

基于断奶羔羊生理和生长性能的热应激发生阈值预测

赵寿培^{1,2}, 冯 曼³, 刘乾亥⁴, 苏东遥¹, 董 晴¹, 王 超¹,
孙新胜^{5*}, 高玉红^{1*}, 陈志宇⁶, 魏玉东⁷

(1. 河北农业大学动物科技学院, 保定 071000; 2. 四川农业大学动物营养研究所, 成都 611100; 3. 河北省承德市农林科学院, 承德 067000; 4. 河北省保定市唐县农业农牧局, 保定 072350; 5. 河北农业大学信息技术学院, 保定 071001; 6. 河北省张家口市农业信息中心, 张家口 075031; 7. 河北省畜牧总站, 石家庄 061399)

摘 要: 热应激对绵羊的生长和健康产生了较大影响, 但目前对羊热应激的发生程度尚无评价标准。为有效预防绵羊热应激, 该研究基于不同温湿度条件下断奶羔羊生理指标和生长性能的变化, 对热应激发生的温湿度阈值进行了预测。试验采用环控舱将 12 只健康状况、体质量相近的断奶羔羊 (小尾寒羊×杜泊羊, 2 月龄, (18±2.1) kg) 分为两组, 分别饲养于相对湿度 60% 和 80% 的舱内, 舱内温度采用梯度爬坡法逐渐升高 (21.5~35.5 °C), 试验期 24 d。通过非线性回归模型, 根据不同温湿度条件下 (60% 和 80%, 21.5~35.5 °C) 断奶羔羊生理指标 (体表温度 (body surface temperature, BT)、呼吸频率 (respiratory rate, RR) 和直肠温度 (rectal temperature, RT)) 及生长性能指标 (采食量 (dry matter intake, DMI) 和饮水量 (average daily water intake, ADW)) 的变化, 预测各项指标发生拐点 (inflection point, I) 的温湿度和温湿指数 (temperature-humidity index, T_{HI})。结果表明, 1) 在该试验条件下羔羊 RR 变化范围为 28~211 次/min, BT 和 RT 则分别为 29.90~35.65 °C 和 38.38~41.42 °C。2) 3 项生理指标 (BT、RR 和 RT) 在 2 种湿度条件下 I 出现的时间不同。60% 时, 各项生理指标出现 I 的环境温度分别为: $I_{BT}=22.99^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.98$)、 $I_{RR}=23.25^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$) 和 $I_{RT}=26.69^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$)。80% 时, 各项生理指标出现 I 的环境温度分别为: $I_{BT}=22.33^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.97$)、 $I_{RR}=23.02^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$) 和 $I_{RT}=25.41^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.98$)。3) 随着环境温度的升高, 2 项生长性能指标中 ADW 先出现 I , $I_{ADW}=23.02^{\circ}\text{C}$ (60%) 和 22.43 °C (80%), 当环境温度超过 I 温度时, ADW 开始线性增加; 而 DMI 出现 I 的环境温度为: $I_{DMI}=24.95^{\circ}\text{C}$ (60%) 和 23.21 °C (80%), 当超过 I 温度时, DMI 开始线性下降。4) 随着 T_{HI} 升高, 各项指标出现 I 的早晚顺序依次为: I_{BT} (69.84) < I_{ADW} (70.12) < I_{RR} (71.46) < I_{DMI} (72.11) < I_{RT} (74.83)。综上所述, $T_{HI}\leq 71.46$ 认定为无热应激区, $71.46<T_{HI}\leq 72.11$ 为临界热应激区, $72.11<T_{HI}\leq 74.83$ 为热应激区, $74.83<T_{HI}$ 为警惕区。该结果可为断奶羔羊热应激的评判提供依据。

关键词: 温度; 动物; 热应激; 温湿指数; 阈值; 生理指标; 生长性能; 断奶羔羊

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310224

中图分类号: Q955

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-23-0212-08

赵寿培, 冯曼, 刘乾亥, 等. 基于断奶羔羊生理和生长性能的热应激发生阈值预测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 212-219. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310224 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Shoupei, FENG Man, LIU Qianhai, et al. The threshold of occurrence of heat stress in weaned lambs based on physiological and growth performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 212-219. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310224 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来夏季高温持续时间不断延长, 而且高温强度持续增加。据推测, 未来十年内, 全球温度将升高超过 1.5°C^[1], 温度升高引起的负面影响将日益加重^[2-3]。绵羊在全球经济中发挥着重要的作用, 尤其是处于热带及亚热带地区的发展中国家, 其肉、奶、皮和毛等是贫困地

区和农村人口重要的生计来源^[4]。但目前绵羊的热应激已经对羊的生长发育^[5-6]、繁殖^[7]和健康^[8]产生了一定影响, 给羊产业造成严重的经济损失。据研究, 当羊处于热应激状态时, 会通过提高体表温度和呼吸频率从呼吸道和皮肤蒸发水分, 当机体无法保持热平衡时, 直肠温度就会升高^[9]。同时, 羊在热应激下采食量降低, 且随着机体水分的代谢, 饮水量也会相应增加^[6, 10]。中国是养羊大国, 虽然国内已经开始重视羊热应激的研究, 但目前尚无系统的羊热应激评价标准, 其评价往往借鉴牛热应激的评价体系。目前较为成熟的家畜热应激评价体系中, 大多数结合生理指标及部分生长性能, 通过最简单、直接和有效的测量方法对热应激进行评价。但由于不同动物生理特性不同, 热应激评价方法也有所差异。鸡和猪热应激程度的评价多依赖于环境温度^[11-12], 而反刍动物多采用温湿指数 (temperature-humidity index, T_{HI})。 T_{HI} 是 THOM 于 1959 年提出的将环境温度与相对湿

收稿日期: 2023-10-24 修订日期: 2023-11-27

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (C2021204128); 河北省高等学校科学技术重点研究项目 (ZD2021323); 河北省重点研发计划项目 (22326603D)

