

## 肉牛热应激研究进展

陈浩<sup>1</sup> 敖日格乐<sup>1\*</sup> 王纯洁<sup>2</sup> 斯木吉德<sup>1</sup> 阿日查<sup>1</sup> 张剑<sup>1</sup> 刘波<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 动物科学学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 兽医学院, 呼和浩特 010018)

**摘要** 为了解肉牛热应激研究进展,以“肉牛”、“生产性能”、“生化指标”、“分子调控机制”、“热应激防控”等为关键词,检索、总结和归纳了2008—2018年来肉牛热应激相关文献资料。研究发现:一方面,热应激可降低肉牛的生产性能、繁殖性能、免疫功能及抗氧化功能;激活肉牛交感-肾上腺髓质轴(SAM),下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴(HPT)及下丘脑-垂体-甲状腺轴(HPA);另一方面,热应激条件下肉牛可通过血液中miRNAs调控靶基因表达进而参与机体抗热应激反应。但在肉牛耐热基因筛选方面及热应激条件下肉牛营养标准的研究尚少,今后研究应根据不同程度热应激进而制定热应激条件下肉牛营养标准,在筛选肉牛耐热基因方面进行深入研究。

**关键词** 肉牛; 热应激; 生产性能; 热休克蛋白; 经济效益

**中图分类号** S854.3

**文章编号** 1007-4333(2019)12-0071-07

**文献标志码** A

## Research progress on the heat stress of beef cattles

CHEN Hao<sup>1</sup>, Aorigele<sup>1\*</sup>, WANG Chunjie<sup>2</sup>, Simujide<sup>1</sup>, Aricha<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>

(1. College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. College of Veterinary Medical, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract** In order to understand the research progress of beef cattle heat stress, literature related to heat stress in beef cattle over 2008 – 2018 are retrieved by using “beef cattle”, “production performance”, “biochemical indicators”, “molecular regulation mechanism” and “prevention and control of heat stress” as keywords. The retrieved documents are reviewed and analyzed. It is found that: On the one hand, the heat stress reduces the production performance, reproductive performance, immune function and antioxidant function of beef cattle, and activates the sympathetic-adrenal medullary axis (SAN), hypothalamic-pituitary-adrenal cortex axis (HPT) and hypothalamic-pituitary-thyroid axis (HPA); On the other hand, beef cattle can regulate target gene expression by miRNAs in blood under heat stress to participate in anti-heat stress response. However, there are only a few studies on the screening of heat-resistant genes and the nutritional criteria of beef cattle under heat stress. Future studies should focus on exploring optimal nutritional formulas for beef cattle under different degrees of heat stress and screening heat-resistant genes of beef cattle.

**Keywords** beef cattle; heat stress; production performance; heat shock protein; economic benefit

牛肉具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇及微量元素丰富等优点,因此随着人们生活水平的不断提高,牛肉在食用肉产品中所占份额逐步提高:2017年我国人均牛肉消费量为5.8 kg/人,并连续7年保持了上升的态势;2018年我国牛肉进口量为106万t,同比增长51.42%<sup>[1]</sup>。牛肉价格也在逐年攀升<sup>[2]</sup>。因此,我国不断加大标准化规模养殖推进力度,不断改

造升级规模肉牛养殖场<sup>[3]</sup>。但由于大部分肉牛产区夏季高温、高湿,极易引起肉牛产生热应激,导致肉牛生产性能下降,进而降低了肉牛养殖经济效益,极大限制了我国肉牛产业的快速发展。

动物热应激反应是指当动物受到超过本身体温调节能力的温度刺激时,所引起机体的非特异性反应和特异性障碍在内的全身性适应症<sup>[4]</sup>。已有研究

收稿日期: 2019-04-28

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(201602051)

第一作者: 陈浩, 博士研究生, E-mail: 1120644355@qq.com

通讯作者: 敖日格乐, 教授, 主要从事牛生产学与产品品质研究, E-mail: aori6009@163.com

表明当动物处于热应激状态时,其营养代谢水平、免疫功能及繁殖性能显著下降,严重时会导致动物发生疾病甚至死亡<sup>[5-7]</sup>。目前,集约化养殖程度较高的鸡和猪的热应激已有深入研究<sup>[8-9]</sup>。热应激对奶牛产奶性能和繁殖性能方面的影响也有初步探讨<sup>[10-11]</sup>。在热应激调控研究多集中于研究缓解热应激的营养添加剂、增加喷淋设施及为放牧肉牛选择最佳的放牧时间等生产管理的方式改善肉牛热应激<sup>[5]</sup>。因此,为了解肉牛热应激研究进展,本研究拟以“生产性能”、“生化指标”、“分子调控机制”、“热应激防控”为关键词,检索2008—2018年文献资料,以热应激对肉牛生理生化指标及生产性能的影响为切入点,对肉牛热应激状态下的分子调控机制等方面进行综述,总结归纳肉牛热应激的危害及肉牛热应激的作用机理,以期为深入研究肉牛热应激提供基础。

