该区域内的喷淋设备更换为实验室内测试研究的日本池内 9060、9080、90100 型号的喷头（图 2b 所示）。喷头位于颈

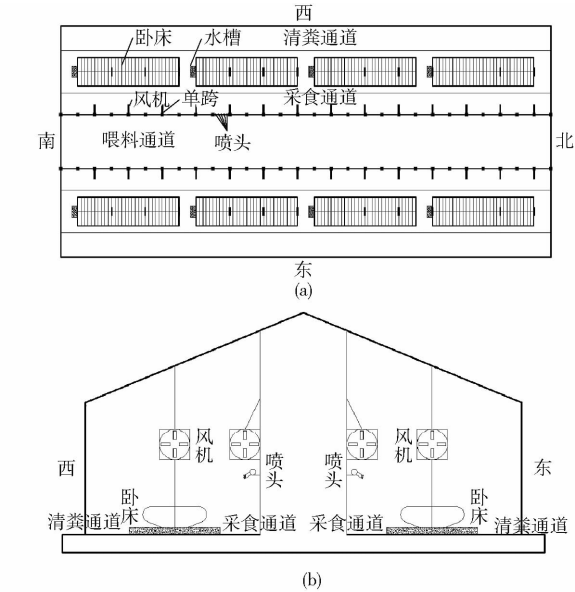


图 1 奶牛舍平面及立面示意图
Fig. 1 Plan view and facade view diagrams of cow barn



图 2 现场实验测试
Fig. 2 Photos of experiment

枷上方 0.3 m 处，串联于供水管路中。相邻喷头间距 1.2 m（图 1 所示）。现场喷淋管路压力为 0.1 MPa，经 LPM 激光雨滴谱仪测得在 0.1 MPa 下 3 种喷头的平均喷淋水滴粒径分别为：0.829、0.947、1.127 mm^[16]。奶牛舍喷淋制度为喷淋 2 min，间歇 7 min，周期性循环。实验测试中采用 3 个时间节点：喷淋前，即喷淋开始前 3 min；喷淋时，即喷淋期间；喷淋后，即喷淋结束后 3 min。

1.2.1 风速测试方法

利用热线式风速仪测定测试区域风速，每 5 s 读取一次数值，读取 10 次取平均值作为测定位置的风速值。

1.2.2 生理指标测试方法

生理指标包括奶牛体表温度、直肠温度和呼吸频率。测试期间，每次测定 1 头奶牛在喷淋前、喷淋时、喷淋后 3 个时刻的生理指标，实验测试由 3 人同时进行，分别负责测定同一时刻的奶牛体表温度、直肠温度、呼吸频率。实验过程中为防止因奶牛走动而对采集数据造成影响，开启颈枷锁，将奶牛限制于喷淋测试区域。数据采集之后结束对该奶牛的测试，选取另一头奶牛作为下一个测试对象，同一平均

喷淋水滴粒径下随机测定 30 头奶牛。更换不同喷头后,重复上述测定,在不同平均喷淋水滴粒径、不同喷淋时刻下测试奶牛的生理指标。在喷淋前、喷淋时和喷淋后这 3 个时刻分别利用秒表记录奶牛的腹部起伏次数作为呼吸频率^[17];用热像仪(型号 S6,上海热像机电科技股份有限公司,测温范围为 -20 ~ 650℃,热像仪测试数据显示至 0.1℃,测量精度为 ±2%)记录喷淋过程中奶牛体表温度红外成像分布图;利用电子直肠温度计(K-028 SY 型,莆田市科丽电子有限公司,精度为 ±0.1℃,范围为 32 ~ 42.9℃)测量奶牛直肠温度。

1.2.3 环境指标测试方法

环境指标包括温度、湿度。温湿度记录仪(型号 U14-001,北京天诺基业科技有限公司,温度精度 ±0.2℃,湿度精度 ±2.5%)布置于颈枷上方,用于记录实验测试环境的温度和湿度。

2 计算方法

2.1 体表温度测试方法

由于奶牛体表各个区域对温度变化敏感程度不同,利用热像仪将记录的温度成像图分为 2 个区域:脖颈区域和腹部区域(如图 3 所示)。在脖颈区域平均选取 6 个点位,取其平均值作为脖颈处的温度;同样在腹部区域平均选取 12 个点位,取其平均值作为腹部处的温度。同一时刻同一区域拍摄记录 4 次,最后取其平均值作为最终温度结果。