作者简介: 赵寿培, 博士生, 研究方向为动物营养与环境工程。

Email: 1406932357@qq.com

*通信作者: 孙新胜, 副教授, 研究方向为畜牧业信息化建设。

Email: 109630172@qq.com; 高玉红, 博士, 教授, 研究方向为畜禽环境控制和环境工程。Email: gyhsxs0209@126.com

度相结合的一个综合指数^[13]，多用于牛热应激的评价^[14]。牛和羊虽同为反刍动物，但其生理结构存在一定差异，牛主要依赖汗腺进行散热^[15-16]，而羊毛较厚，汗腺散热能力较差，受湿度影响相对较小。可见，羊热应激的评价不能简单套用牛热应激评价体系。本研究通过测定环控舱中不同温湿条件下羊的生理参数和生长性能指标变化，采用非线性回归模型分析热环境下各项指标发生变化的拐点，综合生理和生长性能指标对羊的热应激发生程度进行划分，为断奶羔羊热应激评价和预防提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采用环控舱精准控温控湿的方法，将 12 只健康、质量相近的断奶公羔羊（小尾寒羊×杜泊羊，2 月龄，（18±2.1）kg）随机分为两组，每组 6 只，分别饲养于两间环控舱中。每个环控舱空间为 5.0 m×8.0 m×2.0 m，单栏（1.0 m×1.5 m）饲养。2 个环控舱相对湿度分别设为 60% 和 80%，温度采用梯度爬坡法，从 21.5℃ 开始升温，每 2℃ 为一个梯度升至 35.5℃，每梯度持续 3 d，测定每个温度梯度的羊生理参数和生长性能指标，并计算环境的 T_{HI} ^[17]。整个试验周期为 24 d。试验设计如表 1 所示。

表 1 试验设计及温湿指数分布
Table 1 Experimental design and Temperature-humidity index distribution

相对湿度 Relative humidity/%	环境温度 Ambient temperature/℃	温湿指数 Temperature-humidity index
60	21.5	67.86
	23.5	70.66
	25.5	73.46
	27.5	76.26
	29.5	79.06
	31.5	81.86
	33.5	84.66
	35.5	87.46
80	21.5	69.28
	23.5	72.48
	25.5	75.68
	27.5	78.88
	29.5	82.08
	31.5	85.28
	33.5	88.48
	35.5	91.68

1.2 饲养管理

环控舱模拟自然通风，每日 7:00 打开日光灯模拟光照，21:00 关闭日光灯。试验前 2 d 进行消毒和通风。消毒后，将羔羊转入环控舱，饲养一周使羊只适应环境。试验期间饲养管理一致，提供颗粒全混合日粮自由采食（表 2），其中复合维生素中每千克添加剂中提供：VA 117 000 IU、VD3 175 500 IU、VE 750 IU、VB1 350 mg。复合矿物质微量元素中每千克添加剂中提供：I 10 mg，Fe 1 200 mg，Cu 600 mg，Mn 7 500 mg，Zn 2 000 mg，Se 25 mg，Co 30 mg。试验期间自由饮水。

1.3 试验指标及方法

1.3.1 生理指标

1) 体表温度

于各温度梯度最后一日中午使用 Testo-890 红外热成像仪（量程：-20~350℃；测量精度：±2℃，波长范围：

8~14 μm）多点记录每只羊体表温度，即，左躯干上部和下部各测 4 点；四肢上部前肢测肘部外侧 2 点；后肢测股部和胫部外侧各 2 点；四肢下部测管部外侧 4 点；垂皮测下部左右 2 点；耳测右耳上部 1 点。根据式（1）计算体表温度^[18]：

$$T = 0.25T_{\text{躯干上部}} + 0.25T_{\text{躯干下部}} + 0.32T_{\text{四肢上部}} + 0.12T_{\text{垂耳}} + 0.04T_{\text{耳}} \tag{1}$$

式中 T 为平均皮温，℃； $T_{\text{部位}}$ 为该部位的皮温，℃；系数为所占全身皮肤面积的百分数。

表 2 全混合日粮组成及营养水平（干物质基础）
Table 2 Composition and nutrient levels of total mixed ration (dry matter basis)

项目 Items	含量 Content
玉米 Maize/%	32.2
麸皮 Bran/%	8.0
豆粕 Soybean meal/%	20.0
花生秧 Peanut vine/%	18.5
羊草 Chinese wildrye/%	19.0
小苏打 Baking soda, NaHCO ₃ /%	0.7
盐 Salt, NaCl/%	0.8
复合维生素 Multivitamin/%	0.2
复合矿物质微量元素 Mineral trace elements/%	0.6
合计 Total/%	100.0
消化能 Metabolic energy, ME (MJ·kg ⁻¹) ^①	11.79
粗蛋白 Crude protein/%	14.35
粗脂肪 Crude fat/%	1.97
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/%	26.45
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/%	20.14
钙 Calcium/%	0.55
磷 Phosphorus/%	0.32

注：① 代谢能为计算值，其余为实测值。
Note: ME was a calculated value, while the others were measured values.

2) 呼吸频率

于各温度梯度最后一日中午测量每只羊的呼吸频率。采用秒表计数平稳呼吸下胸腹部连续张弛的次数，连续测 3 min，计算每分钟的平均呼吸频率。

3) 直肠温度

于各温度梯度最后一日中午测量每只羊的直肠温度。直肠温度利用兽用体温计进行测定，骑跨握角保定，使用前将水银柱甩至 35℃ 以下，消毒棉擦拭并涂润滑剂后，缓慢插入肛门内，保持 3~5 min 后取出，擦净体温计上的粪便并查看读数。

1.3.2 生长性能指标

1) 采食量

每日对每只羊的饲料添加量分别称质量，次日 6:00 对剩料量也分别称质量，计算平均日采食量（dry matter intake, DMI）= 添料量 - 剩料量。