## 1 热应激机理

机体受到内外环境刺激时,除了引起与刺激因素相关的特异性反应外,还引起一系列与刺激因素无直接关系的非特异性反应,这类非特异性反应称为应激或应激反应。热应激是指动物机体所处环境温度大于等热区中舒适区的上限,引起非特异性防御应答反应的全身性适应症<sup>[12]</sup>。通过环境指标能够判断动物是否处于热应激状态,温湿指数是综合环境温湿度来判断热应激状态的常用环境参数<sup>[13]</sup>。当温湿指数(THI) $<72$ 时,肉牛无应激反应;当 $73<THI<78$ 时,表明肉牛将出现轻度热应激状态;当 $78<THI<89$ 时,肉牛处于中度热应激状态;当 $THI>90$ 时,说明肉牛正在遭受重度热应激,严重时可能引起死亡<sup>[14]</sup>。

热应激反应机制较为复杂,机体的大多数器官和组织均参与活动,由神经内分泌系统和免疫系统的一系列调节活动调节机体以应对刺激。此过程由下丘脑-垂体-甲状腺轴、下丘脑-垂体-肾上腺皮质系统及下丘脑-垂体-生长轴紧密结合实现;中枢神经系统具有主导作用,其他系统起到执行作用,神经系统调节机体内各组织器官的活动,以应对刺激,维持机体和外界环境的统一。

## 2 热应激对肉牛的影响

### 2.1 热应激对肉牛生理指标的影响

当处于热应激状态时,肉牛通过增加呼吸频率

等方式增强散热进而维持体温的恒定,以缓解热应激,因此也可通过肉牛直肠温度和呼吸频率判断肉牛是否处于热应激状态。在夏季高温高湿环境下,宣汉黄牛、西杂牛(西门塔尔牛 $\times$ 宣汉黄牛)及犏牛(娟珊牛 $\times$ 麦洼牦牛)的呼吸频率和直肠温度均显著升高<sup>[15]</sup>。史彬林等<sup>[16]</sup>通过研究热应激状态和非应激状态下试验牛的呼吸频率和直肠温度发现,试验牛在热应激期间的直肠温度和呼吸频率( $39.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $63.88\text{次}/\text{min}$ )极显著高于非应激期( $37.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $23.08\text{次}/\text{min}$ )。张庆茹等<sup>[17]</sup>通过比较不同季节肉牛生理指标,发现肉牛夏季热应激期间呼吸频率( $63.88\text{次}/\text{min}$ )和直肠温度( $39.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ )极显著高于冬季非应激期间( $23.08\text{次}/\text{min}$ 和 $37.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),表明热应激对肉牛呼吸频率及直肠温度均产生较大影响。热应激对肉牛的呼吸频率和直肠温度有显著影响,但肉牛生理指标的显著升高对肉牛机体的呼吸系统等方面是否有不利影响,有待进一步深入研究。

### 2.2 热应激对肉牛生产性能的影响

动物处于热应激状态时,通过降低采食量进而降低机体产热以维持自身机体的热平衡,这将导致动物生产性能的降低。蒲启建等<sup>[15]</sup>通过比较热应激对不同品种(系)青年肉牛生产性能的影响,发现在6月份不同品种肉牛的单位体重DMI较热应激发生前均出现了不同程度的降低,平均日增重(ADG)较4月份则显著降低( $P<0.05$ )。O'Brien等<sup>[18]</sup>研究表明在热应激状态下,肉牛DMI显著减少导致ADG极显著下降( $P<0.01$ )。杂交肉牛在夏季热应激期间粗蛋白、粗脂肪及钙、磷的表观消化率较非应激期间均降低。但在热应激期间日粮能量过高,易导致动物机体产热过多,加重热应激对动物的损害<sup>[19]</sup>。因此,在实际生产中通过营养调控措施缓解热应激对动物生产性能的影响,要对营养水平的配比严格把控。

### 2.3 热应激对肉牛内分泌指标和生化指标的影响

内分泌系统通过多种激素调控机体的生理机能以维持内环境的相对恒定。当机体受到应激时,几乎所有组织和器官均参与应对刺激因子产生的影响;通过交感-肾上腺髓质轴,下丘脑-垂体-肾上腺皮质系统及下丘脑-垂体-甲状腺轴共同调节机体来应对应激。宋小珍等<sup>[20]</sup>研究表明在热应激条件下,锦江黄牛血清中三碘甲状腺原氨酸(T<sub>3</sub>)和甲状腺素(T<sub>4</sub>)含量显著下降,COR含量显著上升;热应激使HPT轴受阻导致TSH的合成和释放发生障碍,处