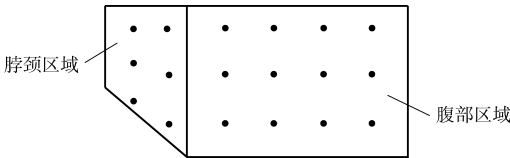


图 3 体表温度点位布置图
Fig.3 Layout points of skin temperature

2.2 换热量计算方法

利用换热量衡量奶牛降温效果以及缓解热应激程度。奶牛体内的热量 Q 通过导热方式传导到奶牛表皮层,经过空气和奶牛体表水膜之间的对流换热将热量传递到空气中,达到缓解奶牛热应激的效果。热交换过程中包含了导热、对流传热和传质过程。

相关学者通过分析整个传热传质过程来确定对流换热量与蒸发换热量的数值^[18-20],但是这些计算公式中物理量取值要依赖个体情况,以及迭代计算造成的复杂性,使得公式应用具有一定的局限性。本文采用 Merkel 焓差计算公式,将换热过程从能量焓角度进行整体计算,简化计算过程,现场实验测试所需的物理量容易测量,可行性高,适用于实际应

用。计算公式推导过程如下^[21]:

单位时间内水与空气的显热交换量

$$dQ_{\alpha} = \alpha(t - \theta)dF \tag{1}$$

单位时间内水与空气的潜热交换量

$$dQ_{\beta} = \gamma_w \beta_x(x'' - x)dF \tag{2}$$

水和空气的总换热量为

$$dQ = dQ_{\alpha} + dQ_{\beta} = [\alpha(t - \theta) + \gamma_w \beta_x(x'' - x)]dF \tag{3}$$

- 式中 α ——空气与水表面的接触散热系数,℃
 t ——水体表面饱和空气边界层温度,℃
 θ ——主体空气干球温度,℃
 γ_w ——水的汽化潜热,kJ/kg
 β_x ——以含湿量差为基准的空气与水表面间的散质系数,kg/(m³·s)
 x'' ——饱和空气边界层水蒸气质量比,kg/kg
 x ——主体空气层中的水蒸气质量比,kg/kg
 dF ——空气与水体的接触面积,m²

根据刘易斯关系式,在空气与水的热质交换中,其显热交换系数与潜热交换系数之比为一常数,即 $\beta_x = \alpha/c_p$ (其中 c_p 为湿空气的比热容)。将水的汽化潜热用水蒸气的焓值代替,同时湿空气的比热容用 $1.01 + 1.84x''$ 代替,有

$$dQ = \beta_x[(1.01 + 1.84x'')(t - \theta) + (2500 + 1.84\theta)(x'' - x)]dF = \beta_x(i'' - i)dF \tag{4}$$

- 式中 i'' ——水体表面饱和空气边界层空气的焓值,kJ/kg
 i ——主体空气层空气的焓值,kJ/kg

3 结果与分析

在每种喷淋水滴粒径下,实验测试 30 头奶牛的生理指标和换热量并对数据进行分析处理,结果以平均值 ± 标准差表示,采用 SPSS 软件分析各因素数据之间的显著性差异^[22]。

3.1 奶牛体表温度

利用热像仪采集奶牛体表温度,结果如图 4 所示。图中按照体表温度布置图选取温度代表点。

奶牛体表温度变化情况如表 1 所示。奶牛脖颈区域和腹部区域中,喷淋时刻的降温效果显著,3 种平均喷淋水滴粒径下降温范围在 0.7 ~ 1.5℃ 之间;待喷淋结束一段时间后,体表温度开始回升,但仍然低于喷淋前的温度,降温效果延续,降温区间在 0.1 ~ 0.6℃ 之间。

实验选用成年泌乳牛,近似认为实验个体间生理状况相同,不存在因为个体差异而导致结果发生改变的现象。实验测试表明对于奶牛脖颈区域和腹部区域,大粒径 0.947 mm、1.127 mm 平均

喷淋水滴粒径下比 0.829 mm 平均喷淋水滴粒径下降温更大,降温效果更加明显;但 0.947 mm 和 1.127 mm 平均喷淋水滴粒径之间降温效果相近,并不存在显著性差异。所以降温效果存在一定范围之内随平均喷淋水滴粒径增大而降温效果增加