2) 饮水量

每日记录每只羊饮水的添加量，次日 6:00 记录剩余水量，计算平均日饮水量（averagedailywaterintake, ADW）= 总添加水量 - 剩余水量。

1.4 数据分析

采用 GraphPad Prism 7.0 对羊的体表温度、呼吸频率和直肠温度与温湿度的关系进行绘图。参考 HUYNH 等^[11]的方法，采用 SPSS 19.0 统计软件中非线性回归分析，对连续升高的温热环境下羊的生理参数（体表温度、呼吸频率、直肠温度）和生长性能（采食量、饮水量）

的数据进行分段回归分析。分段回归模型为:

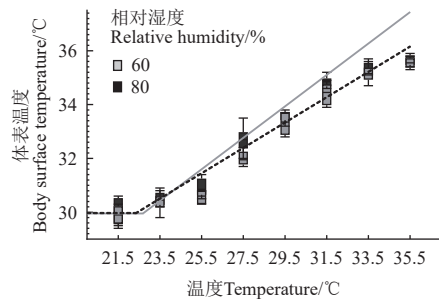
$$Y = \begin{cases} C & T < I \\ C + Z(T - I) & T \geq I \end{cases} \quad (2)$$

式中 Y 是指生理参数和生长性能指标; C 是指羊只体温调节指标未发生变化时的常数; Z 是指羊只体温调节指标发生变化时的斜率; T 为温热参数, 即环境温度 (T_a), $^{\circ}\text{C}$ 或 T_{HI} ; I 为各项生理或生产性能指标调节开始发生变化时所对应的温热参数 (T_a , $^{\circ}\text{C}$ 或 T_{HI}) 拐点。

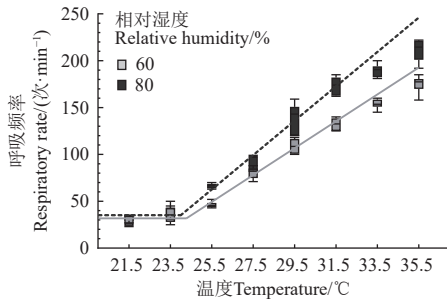
2 结果与分析

2.1 断奶羔羊生理指标与环境温湿度的非线性回归分析

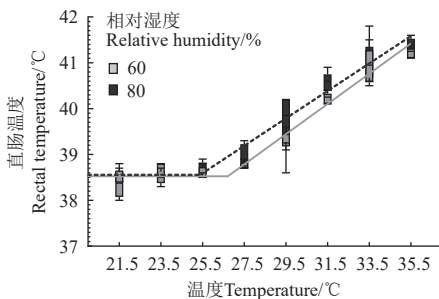
由图 1 可知, 相对湿度为 60% 和 80% 条件下, 环境温度处于 21.5~35.5 $^{\circ}\text{C}$ 范围时, 断奶羔羊的体表温度、呼吸频率和直肠温度的变化范围分别为 29.90~35.65 $^{\circ}\text{C}$ 、28~211 次/min 和 38.38~41.42 $^{\circ}\text{C}$ 。



a. 不同温湿度下断奶羔羊体表温度的变化
a. Changes in body surface temperature of weaned lambs under different temperature and humidity



b. 不同温湿度下断奶羔羊呼吸频率的变化
b. Changes in respiratory rate of weaned lambs under different temperature and humidity



c. 不同温湿度下断奶羔羊直肠温度的变化
c. Changes in rectal temperature of weaned lambs under different temperature and humidity

图 1 不同温湿度下断奶羔羊生理指标的变化

Fig.1 Changes in physiological indexes of weaned lambs under different temperature and humidity

通过非线性回归分析得出环境温度处于 21.5~35.5 $^{\circ}\text{C}$ 时的 3 项生理指标随温湿度变化的函数, 即: 湿度为 60% 时,

$$y_1 = \begin{cases} 29.90, T < 22.99 \\ 29.90 + 0.48 \times (T - 22.99), T \geq 22.99 \end{cases} (R^2 = 0.98), \quad (3)$$

$$y_2 = \begin{cases} 28.00, T < 23.25 \\ 28.00 + 12.25 \times (T - 23.25), T \geq 23.25 \end{cases} (R^2 = 0.99), \quad (4)$$

$$y_3 = \begin{cases} 38.52, T < 26.69 \\ 38.52 + 0.33 \times (T - 26.69), T \geq 26.69 \end{cases} (R^2 = 0.99); \quad (5)$$

湿度为 80% 时,

$$y_1 = \begin{cases} 29.97, T < 22.33 \\ 29.97 + 0.47 \times (T - 22.33), T \geq 22.33 \end{cases} (R^2 = 0.97), \quad (6)$$

$$y_2 = \begin{cases} 32.00, T < 23.02 \\ 32.00 + 15.11 \times (T - 23.02), T \geq 23.02 \end{cases} (R^2 = 0.99), \quad (7)$$

$$y_3 = \begin{cases} 38.55, T < 25.41 \\ 38.55 + 0.30 \times (T - 25.41), T \geq 25.41 \end{cases} (R^2 = 0.98). \quad (8)$$

式中 y_1 为体表温度, $^{\circ}\text{C}$; y_2 为呼吸频率, 次/min; y_3 为直肠温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

从上述公式可以看出, 环境温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$, 体表温度、呼吸频率和直肠温度分别升高 0.48 $^{\circ}\text{C}$ 、12.25 次/min 和 0.33 $^{\circ}\text{C}$ (60%) 以及 0.47 $^{\circ}\text{C}$ 、15.11 次/min 和 0.30 $^{\circ}\text{C}$ (80%)。

由图 1 也可看出, 不同生理指标发生拐点的环境温度不同。当环境温度达 22.99 $^{\circ}\text{C}$ (60%) 和 22.33 $^{\circ}\text{C}$ (80%) 时, 体表温度呈线性升高; 随着环境温度上升, 当环境温度达 23.25 $^{\circ}\text{C}$ (60%) 和 23.02 $^{\circ}\text{C}$ (80%) 时, 呼吸频率呈现线性升高; 直肠温度出现线性升高的环境温度较高, 当温度达 26.69 $^{\circ}\text{C}$ (60%) 和 25.41 $^{\circ}\text{C}$ (80%) 时, 才表现出线性升高趋势。