于热应激状态下的肉牛将减弱甲状腺机能,减少产热进而减少 T3 和 T4 的分泌,以提高机体对热应激环境的适应。Scharf 等<sup>[21]</sup>报道急性热应激状态下肉牛血清 GLU 含量升高,而慢性热应激时则会降低。热应激将引起肾上腺交感神经兴奋,增强肾上腺素分泌进而提高机体血液 GLU 含量,随着热应激时间的延长,糖异生作用也将增强以维持血液 GLU 恒定。热应激影响肉牛血清激素的正常分泌,当热应激持续时间较长时,机体血清激素分泌重新达到平衡,新的内环境稳态下肉牛生理机能是否和非应激状态下相同,有待进一步研究

#### 2.4 热应激对肉牛免疫功能及抗氧化功能的影响

热应激通过影响动物机体内血清细胞因子的改变进而引起动物机体免疫系统的变化。细胞因子是指机体遭受应激后所产生的内源分子,也是机体免疫应答的效应成分。主要受应激刺激敏感的细胞因子包括白介素-2,白介素-4、肿瘤坏死因子- $\alpha$  及免疫球蛋白 G 等<sup>[22]</sup>。白丹丹<sup>[23]</sup>通过比较不同季节三河牛血清中免疫功能相关指标发现,处于夏季热应激状态(THI = 73.20)的三河牛血清中 IL-2, IL-4、IFN- $\gamma$  及 IgG 含量显著低于( $P < 0.05$ )春季非应激期(THI = 50.23)。Gentile 等<sup>[24]</sup>研究发现热应激可引起下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴反应,进而抑制淋巴细胞的增殖,导致机体免疫功能的下降。肉牛发生热应激时,机体内免疫因子含量发生变化,免疫功能遭到抑制,导致肉牛抗病力下降进而损害肉牛的健康。

#### 2.5 热应激对肉牛繁殖性能的影响

牛的繁殖性能随着生长环境温度的变化而发生改变,牛在温带地区生产效率最高,热应激会导致公牛性欲减退、精子数量及精液质量下降,并引起母牛发情及排卵异常,进而造成繁殖力下降等严重危害<sup>[25]</sup>。在遭受热应激时,肉牛机体下丘脑-垂体-睾丸轴的调控被抑制,下丘脑分泌功能下降,促性腺激素释放激素分泌水平降低,引起生殖激素的分泌不足进而导致生殖功能下降,严重时甚至导致动物不育<sup>[25]</sup>。高温会引起动物睾丸温度升高,当动物睾丸温度升高至 38 °C 时,会导致公牛精子数量急剧减少且活力减退;且睾丸温度升高时会减弱血液-睾丸的屏障作用,精子发生自体免疫引起顶体脱落,进而导致精子畸形率升高<sup>[26]</sup>。在热应激状态下,肉牛体内雌二醇的分泌水平显著下降,这导致肉牛极易发生发情异常的现象,且热应激期间肉牛采食量的下降

会导致营养物质摄入不足,这对母牛配种和受孕的成功率均有较大的影响<sup>[27]</sup>。热应激状态下的母牛为加速散热,皮肤血管扩张,导致流经子宫的血流量减少,这对于胚胎的发育也会产生不利影响<sup>[28]</sup>。综上所述,热应激可降低肉牛生殖激素分泌量,降低精液质量导致肉牛繁殖性能下降。

### 3 肉牛热应激的防控措施

缓解肉牛热应激的措施主要有物理降温,饲料中添加抗应激的添加剂、营养调控及加强肉牛抗热应激品种选育等。

#### 3.1 物理降温措施

夏季缓解肉牛热应激的物理措施主要有风机通风、喷淋或喷雾结合通风以及湿帘负压通风等。风机通风是通过提高空气流速以增加对流的热传导,但这种降温方式在舍内温度低于牛体温度或体表潮湿时具有显著作用。喷淋降温易在牛体表和舍内积水,牛体表大量积水会形成绝缘作用,增加热负荷进而阻碍对流散热,舍内积水会形成高湿环境进而加重热应激程度,且易滋生细菌引起肉牛健康问题<sup>[29]</sup>。因此,风机通风一般需结合喷淋或喷雾系统进行降温,利用洒水装置将牛被毛浸湿,结合风机通风以降低牛体温度。陈昭辉等<sup>[30]</sup>比较研究吹风和喷淋 2 种降温措施,结果表明:喷淋可降低舍内温度 2 °C 并使温湿指数降低 2.2;而采取喷淋结合通风措施可降温 7.5 °C 并使温湿指数下降 6.0。侯引绪等<sup>[31]</sup>研究发现喷雾通风系统可降低肉牛体感温度和呼吸频率,缓解肉牛热应激状况,提高肉牛的免疫功能进而提高肉牛生产性能。李川等<sup>[32]</sup>也进行了类似的报道,喷淋通风系统可改善牛舍内湿热环境,提高动物福利。以上研究表明,喷淋通风系统可有效降低牛舍内温度,缓解热应激给舍饲肉牛造成的危害。进一步研究可结合牛舍实际情况,探究最佳喷淋量和通风量,以保持肉牛健康状况及降低养殖成本。