的现象,而超过该范围,降温效果并不存在显著性差异,即平均喷淋水滴粒径增大的情况下并未有显著的降温效果差异。表中温差 I 为喷淋前温度与喷淋时温度之差;温差 II 为喷淋前温度与喷淋后温度之差。

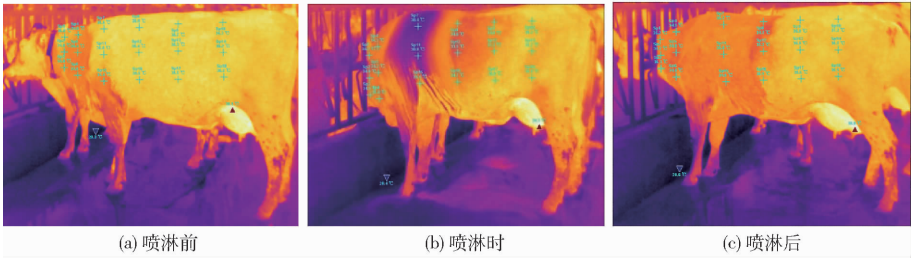


图 4 奶牛体表温度图

Fig.4 Images of dairy cow skin temperature

表 1 3 种平均喷淋水滴粒径下平均奶牛体表温度

Tab.1 Average dairy cow skin temperature under three average spraying droplet diameters

区域	粒径/mm	喷淋前温度/℃	喷淋时温度/℃	喷淋后温度/℃	温差 I /℃	温差 II /℃
颈部	0.829	35.6 ± 0.5 ^a	34.9 ± 0.7 ^a	35.4 ± 0.7 ^a	0.7 ± 0.5 ^a	0.2 ± 0.6 ^a
	0.947	36.0 ± 1.0 ^a	35.0 ± 1.0 ^a	35.7 ± 0.8 ^a	1.1 ± 0.8 ^a	0.4 ± 0.7 ^a
	1.127	35.5 ± 0.7 ^a	34.6 ± 0.5 ^a	34.9 ± 0.5 ^a	0.9 ± 0.8 ^a	0.6 ± 0.8 ^a
腹部	0.829	35.7 ± 0.8 ^a	35.0 ± 0.9 ^a	35.6 ± 0.8 ^a	0.7 ± 0.5 ^a	0.1 ± 0.6 ^a
	0.947	36.2 ± 1.0 ^a	34.9 ± 0.8 ^a	35.8 ± 0.8 ^a	1.4 ± 0.8 ^b	0.5 ± 0.7 ^a
	1.127	35.6 ± 0.9 ^a	34.0 ± 0.7 ^a	35.0 ± 0.6 ^a	1.5 ± 0.8 ^b	0.6 ± 1.0 ^a

注:表中同列不同字母表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

3.2 奶牛直肠温度

由于奶牛是恒温动物,正常生理状况下其直肠温度不会因外界因素改变而发生较大波动,其直肠温度在喷淋降温条件下仅为小幅度改变。奶牛的直肠温度正常范围为 37.5 ~ 39.5℃。由表 2 数据可以得到在喷淋前和喷淋后,0.947 mm 平均喷淋水滴粒径下奶牛的直肠温度均低于 0.829 mm、1.127 mm 平均喷淋水滴粒径下的直肠温度(在 $P < 0.05$ 水平有显著性差异),且在正常直肠温度范围内。

3.3 奶牛呼吸频率

不同平均喷淋水滴粒径下奶牛呼吸频率变化情况如表 3 所示。在 3 种平均喷淋水滴粒径下,相比喷淋前的呼吸频率,喷淋时分别降低 0.6、4.2、2.1 次/min(即差值 I);相比喷淋前的呼吸频率,喷淋后分别降低 -0.4、1.4、1.2 次/min(即差值 II)。从表 3 的数值可以发现在 0.947 mm 平均喷淋水滴粒径条件下,呼吸频率降低程度大于 0.829 mm、1.127 mm 平均喷淋水滴粒径,对于降低奶牛呼吸频率具有明显的效果,并且相较 0.829 mm 平均喷淋水滴粒径具有显著性差异。喷淋结束后,在 0.829 mm 平均喷淋水滴粒径下呼吸频率较喷淋前有所上升,而 0.947 mm 和 1.127 mm 平均喷淋水滴粒径下呼吸频率仍低于喷淋前。因此,平均喷淋水滴粒径 0.947 mm 相比 0.829、1.127 mm,对降低奶牛呼吸频率具有更好的效果,更适合于奶牛喷淋降温中采用。