2.2 断奶羔羊生长性能与环境温湿度的非线性回归分析

由图 2 可知, 60% 和 80% 湿度条件下, 通过非线性回归分析可得出环境温度处于 21.5~35.5 $^{\circ}\text{C}$ 时断奶羔羊生长性能随温湿度变化的规律, 即: 湿度为 60% 时,

$$y_4 = \begin{cases} 1014.57, T < 24.95 \\ 1017.57 - 28.40 \times (T - 24.95), T \geq 24.95 \end{cases} (R^2 = 0.94), \quad (9)$$

$$y_5 = \begin{cases} 3253.06, T < 23.02 \\ 3253.06 + 301.66 \times (T - 23.02), T \geq 23.02 \end{cases} (R^2 = 0.92), \quad (10)$$

湿度为 80% 时,

$$y_4 = \begin{cases} 1012.79, T < 23.12 \\ 1012.79 - 27.49 \times (T - 23.12), T \geq 23.12 \end{cases} (R^2 = 0.89), \quad (11)$$

$$y_5 = \begin{cases} 3278.69, T < 23.43 \\ 3278.69 + 325.85 \times (T - 22.43), T \geq 22.43 \end{cases} (R^2 = 0.92). \quad (12)$$

式中 y_4 为采食量, g; y_5 为饮水量, mL。

环境温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$, 采食量可降低 28.40 g (60%) 和 27.49 g (80%); 饮水量则分别提高 301.66 mL (60%) 和 325.85 mL (80%)。

从图 2 也可看出, 环境温度处于 21.5~35.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,

当温度升至 23.02 °C (60%) 和 22.43 °C (80%) 时, 断奶羔羊的饮水量表现出线性增加趋势。随着环境温度持续上升, 当环境温度达 24.95 °C (60%) 和 23.21 °C (80%) 时, 断奶羔羊的采食量表现出线性下降, 而该环境温度以下的温度范围羔羊的采食量和饮水量相对稳定。

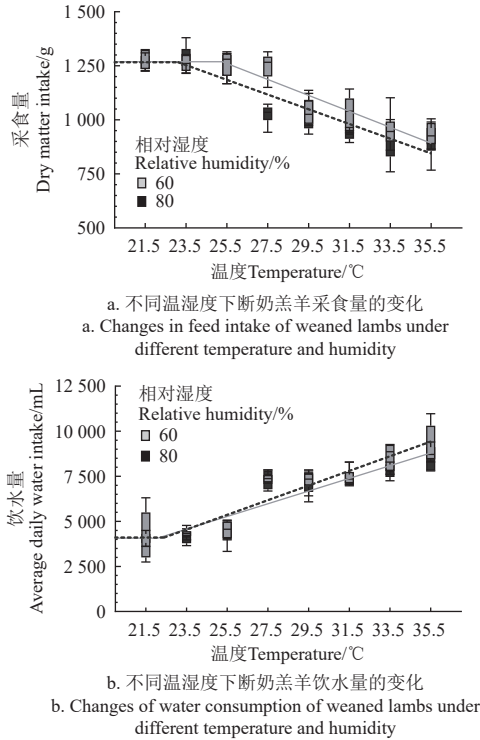


图 2 不同温湿度下断奶羔羊生长性能的变化

Fig.2 Changes in growth performance of weaned lambs under different temperatures and humidity

2.3 断奶羔羊生理指标与温湿指数的非线性回归分析

环境温度处于 21.5~35.5 °C 时, 2 种湿度条件下, T_{HI} 的变化范围为 67.86~91.68。通过非线性回归分析得出断奶羔羊生理指标随 T_{HI} 升高而变化的规律 (图 3), 其回归方程如下:

$$y_1 = \begin{cases} 29.94, T < 69.84 \\ 29.94 + 0.30 \times (T - 69.84), T \geq 69.84 \end{cases} (R^2 = 0.95), \quad (13)$$

$$y_2 = \begin{cases} 31.78, T < 71.46 \\ 31.78 + 9.30 \times (T - 71.46), T \geq 71.46 \end{cases} (R^2 = 0.99), \quad (14)$$

$$y_3 = \begin{cases} 38.53, T < 74.83 \\ 38.53 + 0.19 \times (T - 74.83), T \geq 74.83 \end{cases} (R^2 = 0.96). \quad (15)$$

T_{HI} 每升高 1, 体表温度、呼吸频率和直肠温度分别提高 0.30 °C、9.30 次/min 和 0.19 °C。

T_{HI} 处于 67.86~91.68 (21.5~35.5 °C, 60%~80%) 范围内, 当 T_{HI} 处于 69.84 以下, 体表温度相对稳定, T_{HI} 达 69.84 时, 体表温度呈线性增加; 随着 T_{HI} 增加, T_{HI} 达 71.46 时, 呼吸频率开始呈线性增加; 直肠温度开始呈线性增加的 T_{HI} 阈值为 74.83。