#### 3.2 营养调控措施

在高温环境下,肉牛采食量和营养消化吸收率均有所下降,通过提高日粮蛋白质和能量水平,提升日粮质量以缓解肉牛营养摄入不足的影响。维生素在机体内起到辅酶催化作用,维生素 C 和 E 在动物机体内参与氧化还原反应,改善肉牛的免疫功能和抗氧化能力<sup>[33]</sup>。在正常生理状况下,肉牛自身合成的维生素 C 可满足生理需要,但在热应激状态下,

其合成水平下降,需求量增加<sup>[34]</sup>。在热应激状态下,垂体大量分泌促肾上腺皮质激素进而激活蛋白激酶,经过,酶反应生产皮质酮和皮质醇。Mahmoud等<sup>[35]</sup>研究发现维生素C可以抑制热应激状态下机体皮质酮合成途径中羟化酶的活性进而降低肾上腺素类固醇的产生,提高动物的耐热能力。热应激状态下肉牛甲状腺功能受到抑制,在日粮中添加维生素C可显著提高血清中T3和T4,改善甲状腺功能,进而提高机体生产性能<sup>[36]</sup>。机体缺乏营养时,miR-80表达量下调,直接靶向CRBE-1以调节机体能量代谢,表明动物处于热应激状态时,可通过miRNAs作用以调节机体能量代谢<sup>[37]</sup>。在饲料中添加有机铬可缓解肉牛热应激,促进肉牛生长,并提高其免疫功能;在饲料中添加硫酸锌酸和二酮类等药物可提高动物抗热应激能力<sup>[38]</sup>。由于饲料中所添加的抗热应激药物多有药物残留,且使动物本身产生耐药性,因此关于中草药代替抗应激药物作为动物抗热应激添加剂的研究成为热点。Song等<sup>[39]</sup>研究发现中药可降低肉牛体温,提高肉牛生长性能和消化率,缓解热应激的影响;日粮中添加中草药添加剂显著增强肉牛的免疫功能,缓解热应激危害<sup>[40-41]</sup>。张新雨等<sup>[42]</sup>通过在锦江黄牛日粮中添加100g的中草药复方,研究结果表明中草药复方可显著提高锦江黄牛的抗热应激能力,但对肉牛生产性能可能有负面影响。综上所述,在肉牛日粮中添加维生素C、中草药及有机铬等添加剂均能有效的缓解热应激带来的危害,但是抗热应激中草药物的毒副作用值得关注,针对不同生长状况的肉牛,在不同热应激程度下,研究抗热应激药物的最适添加剂量。

### 3.3 抗热应激品种的选育

牛的耐热性与品种(系)有着密切的关系,自然选择可加快耐热基因在群体内扩散,已有关于抗热应激肉牛的品种选育研究的较少。牛的耐热性状是数量性状,遗传力较低,常规育种效果并不明显<sup>[43]</sup>。我国黄牛相对于家牛属的其他群体,具有耐湿热及抗逆性强等鲜明的集团特征,这是中国黄牛资源的显著特点和遗传基础。蒲启建等<sup>[15]</sup>比较研究热应激状态下不同品种(系)肉牛血液生化指标及营养物质表观消化率,发现地方黄牛的耐热应激能力强于杂交肉牛。目前,借助分子标记辅助选择等分子育种手段可获得较快的遗传进展,这也成为抗热应激牛选育的突破点,关于奶牛耐热性状的候选基因已

取得较大的突破,已有的研究发现HSP70等基因可以作为奶牛耐热性状的候选基因<sup>[44]</sup>,可以作为筛选肉牛耐热性状候选基因的参考。鲁西黄牛中HSP70耐热B基因型频率高于荷斯坦奶牛,可将耐热B基因注射到不耐热的肉牛品种以提高其耐热性<sup>[45]</sup>。动物血液中miRNAs常用作一些疾病和组织损伤的生物标记物,是热应激状态下肉牛血清中高度表达的调控因子,参与调控肉牛免疫和氧化的进程<sup>[46]</sup>。肉牛耐热能力的差异是由其耐热性状相关基因的差异表达所决定的,通过利用基因表达谱芯片筛选热应激及非应激状态下肉牛耐热性状相关基因的差异表达。Zheng等<sup>[47]</sup>通过对热应激状态下牛血清中差异表达的miRNA进行分析发现,有8个miRNAs在血清中高度表达,其中miRNA主要通过HSP70家族(热休克蛋白家族)进行调控进而参与肉牛热应激调控。HSP70家族具有多基因、多结构及多功能的特点,已发现的HSP70家族的基因有HSP70-1、HSP70-2及HSP70-Hom等。HSP70基因在正常机体细胞中表达量较少,HSP70基因没有内含子,转录一旦启动就可产生成熟的mRNA,使HSP70快速表达,HSP70B基因无内含子,只有在热诱导时表达。蔡明成<sup>[48]</sup>通过比较红安格斯母牛在热应激和非应激下2个文库中miRNAs差异表达发现,热应激期间118个miRNAs表达上调,197个miRNAs表达下调;筛选出上调和下调的前10位的miRNAs进行靶基因预测及GO和Pathway分析,结果表明,热应激刺激下表达上调的miRNAs主要参与细胞凋亡和增殖等,表达下调的miRNAs主要参与免疫功能的调节,进一步揭示了miRNAs的高表达量可提高肉牛机体的免疫能力。因此,在热应激条件下,肉牛可通过miRNAs调控靶基因表达进而参与机体抗热应激反应。