表 2 3 种平均喷淋水滴粒径下平均奶牛直肠温度

Tab.2 Average rectal temperature under three average spraying droplet diameters

粒径/mm	喷淋前/℃	喷淋后/℃
0.829	39.72 ± 0.18 ^a	39.78 ± 0.30 ^a
0.947	38.62 ± 0.22 ^b	38.76 ± 0.54 ^b
1.127	39.28 ± 0.17 ^c	39.20 ± 0.19 ^b

注:表中同列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

表 3 3 种平均喷淋水滴粒径下平均奶牛呼吸频率

Tab.3 Average respiration rate under three average spraying droplet diameters

粒径/mm	喷淋前/(次·min ⁻¹)	喷淋时/(次·min ⁻¹)	喷淋后/(次·min ⁻¹)	差值 I /(次·min ⁻¹)	差值 II /(次·min ⁻¹)
0.829	74.5 ± 8.7 ^a	73.9 ± 6.8 ^a	74.9 ± 8.1 ^a	0.6 ± 6.8 ^a	-0.4 ± 5.6 ^a
0.947	77.7 ± 9.6 ^a	73.4 ± 8.8 ^a	76.2 ± 7.6 ^a	4.2 ± 5.4 ^b	1.4 ± 7.8 ^b
1.127	71.4 ± 6.4 ^a	69.4 ± 6.5 ^a	70.2 ± 6.8 ^a	2.1 ± 4.9 ^b	1.2 ± 5.9 ^b

注:表中同列不同字母表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

3.4 奶牛换热量

采用 Merkel 焓差理论计算换热量。其中,假定奶牛体表附近空气近似为饱和空气边界层,取奶牛体表温度作为饱和空气温度,并且该区域为水蒸气饱和区域;奶牛舍内空气温度、湿度通过 HOBO 温湿度记录仪采集;采用热线风速仪测量奶牛站立区域的风速大小作为掠过奶牛体表的风速大小。现场风机正常开启条件下,在 1.5 m 高度处平均风速 $u = 1.52 \text{ m/s}$;当量直径 $d = 0.8 \text{ m}$;奶牛表皮面积 $A_s = 2.1 \text{ m}^2$ 。3 种平均喷淋水滴粒径下奶牛平均换热量如表 4 所示。

表 4 3 种平均喷淋水滴粒径下奶牛平均换热量

Tab.4 Average heat exchange under three average spraying droplet diameters

粒径/ mm	饱和边界 层温度/℃	主体空气 温度/℃	主体空气 湿度/%	换热量/ W
0.829	34.9±0.7 ^a	32.2±2.0 ^a	75.1±5.1 ^a	417.4 ^a
0.947	34.9±0.8 ^a	31.5±1.2 ^a	73.9±2.2 ^a	469.9 ^a
1.127	34.3±0.5 ^b	31.2±1.5 ^b	74.4±3.7 ^b	430.4 ^a

注:表中同列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

奶牛体表和空气之间的换热过程包括导热、对流以及热质交换,既有显热也有潜热换热量。采用 Merkel 焓差理论,基于能量守恒综合计算了热交换过程中的换热量,且公式中的各个物理量可以通过实验测试得到,便于工程计算。

从表 4 可以看出,当平均喷淋水滴粒径为 0.947 mm 和 1.127 mm 时,平均换热量均高于 0.829 mm,说明大粒径下换热显著;但在 0.947 mm 平均喷淋水滴粒径下平均换热量又高于 1.127 mm 下的换热量,说明换热量并非随平均喷淋水滴粒径增大而线性增长,存在着最佳平均喷淋水滴粒径。这是由于 0.947 mm 的水滴粒径形成的水膜铺展后能够与奶牛体充分接触,加速了换热过程,尤其是蒸发传递的潜热交换(Merkel 焓差理论能准确计算潜热交换量),所以在温度、湿度相差不明显时,0.947 mm 平均喷淋水滴粒径下的换热量高于其它粒径下的换热量。