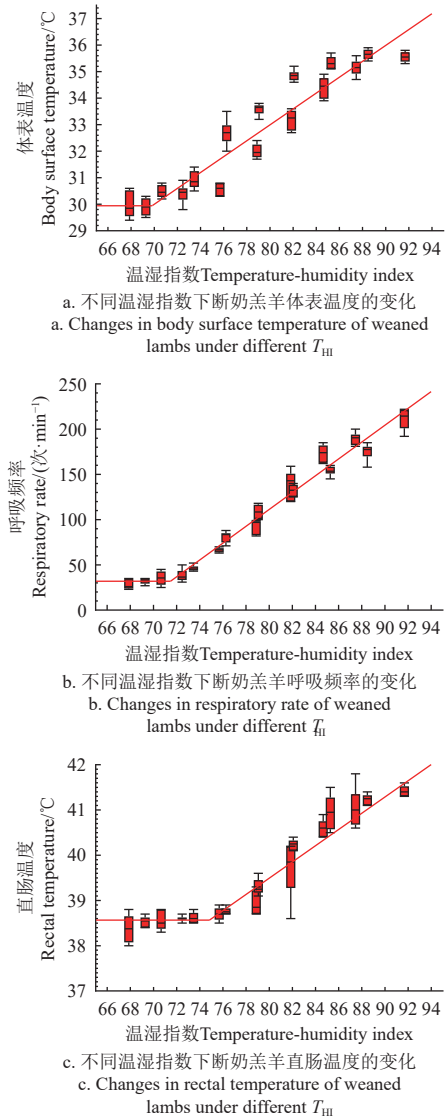


图 3 不同温湿指数下断奶羔羊生理参数的变化

Fig.3 Changes in physiological parameters of weaned lambs under different Temperature-humidity index

2.4 断奶羔羊生长性能与温湿指数的非线性回归分析

由图 4 可知, T_{HI} 处于 67.86~91.68 (21.5~35.5 °C, 60%~80%) 范围内, 生长性能指标 (采食量与饮水量) 与 T_{HI} 间的非线性回归方程如下:

$$y_4 = \begin{cases} 1013.98, T < 72.11 \\ 1013.98 - 18.04 \times (T - 72.11), T \geq 72.11 \end{cases} (R^2 = 0.91), \quad (16)$$

$$y_5 = \begin{cases} 3265.87, T < 70.12 \\ 3265.87 + 203.80 \times (T - 70.12), T \geq 70.12 \end{cases} (R^2 = 0.91). \quad (17)$$

T_{HI} 每提高 1, 采食量降低 18.04 g, 而饮水量提高 203.80 mL。

T_{HI} 的变化范围为 67.86~91.68 (21.5~35.5 °C, 60%~80%), T_{HI} 为 70.12 时, 饮水量开始表现出线性增加, 当 T_{HI} 达 72.11 时, 采食量开始呈线性降低, 而 T_{HI} 处于该阈值以下时, 两项生长性能指标没有发生显著性变化。

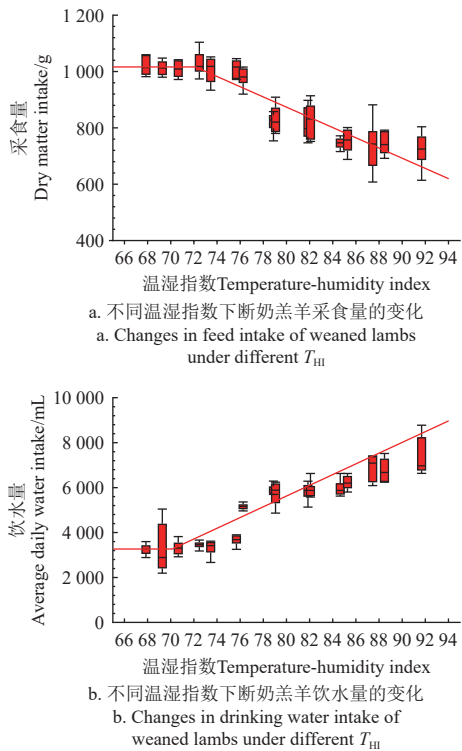


图4 不同温湿指数下断奶羔羊生长性能的变化
Fig.4 Changes in growth performance of weaned lambs under different temperature-humidity index conditions

2.5 断奶羔羊热应激发生程度的阈值分析

通过上述对断奶羔羊环境温湿参数与生理指标、生长性能指标的非线性回归分析,环境温度21.5~35.5℃和60%~80%湿度条件下,各项指标发生线性变化的环境温度(T_a)和 T_{HI} 阈值如表3所示。

根据生理指标(体表温度、呼吸频率和直肠温度)和生长性能指标(采食量和饮水量)的环境温度阈值,将断奶羔羊热应激发生程度的温湿度进行区划,在60%

相对湿度下,21.5℃ $\leq T_a \leq 22.99$ ℃为舒适区,22.99℃ $< T_a \leq 23.25$ ℃为无热应激区,23.25℃ $< T_a \leq 24.95$ ℃为预警区,24.95℃ $< T_a \leq 26.69$ ℃为热应激区,26.69℃ $\leq T_a$ 为警惕区;80%相对湿度下,21.5℃ $\leq T_a \leq 22.33$ ℃为舒适区,22.33℃ $< T_a \leq 23.02$ ℃为无热应激区,23.02℃ $< T_a \leq 23.21$ ℃为预警区,23.21℃ $< T_a \leq 25.41$ ℃为热应激区,25.41℃ $\leq T_a$ 为警惕区。

根据 T_{HI} 的阈值结果,将 $T_{HI} \leq 71.46$ 定义为无热应激区,71.46 $< T_{HI} \leq 72.11$ 为临界热应激区,72.11 $< T_{HI} \leq 74.83$ 为热应激区,74.83 $< T_{HI}$ 为警惕区。

3 讨论

3.1 环境温湿度对断奶羔羊生理指标和生长性能的影响

关于高温对绵羊生理参数影响目前研究较多。大量研究证明,体表温度、呼吸频率和直肠温度是重要的衡量动物热应激的参数^[19-21]。本试验通过非线性回归分析了各生理参数的拐点温度,并对热应激发生的阈值和程度进行划分。因为非线性回归模型可以更好地对动物热应激生理指标变化规律进行分析^[11, 15, 22],从而预测其阈值。据研究,绵羊热中性区为5~25℃^[23],也有研究认为,热中性区为12~32℃^[24],这些差异可能与动物的品种、年龄、健康和周围环境密切相关。本试验结合前人研究选择了21.5~35.5℃来对其热应激发生的温度进行预测。当超过拐点温度后,呼吸频率线性升高,这也从某种程度上体现了绵羊的体表散热机制,但体表温度始终低于直肠温度^[25-26]。研究表明,羊在夏季体表温度更高,这是因为随着温度升高皮肤毛细血管不断扩张,从而促进血液向皮肤外围流动,加速热传递^[20]。MINKA等^[27]研究也表明,羊的体表温度会受到环境温度变化的影响,且其于干冷和干热季节中波动范围为3~7℃,这与本结果相似,体表温度在21.5~35.5℃范围内最大温差为5.68℃。