热防御中HSPs的主要作用是增强组织细胞的热耐受能力,当组织细胞处于亚致死温度时,对致死温度的存活率显著升高,HSPs与热耐受的产生有密切关系。在热休克蛋白没有被诱导期间,即使机体对热十分敏感,也不能产生热耐受,如有一定量的HSPs存在时,不做预先处理,细胞也能够建立热耐受。无法获得热耐受的变异细胞不存在HSPs的诱导,抑制诱导HSPs的产生能阻止获得热耐受能力<sup>[47]</sup>。Kumar等<sup>[49]</sup>通过比较不同季节瘤牛HSP70家族基因表达量的差异,研究发现HSP70家族基因

*HSPA1A*、*HSPA1B* 及 *HSPA8* 在夏季热应激期间的表达量显著高于春季非应激期 ( $P < 0.05$ ), 其表达量的升高, 在一定程度上反映了肉牛机体的自我保护机制和对外界刺激的应对能力的提高, 白丹丹<sup>[23]</sup> 在比较不同季节三河牛 HSP70 家族基因表达量的差异时也有相同报道。综上所述, 热应激条件下, 肉牛可通过血清中 miRNAs 调控靶基因表达进而参与热应激反应, 热应激状态下肉牛 HSP70 家族基因表达量的升高可提高肉牛的抗热应激能力。今后的研究可加强肉牛耐热性状相关基因的筛选, 以为培育耐热性能较好的新品种(系)提供分子遗传学依据。

#### 4 展 望

热应激对肉牛的生产性能、免疫功能及繁殖性能等诸多方面均产生较大影响。进一步研究缓解肉牛热应激可从以下几个方面入手: 1) 可进行喷淋结合风机通风措施在不同热应激程度的最佳喷淋量及风机风力的细化研究, 以防止牛舍形成高湿环境危害肉牛健康; 2) 根据肉牛的生长发育规律, 调配合理的日粮以防止能量过高增加机体产热, 加重肉牛热应激程度; 3) 用于缓解肉牛热应激的中草药应标准化及规范化, 以降低其对肉牛生长发育的副作用, 且中草药缓解肉牛热应激的作用机制有必要进行深入研究; 4) 目前肉牛抗热应激的选育仅停留在杂交技术水平, 应借助分子育种技术, 筛选肉牛耐热性状的候选基因, 结合常规育种进行选育, 筛选和培育在耐热性强的肉牛。

#### 参考文献 References

[1] 岳宏. 中国肉牛产业可持续发展研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011  
Yue H. Study on sustainable development of beef-cattle industry in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011 (in Chinese)

[2] 曹兵海, 李俊雅, 王之盛, 郭爱珍, 刘继军, 罗欣, 张越杰. 2018 年肉牛牦牛产业技术发展报告[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(3): 133-137  
Cao B H, Li J Y, Wang Z S, Guo A Z, Liu J J, Luo X, Zhang Y J. 2018 year of beef cattle yak industry technology development report[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2019, 55(3): 133-137 (in Chinese)

[3] 孙彦琴, 魏金销, 郭利亚, 郭宏文, 谭旭信, 张晓建, 张栓玲, 白跃宇. 我国肉牛产业发展的现状及问题对策[J]. 中国草食动物科

学, 2018, 38(4): 64-67  
Sun Y Q, Wei J X, Guo L Y, Guo H W, Tan X X, Zhang X J, Zhang S L, Bai Y Y. The present situation and problems of China's beef cattle industry development[J]. *Chinese Journal of Herbivore*, 2018, 38(4): 64-67 (in Chinese)

[4] 黄莎. 热应激通过胰岛素介导的 PI3K/Akt 信号调控仔猪睾丸支持细胞乳酸合成及分泌[D]. 重庆: 西南大学, 2018  
Huang S. Heat stress regulates lactate secretion and synthesis by insulin-mediated PI3K/Akt signal in immature boar sertoli cells[D]. Chongqing: Southwest University, 2018 (in Chinese)