4 分析与讨论

通过上述结果可知,在喷淋时选用 0.947 mm 和 1.127 mm 平均喷淋水滴粒径相比 0.829 mm 要取得良好的效果:在降低直肠温度、体表温度、呼吸频率、换热量等方面均存在着显著性差异,能一定程度上有效缓解奶牛热应激效应,为奶牛提供了更为适宜的环境。大粒径水滴具有相对较大的表面积,与体

表接触时更易在其表面进行铺展,进而覆盖在体表上的水膜面积愈大,使水膜与体表有充分接触,利于通过水膜进行蒸发以及对流换热,加速了整个传热传质过程,从而降低奶牛体表温度,达到缓解奶牛热应激的效果。

相比 1.127 mm 平均喷淋水滴粒径,0.947 mm 的呼吸频率降低程度更显著、换热量更大,表明降温效果并非随着粒径不断增大而增加,而是存在最佳喷淋水滴粒径。因为水滴粒径增大,滴落到奶牛体表后,会由于重力惯性以及较大的水滴动能使水滴顺腹部流下,没有在奶牛体表形成水膜或者充分与奶牛体表接触,反而减弱了整个热交换过程。此外在满足缓解奶牛热应激状态的同时,水滴粒径增大反而增加了污水生产量。因此,在奶牛物理降温过程中选用喷头时,应考虑在喷头工作压力下所形成的水滴粒径,选取合理粒径范围内的喷头。在现场实验条件下,本研究得到的适宜平均喷淋水滴粒径为 0.947 mm。

5 结论

(1) 喷淋过程中,3 种平均喷淋水滴粒径(0.829、0.947、1.127 mm)下在奶牛脖颈区域平均降温分别为 0.7、1.1、0.9℃;腹部区域平均降温分别为:0.7、1.4、1.5℃;喷淋结束后,在奶牛脖颈区域平均降温分别为 0.2、0.4、0.6℃;腹部区域平均降温分别为:0.1、0.5、0.6℃。0.947 mm 和 1.127 mm 平均喷淋水滴粒径相比 0.829 mm 对体表降温效果更加显著。

(2) 3 种平均喷淋水滴粒径下,喷淋前后奶牛直肠温度均控制在稳定范围内,且在平均喷淋水滴粒径 0.947 mm 下奶牛平均直肠温度低于 0.829、1.127 mm,更好地缓解了奶牛热应激。

(3) 喷淋过程中,3 种平均喷淋水滴粒径下平均呼吸频率分别降低为 0.6、4.2、2.1 次/min;喷淋结束后,平均呼吸频率降低 -0.4、1.4、1.2 次/min。其中平均喷淋水滴粒径 0.947 mm 对降低呼吸频率最为显著,其次为 1.127 mm。在喷淋结束后,平均喷淋水滴粒径 0.829 mm 条件下呼吸频率有所上升,没有达到预期的效果。

(4) 3 种平均喷淋水滴粒径下奶牛单位时间平均换热量分别为 417.4、469.9、430.4 W;其中 0.947 mm 平均喷淋水滴粒径下换热量最大,换热效果最明显。综合以上结论分析,确定适宜的平均喷淋水滴粒径为 0.947 mm。

参 考 文 献

1 王建平,王加启,卜登攀,等. 热应激对奶牛影响的研究进展[J]. 中国奶牛,2008(7): 21-24.

2 FLAMENBAUM I, WOLFENSON D, MAMEN M, et al. Cooling dairy cattle by a combination of sprinkling and forced ventilation and its implementation in the shelter system[J]. Journal of Dairy Science, 1986, 69(12): 3140-3147.

3 COLLIER R J, BEEDE D K, THATCHER W W, et al. Influences of environment and its modifications on dairy animal health and production[J]. Journal of Dairy Science, 1982, 65(11): 2213-2227.

4 IGONO M O, JOHNSON H D, STEEVENS B J, et al. Physiological, productive, and economic benefits of shade, spray and fan system versus shade for Holstein cows during summer heat[J]. Journal of Dairy Science,1987, 70(5): 1067-1079.

5 张凡建,关文怡,岳圆,等. 物理性降温措施缓解奶牛热应激的研究进展[J]. 中国畜牧兽医,2012,39(6): 236-239.