表3 断奶羔羊生理指标和生长性能变化的环境温度和温湿指数拐点

Table 3 Threshold value of ambient temperature and Temperature-humidity index of physiological indexes and growth performance changes in weaned lambs						
项目 Items	相对湿度 Relative humidity/%	生理指标拐点 Threshold value of physiological index			生长性能拐点 Threshold value of growth performance	
		体表温度 Body surface temperature	呼吸频率 Respiratory rate	直肠温度 Rectal temperature	采食量 Dry matter intake	饮水量 Average daily water intake
环境温度 Ambient temperature/℃	60	22.99	23.25	26.69	24.95	23.02
	80	22.33	23.02	25.41	23.21	22.43
温湿指数 Temperature-humidity index	60~80	69.84	71.46	74.83	72.11	70.12

呼吸频率是目前最常用的热应激评价指标之一,因其对热敏感,且其检测不影响动物的正常状态。已有研究表明,夏季高温环境下绵羊65%的体热通过呼吸蒸发散热^[28]。并且随着温度的升高,呼吸频率波动范围较大,常为31.2~271次/min。但随着温度不断升高呼吸蒸发散热也会受到抑制,呼吸频率会稳定在155~200次/min,并且比正常的喘气更深^[9]。但不同生理阶段的羊对热的敏感性不同,MACIAS-CRUZ等^[29]研究发现,断奶羔羊相较成年母羊热敏感性更强,抗热应激能力更差。本试验中,当环境温度处在21.5~35.5℃时,断奶羔羊的呼吸频率为28~211次/min,当温度持续升高时,羊体通

过增强呼吸来加强散热。这与MEHABA等^[30]研究一致,该研究认为,处于28~35℃的羊与处于15~20℃的相比,呼吸频率增加了214%。类似研究也表明^[31],随着热应激程度的加剧,呼吸频率也随之增加。

直肠温度与家畜健康和生产力水平密切联系^[32-33]。当绵羊暴露于高温环境时,往往通过增加皮温传导散热和提高呼吸频率蒸发散热以维持体内热平衡。当机体无法维持其热量平衡时,直肠温度会升高^[9],尤其断奶羔羊的直肠温度容易受外界环境的影响。MACIAS-CRUZ等^[29]研究表明,3月龄的断奶羔羊夏季上午和下午之间的温差为1.0℃,而年长母羊的温差仅为0.5℃。本试验

中,环境温度从 21.5 °C 升至 35.5 °C 时,直肠温度处于 38.38~41.42 °C。有研究认为,当环境温度从 28 °C 增至 35 °C 时,母羊的直肠温度从 39.38 °C 升至 39.85 °C,而在 15~20 °C 范围内,直肠温度无显著变化^[30],这与本试验结果相吻合,本试验中直肠温度出现线性升高的环境温度拐点较体表温度和呼吸频率升高的环境温度拐点要高。THWAITES^[34]研究表明,直肠温度超过 42 °C 时,对机体造成不可逆的影响,可见,高温对家畜健康的影响较大。

3.2 环境温度和温湿指数对断奶羔羊热应激发生阈值的评价

本试验根据羊的生理特点采用温度和 T_{HI} 对断奶羔羊进行评价。由于生理指标和生长性能指标对热应激敏感程度不同,其发生变化的温湿度阈值也不一致。本试验中体表温度为第一个发生拐点变化的生理参数。而随着环境温度升高,动物出现皮肤血管扩张、体表温度升高和呼吸频率加快等物理现象来调节体温恒定^[35-37]。在实际生产中呼吸频率可作为动物热应激判断的重要参考,因此,本试验将低于呼吸频率拐点而高于体表温度拐点的环境区域界定为无热应激区。而将高于呼吸频率拐点的环境区域界定为预警区或临界热应激区。另外,通过生产性能指标的变化评价热应激程度也是热应激评价的主要依据。目前奶牛热应激的划分标准主要根据产奶量^[38],对于羊而言,因为采食量和饮水量容易受热应激影响,这对羊的生长发育至关重要,其变化可作为热应激评价的重要依据。本试验中,随着环境温度的上升,断奶羔羊的饮水量最先表现出线性增加趋势,而后,断奶羔羊的采食量开始表现出线性下降趋势,出现拐点,而低于拐点的温度范围羔羊采食量和饮水量相对稳定。因此,本试验以采食量作为热应激发生阈值划分界限,将采食量出现拐点的环境区域定义为热应激区,将高于呼吸频率拐点而低于采食量拐点的环境区域定义为预警区或临界热应激区。关于奶牛热中性区上限温度的研究也有报道,认为 25.0~26.0 或 24.0~27.0 °C^[39]可作为热中性区上限温度。高于此温度会影响奶牛健康。大量研究也认为,对热应激反应最迟缓和的是直肠温度,因此本试验中将高于直肠温度拐点的环境区域定义为警惕区。

4 结 论

综合断奶羔羊生理参数和生长性能在不同温湿度(60%~80%, 21.5~35.5 °C)下的变化规律,得出:

1) 随着环境温度的上升,各项生理指标随之增加,但其拐点的温度不同。体表温度、呼吸频率和直肠温度拐点的温度分别为:相对湿度 60% 下分别为 22.99、23.25 和 26.69 °C;相对湿度 80% 下分别为 22.33、23.02 和 25.41 °C。

2) 随着环境温度的上升,饮水量呈现增加趋势,其拐点温度为:22.07 (60%) 和 22.47 (80%)。而采食量表现出下降趋势,其拐点的温度为:24.95 °C (60%) 和 23.21 °C (80%)。