[5] Sevi A, Caroprese M. Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: A critical review[J]. *Small Ruminant Research*, 2012, 107(1): 1-7

[6] Jingar S C, Mehla R K, Singh M. Climatic effects on occurrence of clinical mastitis in different breeds of cows and buffaloes[J]. *Archivos De Zootecnia*, 2014, 63(243): 473-482

[7] Singh M, Chaudhari B K, Singh J K. Effects of thermal load on buffalo reproductive performance during summer season[J]. *Biological Science*, 2013, 1(1): 1-8

[8] 李永洙, 陈常秀, 金泽林, 郑中华. 热应激环境下育成鸡肠道菌群多样性及黏膜结构的相关性分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(1): 71-80  
Li Y Z, Chen C X, Jin Z L, Zheng Z H. Correlation analysis on adult chicken intestinal flora diversity and mucosal structure under heat stress environment [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(1): 71-80 (in Chinese)

[9] 余春莲. AMPK 信号通路负向调节热应激诱导仔猪睾丸支持细胞乳酸分泌[D]. 重庆: 西南大学, 2017  
Yu C L. AMPK signaling pathway negatively regulates heat stress-induced lactate secretion in piglet testicular sertoli cells [D]. Chongqing: Southwest University, 2017 (in Chinese)

[10] 单强, 马峰涛, 魏婧雅, 郝丽媛, 孙鹏. 热应激影响荷斯坦奶牛泌乳机制的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(3): 29-33  
Shan Q, Ma F T, Wei J Y, Hao L Y, Sun P. Research progress on the effect of heat stress on lactating mechanism of Holstein cows[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2019, 55(3): 29-33 (in Chinese)

[11] Roth Z, Wolfenson D. Comparing the effects of heat stress and mastitis on ovarian function in lactating cows: Basic and applied aspects[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2016 (S), 56: 218-227

[12] Bellagi R, Martin B, Chassaing C, Najar T, Pomiès D. Evaluation of heat stress on Tarentaise and Holstein cow performance in the mediterranean climate [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1371-1379

[13] 李如治. 家畜环境卫生学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003, 42-43  
Li R Z. *Livestock Environmental Hygiene* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003, 42-43 (in Chinese)

[14] Valipour M. Importance of solar radiation, temperature, relative humidity, and wind speed for calculation of reference