ZHANG Fanjian, GUAN Wenyi, YUE Yuan, et al. Taking physical cooling measures to protect dairy cows from heat stress[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2012, 39(6): 236-239. (in Chinese)

6 张家发,吴健,毛涛涛,等. 开放式奶牛舍喷淋降温系统喷淋组合方案的优化[J]. 中国奶牛,2014(22): 34-37.

7 刘继昂,丁涛,施正香,等. 奶牛场喷淋降温系统中喷嘴组合喷淋方案研究[C]//生态环境与畜牧业可持续发展学术研讨会暨中国畜牧兽医学会 2012 年学术年会和第七届全国畜牧兽医青年科技工作者学术研讨会会议论文集,2012.

8 丁涛,李浩,何晓东,等. 夏季奶牛场喷淋降温系统中喷嘴的优化选择[J]. 中国畜牧杂志,2012,48(10): 33-37.

9 丁涛,宏帅,施正香,等. 缓解奶牛热应激的喷淋水滴特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7): 323-331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160744&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.044.

DING Tao, HONG Shuai, SHI Zhengxiang, et al. Experiment on droplet characteristics of spray cooling to relieve cows heat stress [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):323-331. (in Chinese)

10 李浩. 开放式奶牛舍喷淋降温系统与降温效果评估[D]. 北京: 中国农业大学,2013.

LI Hao. Optimization and evaluation of cooling effectiveness on spray cooling system in open dairy barns[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

11 蔡景义,冯堂超,廖阔遥,等. 封闭型牛舍风机喷淋降温 and 饲料添加铬改善肉牛生长性能[J]. 农业工程学报,2015, 31(19): 190-194.

CAI Jingyi, FENG Tangchao, LIAO Kuoyao, et al. Cooling with fans and spray in closed cowshed and chromium supplementation improving growth performance of beef cattle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 190-194. (in Chinese)

12 刘海林,高帅,段洪峰,等. 喷淋降温对荷斯坦奶牛抗热应激的研究[J]. 家畜生态学报,2013,34(1): 44-59.

LIU Hailin, GAO Shuai, DUAN Hongfeng, et al. Study on the effect of spray cooling on heat-stress resistance of Holstein dairy cow[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2013, 34(1): 44-59. (in Chinese)

13 吴武平,李川,吴华东,等. 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 Wuping, LI Chuan,WU Huadong, et al. Cooling by interior spraying ventilation and roofing sprinkling ventilation on open beef cattle barn improving production performance of beef cattle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 187-193. (in Chinese)

14 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 Zhaozhui, et al. Effects of spraying cooling on open beef cattle barn in Southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 224-231. (in Chinese)

15 丁涛,施正香,杨建宝,等. 开放式奶牛舍扰流风机扩散器性能参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3): 319-327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160345&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.045.

DING Tao, SHI Zhengxiang, YANG Jianbao, et al. Optimization of diffuser parameters of mixing flow fans in open dairy house[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 319-327. (in Chinese)

16 宏帅. 物理降温缓解奶牛热应激喷淋水滴特性研究[D]. 北京: 中国农业大学,2016.

HONG Shuai. Research on droplet characteristics of spray cooling to relieveheat-stress of cow in summer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

17 BRAD S, MICHAEL J L, ROBERTL 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.

18 GEBREMEDHINK G, WU B X. A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer[J]. Journal of Thermal Biology, 2001, 26(6): 537-545.

19 GEBREMEDHINK G, WU B X. Simulation of sensible and latent heat losses from wet-skin surface and fur layer[J]. Journal of Thermal Biology, 2002, 27(4): 291-297.

20 KHAN Z A, BADRUDDIN I A, QUADIR G A, et al. A quick and accurate estimation of heat losses from a cow[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 313-323.

21 段小容. 空调系统冷却塔性能分析与诊断研究[D]. 长沙: 湖南大学,2011.

DUAN Xiaorong. Performance analysis and diagnosis of a fooling tower in an air-conditioning system[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)

22 程琼仪,刘继军,靳薇,等. 冷风机-风管对南方开放式肉牛降温效果[J]. 农业工程学报,2014,30(8): 126-133.

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 CSAE, 2014, 30(8): 126-133. (in Chinese)