3) 综合分析温湿度、生理和生长指标,随温湿度指数增加而出现的拐点早晚顺序依次为:体表温度(69.84)、饮水量(70.12)、呼吸频率(71.46)、采食量(72.11)

和直肠温度(74.83)。

4) 根据环境温度(T_a)的阈值结果:60%湿度下,21.5 °C $\leq T_a \leq 22.99$ °C 为舒适区,22.99 °C $< T_a \leq 23.25$ °C 为无热应激区,23.25 °C $< T_a \leq 24.95$ °C 为预警区,24.95 °C $< T_a \leq 26.69$ °C 为热应激区,26.69 °C $\leq T_a$ 为警惕区;80%湿度下,21.5 °C $\leq T_a \leq 22.33$ °C 为舒适区,22.33 °C $< T_a \leq 23.02$ °C 为无热应激区,23.02 °C $< T_a \leq 23.21$ °C 为预警区,23.21 °C $< T_a \leq 25.41$ °C 为热应激区,25.41 °C $\leq T_a$ 为警惕区。

5) 根据 T_{HI} 的阈值结果, $T_{HI} \leq 71.46$ 认定为无热应激区,71.46 $< T_{HI} \leq 72.11$ 为临界热应激区,72.11 $< T_{HI} \leq 74.83$ 为热应激区,74.83 $< T_{HI}$ 为警惕区。

[参 考 文 献]

- [1] MATTHEWS H D, WYNES S. Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5 °C[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1404-1409.
- [2] LEWIS BAIDA B E, SWINBOURNE A M, BARWICK J, et al. Technologies for the automated collection of heat stress data in sheep[J]. *Animal Biotelemetry*, 2021, 9(1): 1-15.
- [3] 赵俐辰, 赵心念, 冯曼, 等. 反光膜对舍内温热环境及青年奶牛血液生化指标的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17): 214-223.
ZHAO Lichen, ZHAO Xinnian, FENG Man, et al. Effects of reflective film on the thermal environment in shed and blood biochemical parameter of growing dairy cows[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(17): 214-223. (in Chinese with English abstract)
- [4] KARTHIK D, SURESH J, REDDY Y R, et al. Farming systems in sheep rearing: Impact on growth and reproductive performance, nutrient digestibility, disease incidence and heat stress indices[J]. *Plos One*, 2021, 16(1): e244922.
- [5] HUNG A T, LEURY B J, SABIN M A, et al. Dietary nano chromium picolinate can ameliorate some of the impacts of heat stress in cross-bred sheep[J]. *Animal Nutrition*, 2021, 7(1): 198-205.
- [6] SLIMEN I B, CHNITER M, NAJAR T, et al. Meta-analysis of some physiologic, metabolic and oxidative responses of sheep exposed to environmental heat stress[J]. *Livestock Science*, 2019, 229: 179-187.
- [7] VAN WETTERE W H E J, KIND K L, GATFORD K L, et al. Review of the impact of heat stress on reproductive performance of sheep[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12: 1-18.
- [8] 赵寿培, 刘泽, 程素彩, 等. 发酵中药对夏季育肥羔羊生长性能和免疫性能的影响[J]. *中国兽医学报*, 2022, 42(7): 1489-1498.
ZHAO Shoupei, LIU Ze, CHENG Sucai, et al. Effects of fermented Chinese herbal on growth performance and immune performance of fattening lambs in summer[J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2022, 42(7): 1489-1498. (in Chinese with English abstract)
- [9] MARAI I F W, EL-DARAWANY A A, FADIEL A, et al. Physiological traits as affected by heat stress in sheep: a