- evapotranspiration[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(2):17
- [15] 蒲启建,王之盛,彭全辉,张灿,景小平,胡瑞,邹华围. 热应激对不同品种(系)青年肉牛生产性能、营养物质表观消化率及血液生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(9):3120-3131  
Pu Q J, Wang Z S, Peng Q H, Zhang C, Jing X P, Hu R, Zou H W. Effects of heat stress on performance, nutrient apparent digestibility and blood biochemical indices of different breeds of young beef cattle[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(9):3120-3131 (in Chinese)
- [16] 史彬林,同素梅. 奶牛耐热评定指标的影响[J]. *中国奶牛*, 1996(2):20-22  
Shi B L, Yan S M. Effect of heat tolerance assessment indicators on dairy cows[J]. *Chinese Cow*, 1996(2):20-22 (in Chinese)
- [17] 张庆茹,郭红斌,张红德. 热应激对动物机体生理机能的影响[J]. *动物医学进展*, 2007(1):101-105  
Zhang Q R, Guo H B, Zhang H D. Effect of heat stress on physiological function of animal body[J]. *Progress in Animal Medicine*, 2007(1):101-105 (in Chinese)
- [18] O'Brien M D, Rhoads R P, Sanders S R, Duff G C, Baumgard L H. Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2010, 38(2):86-94
- [19] Bernabucci U, Lacetera N, Danielli P P, Bani P, Nardone A, Ronchi B. Influence of different periods of exposure to hot environment on rumen function and diet digestibility in sheep [J]. *International Journal of biometeorology*, 2009, 53(5):387-395
- [20] 宋小珍,付戴波,瞿明仁,杨食堂,刘道杨,徐振松. 热应激对肉牛血清内分泌激素含量、抗氧化酶活性及生理生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2012, 24(12):2485-2490  
Song X Z, Fu D B, Qu M R, Yang S T, Liu D Y, Xu Z S. Effects of heat stress on endocrine hormone content, antioxidant enzyme activity and physiological and serum biochemical indices of beef cattle[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(12):2485-2490 (in Chinese)
- [21] Scharf B, Carroll J A, Riley D G, Chase C C, Coleman S W, Keisler D H, Weaber R L, Spiers D E. Evaluation of physiological and blood serum differences in heat tolerant (Romosinuano) and heat susceptible (angus) *Bos taurus* cattle for determination of markers of sensitivity[J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(7):2321-2326
- [22] 许利凡,贺丛,王绿林,吴胜强,郭延俭,邓立新. 运输应激对夏南牛血清促肾上腺皮质激素、皮质醇、白介素-6、肿瘤坏死因子- $\alpha$ 水平的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014(15):88-90  
Xu L F, He C, Wang L L, Wu S Q, Guo Y J, Deng L X. Effects of transportation stress on the levels of serum adrenocorticotrophic hormone, cortisol, interleukin-6 and tumor necrosis factor-alpha in Xianan cattle [J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2014(15):88-90 (in Chinese)
- [23] 白丹丹. 不同季节对三河牛血液生化指标及冷热应激相关基因表达的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017  
Bai D D. Effect of different seasons on blood biochemical indexes and related genes expression of cold and heat stress in Sanhe cattle[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2017 (in Chinese)
- [24] Gentile N E, Andrekanic J D, Karwoski T E. Sexually diergic hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) responses to single-dose nicotine, continuous nicotine infusion, and nicotine withdrawal by mecamylamine in rats [J]. *Brain Research Bulletin*, 2011, 85(3):145-152
- [25] Soumya D, Chakravarty A K, Avtar S, Arpan U, Manvendra S, Saleem Y. Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review[J]. *Veterinary World*, 2016, 9(3):235-244
- [26] 王维. 热应激对种公牛繁殖机能的影响及对策[J]. *当代畜牧*, 2012(7):45-47  
Wang W. The effect of heat stress on reproductive function of breeding bulls and its countermeasures [J]. *Contemporary Animal Husbandry*, 2012(7):45-47 (in Chinese)
- [27] 车国顺. 刍议热应激对种公牛繁殖机能的影响及对策[J]. *农家顾问*, 2015(2):111, 136  
Che G S. Discussion on the influence of heat stress on the reproductive function of breeding bulls and its countermeasures [J]. *Farming Consultant*, 2015(2):111+136 (in Chinese)
- [28] Singh M, Chaudhari B K, Singh J K. Effects of thermal load on buffalo reproductive performance during summer season [J]. *Biological Science*, 2013, 1(1):1-8
- [29] Berman A. Forced heat loss from body surface reduces heat flow to body surface[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(1):242-248
- [30] 陈昭辉, 安捷, 王金环, 刘继军, 杨食堂. 南方夏季肉牛舍湿帘风机负压通风系统降温效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21):208-214  
Chen Z H, An J, Wang J H, Liu J J, Yang S T. Cooling effects of fan-pad negative pressure ventilation system on summer environmental conditions in beef cattle barn in southern China [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21):208-214 (in Chinese)
- [31] 侯引绪, 张凡建, 魏朝利, 蔡泽川, 李桂伶. 奶牛抗热应激物理性措施应用效果研究[J]. *中国奶牛*, 2012(01):42-43  
Hou Y X, Zhang F J, Wei C L, Cai Z C, Li G L. Study on the application effect of physical measures against cows heat stress resistance[J]. *Chinese cow*, 2012(1):42-43 (in Chinese)
- [32] 李川, 吴武平, 张泳楨, 舒邓群. 热应激对肉牛生产性能的影响及其调控措施[J]. *畜牧与兽医*, 2016, 48(4):129-133  
Li C, Wu W P, Zhang Y Z, Shu D Q. Effects of heat stress on performance of beef cattle and its control measures[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016, 48(4):129-133 (in Chinese)
- [33] 石海桥. 肉牛热应激及其营养调控措施[C]// 第六届中国牛业

- 发展大会论文集[C]. 北京:中国畜牧业协会牛业分会,2011:3
- Shi H Q. Heat stress and its nutritional regulation measures in beef cattle [C]. In: *Proceedings of the 6th China Cattle Industry Development Conference*. Beijing: China Animal Husbandry Association Cattle Industry Branch, 2011: 3 (in Chinese)
- [34] 张金宝,唐妹,殷斌,张玉彦,狄良娇,杨树鑫. 维生素 C 抗畜禽热应激作用机理研究进展[J]. 畜牧与兽医,2019,51(1):136-140
- Zhang J B, Tang S, Yin B, Zhang Y Y, Di L J, Yang S X. Progress in research on the mechanism of vitamin C resistance to heat stress in livestock and poultry[J]. *Livestock and Veterinary*, 2019,51(1):136-140 (in Chinese)
- [35] Mahmoud K Z, Edens F W, Eisen E J, Havenstein G B. Ascorbic acid decreases heat shock protein 70 and plasma corticosterone response in broilers (*Gallus gallus domesticus*) subjected to cyclic heat stress[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B Biochemistry & Molecular Biology*, 2004,137(1):35-42
- [36] 谢富. 维生素 C 对笼养蛋雏鸭生长性能及生化指标的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2009
- Xie F. Effects of dietary vitamin C on growth performance and anti-oxidative ability of laying ducklings in café[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [37] 付戴波. 夏季高温对锦江黄牛的影响及中药抗热应激复方添加剂的筛选[D]. 南昌:江西农业大学,2013
- Fu D B. Effect of temperature on Jinjiang yellow cattle in summer and selection of Chinese herb additive for thermoresistant[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [38] Rhoads R P, Baumgard L H, Suagee J K, Sanders S R. Nutritional interventions to alleviate the negative consequences of heat stress[J]. *Advances in Nutrition: An International Review Journal*, 2013,4(3):267-276
- [39] Song X Z, Xu J, Wang T, Liu F. Traditional Chinese medicine decoction enhances growth performance and intestinal glucose absorption in heat stressed pigs by up-regulating the expressions of *SGLT1* and *GLUT2* mRNA [J]. *Livestock Science*, 2010,128(1-3):0-8
- [40] 刘博,徐洋,瞿明仁,张新雨,尚含乐,杨建军,宋小珍. 中药复方添加剂对夏季高温条件下肉牛的抗热应激作用研究[J]. 江西农业大学学报,2017,39(03):436-442
- Liu B, Xu Y, Yan M R, Zhang X Y, Shang H L, Yang J J, Song X Z. Alleviated heat stress response of Chinese medicine prescription in beef cattle under hot environment[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2017, 39 (03): 436-442 (in Chinese)
- [41] 汪水平,王文娟,左福元,周沛,赵建军,张家骅. 中药复方对夏季肉牛的影响: II. 血气指标、血清代谢产物浓度及免疫和抗氧化功能参数[J]. 畜牧兽医学报,2011,42(5):734-741
- Wang S P, Wang W J, Zuo F Y, Zhou P, Zhao J J, Zhang J H. Effect of Chinese medicine prescription on beef cattle in summer; II. The blood gas analysis, the concentration of metabolites and the parameters of the immune and antioxidant capability in the serum[J]. *Journal of Animal Husbandry and Veterinary*, 2011,42(5):734-741 (in Chinese)
- [42] 张新雨,刘博,罗军荣,徐洋,尚含乐,杨食堂,宋小珍. 中药复方制剂对热应激肉牛生产性能及生理生化指标的影响[J]. 畜牧兽医学报,2018,49(3):620-628
- Zhang X Y, Liu B, Luo J R, Xu Y, Shang H L, Yang S T, Song X Z. Effect of Chinese medicine prescriptions on production performance, physiological biochemical indexes of beef cattle under heat stress [J]. *Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2018,49(3):620-628 (in Chinese)
- [43] 常洪,耿社民,武彬,陈幼春. 中国黄牛考源:中国黄牛源流考之一(上)[J]. 黄牛杂志,1990(4):1-3
- Chang H, Geng S M, Wu B, Chen Y C. The source of Chinese yellow cattle: One of the sources of Chinese yellow cattle[J]. *Journal of Yellow Cattle*, 1990(4):1-3 (in Chinese)
- [44] 刘延鑫. 奶牛耐热性状候选基因的遗传特性分析[D]. 南京:南京农业大学,2010
- Liu Y X. Analysis on hereditary characteristics of heat tolerance traits by candidate genes in dairy cattle[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2010 (in Chinese)
- [45] 杜方磊,李秋玲,王长法,王洪梅,张廷荣,黄金明,李建斌,仲跻峰,刘斌. 荷斯坦奶牛热休克蛋白 70 基因 3'-侧翼区遗传变异与耐热性的关系[J]. 农业生物技术报,2010,18(2):296-301
- Du F L, Li Q L, Wang C F, Wang H M, Zhang T R, Huang J M, Li J B, Zhong J F, Liu B. Genetic variation at 3'-UTR of the heat shock protein 70 gene and its relationship with thermal tolerance in Holstein cows[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2010,18(2):296-301 (in Chinese)
- [46] Yu J, Liu F H, Yin P, Zhu X Y, Cheng G L, Wang N, Lu A, Luan W L, Zhang N W, Li J F, Guo K J, Yin Y L, Wang H C, Xu J Q. Integrating miRNA and mRNA expression profiles in response to heat stress-induced injury in rat small intestine[J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2011,11(2):203-213
- [47] Zheng Y, Chen K L, Zheng X M, Li H X, Wang G L. Identification and bioinformatics analysis of microRNAs associated with stress and immune response in serum of heat-stressed and normal Holstein cows[J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2014,19(6):973-981
- [48] 蔡明成. 热应激对肉牛生理生化指标及外周血 microRNA 表达水平的影响[D]. 重庆:西南大学,2014
- Cai M C. Effects of heat stress on physiological and biochemical indexes and expression levels of microRNA in peripheral blood [D]. Chongqing: Southwest University, 2014 (in Chinese)
- [49] Kumar A, Ashraf S, Goud S, Grewal A, Yadav B, Upadhyay R. Expression profiling of major heat shock protein genes during different seasons in cattle (*Bos indicus*) and buffalo (*Bubalus bubalis*) under tropical climatic condition [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2015, (51):55-64