- review[J]. *Small Ruminant Research*, 2007, 71(1-3): 1-12.
- [10] BELHADJ SLIMEN I, NAJAR T, GHAM A, et al. Heat stress effects on livestock: molecular, cellular and metabolic aspects, a review[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2016, 100(3): 401-412.
 - [11] HUYNH T T T, ARNINK A J A, VERSTEGEN M W A, et al. Effects of increasing temperatures on physiological changes in pigs at different relative humidities[J]. *Journal of Animal Science*, 2005, 83(6): 1385-1396.
 - [12] WANG Y, SAELAO P, CHANTHAVIXAY K, et al. Physiological responses to heat stress in two genetically distinct chicken inbred lines[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(3): 770-780.
 - [13] SRIVASTAVA A, YADAV P, MAHAJAN A, et al. Appropriate THI model and its threshold for goats in semi-arid regions of India[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 96: 102845.
 - [14] FUQUAY J W. Heat stress as it affects animal production[J]. *Journal of Animal Science*, 1981, 52(1): 164-174.
 - [15] KITAJIMA K, OISHI K, MIWA M, et al. Effects of heat stress on heart rate variability in free-moving sheep and goats assessed with correction for physical activity[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2021, 8: 658763.
 - [16] PRUNIER A, DE BRAGANCA M M, LE DIVIDICH J. Influence of high ambient temperature on performance of reproductive sows[J]. *Livestock Production Science*, 1997, 52(2): 123-133.
 - [17] GEORGE W D, GODFREY R W, KETRING R C, et al. Relationship among eye and muzzle temperatures measured using digital infrared thermal imaging and vaginal and rectal temperatures in hair sheep and cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(11): 4949-4955.
 - [18] 颜培实, 李如治. 家畜环境卫生学[M]. 第4版, 北京: 高等教育出版社, 2011.
 - [19] AVENDANO-REYES L, MACIAS-CRUZ U, CORREA-CALDERON A, et al. Biological responses of hair sheep to a permanent shade during a short heat stress exposure in an arid region[J]. *Small Ruminant Research*, 2020, 189: 106146.
 - [20] KARTHINK D, SURESH J, REDDY Y R, et al. Adaptive profiles of Nellore sheep with reference to farming system and season: physiological, hemato-biochemical, hormonal, oxidative-enzymatic and reproductive standpoint[J]. *Heliyon*, 2021, 7(5): e07117.
 - [21] PULIDO-RODRIGUEZ L F, TITTO C G, DE ANDRADE BRUNI G, et al. Effect of solar radiation on thermoregulatory responses of Santa Inês sheep and their crosses with wool and hair Dorper sheep[J]. *Small Ruminant Research*, 2021, 202: 106470.
 - [22] LI G, CHEN S, CHEN J, et al. Predicting rectal temperature and respiration rate responses in lactating dairy cows exposed to heat stress[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(6): 5466-5484.
 - [23] CURTIS S E. Environmental Management in Animal Agriculture[M]. Ames: Iowa State University Press, 1983.
 - [24] TAYLOR R E, BOGART R. Adaptation to the environment[J]. Scientific Farm Animal Production, 1992, 455: 326-332.
 - [25] PICCIONE G, GIANESELLA M, MORGANTE M, et al. Daily rhythmicity of core and surface temperatures of sheep kept under thermoneutrality or in the cold[J]. *Research in Veterinary Science*, 2013, 95(1): 261-265.
 - [26] GEBREMEDHIN K G. Heat Exchange between Livestock and the Environment[M]. Boca Raton: CRC Press, 1985.
 - [27] MINKA N S, AYO J O. Effects of cold-dry (harmattan) and hot-dry seasons on daily rhythms of rectal and body surface temperatures in sheep and goats in a natural tropical environment[J]. *Journal of Circadian Rhythms*, 2016, 14(1): 1-11.
 - [28] HALES J R S, BROWN G D. Net energetic and thermoregulatory efficiency during panting in the sheep[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1974, 49(3): 413-422.
 - [29] MACIAS-CRUZ U, CORREA-CALDERON A, MELLADO M, et al. Thermoregulatory response to outdoor heat stress of hair sheep females at different physiological state[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62: 2151-2160.
 - [30] MEHABA N, COLOMA-GARCIA W, SUCH X, et al. Heat stress affects some physiological and productive variables and alters metabolism in dairy ewes[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(1): 1099-1110.
 - [31] LI F K, YANG Y, JENNA K, et al. Effect of heat stress on the behavioral and physiological patterns of Small-tail Han sheep housed indoors[J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2018, 50: 1893-1901.
 - [32] ST-PIERRE N R, COBANOV B, SCHNITKEY G. Economic losses from heat stress by US livestock industries[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86: E52-E77.
 - [33] 谢秋菊, 刘学飞, 郑萍, 等. 畜禽体温自动监测技术及应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 212-225.
XIE Qiuju, LIU Xuefei, ZHENG Ping, et al. Technology and application in automatic monitoring of the body temperature for livestock and poultry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(15): 212-225. (in Chinese with English abstract)
 - [34] THWAITES C. Physiological Responses and Productivity in Sheep [M]. Boca Raton: CRC Press, 1985.
 - [35] ALEENA J, SEJIAN V, BAGATH M, et al. Resilience of three indigenous goat breeds to heat stress based on phenotypic traits and PBMC HSP70 expression[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62: 1995-2005.
 - [36] BARNES A, BEATTY D, TAYLOR E, et al. Physiology of heat stress in cattle and sheep[J]. Meat and Livestock Australia, 2004, 209: 1-36.
 - [37] 陈昭辉, 任方杰, 于桐, 等. 加装大风量风机对夏季湿帘降温奶牛舍的防暑降温效果分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 198-208.
CHEN Zhaohui, REN Fangjie, YU Tong, et al. Analysis of ventilation and cooling effects of installing axial fans in wet curtain cooling dairy cattle barn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 198-208. (in Chinese with English abstract)
 - [38] DU PREEZ J H, HATTINGH P J, GIESECKE W H, et al. Heat stress in dairy cattle and other livestock under southern African conditions. III. Monthly temperature-humidity index·mean values and their significance in the performance of dairy

cattle[J]. Onderstepoort Journal of Veterinary Research, 1990, 57: 243-248.

[39] BROUCEK J, NOVAK P, VOKRALOVA J, et al. Effect of

high temperature on milk production of cows from free-stall housing with natural ventilation[J]. Slovak Journal of Animal Science, 2009, 42(4): 167-173.

The threshold of occurrence of heat stress in weaned lambs based on physiological and growth performance

ZHAO Shoupei^{1,2}, FENG Man³, LIU Qianhai⁴, SU Dongyao¹, DONG Qing¹, WANG Chao¹,
SUN Xinsheng^{5*}, GAO Yuhong^{1*}, CHEN Zhiyu⁶, WEI Yudong⁷

(1. College of Animal Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Animal Nutrition Institute, Sichuan agriculture University, Chengdu 611100; 3. Chengde Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Chengde 067000; 4. Hebei Baoding Tang County Agriculture and Animal Husbandry Bureau, Baoding 072350; 5. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001; 6. Hebei Province Zhangjiakou Agricultural Information Center, Zhangjiakou 075031; 7. Hebei Provincial Animal Husbandry Station, Shijiazhuang 061399)

Abstract: The object of this study was to evaluate the effects of ambient temperature and humidity on physiological indexes and growth performance in weaned lambs. The threshold for heat stress (HS) occurrence was also predicted to prevent the HS in weaned lambs. Environmental control cabins were used to control the indoor temperature and humidity. 12 healthy weaned lambs [Small-tailed Han sheep $\times$ Dupo sheep, 2 months, (18 $\pm$ 2.1) kg] were assigned into two treated groups, and fed in the individual cabin with relative humidity of 60% and 80%, respectively. The ambient temperature in the cabin gradually increased from 21.5 to 35.5 $^{\circ}\text{C}$ with a gradient of 2 $^{\circ}\text{C}$. The temperature in each gradient was kept for 3 days, and the entire experiment lasted for 24 days. The physiological indexes included the body surface temperature (BT), respiratory rate (RR), and rectal temperature (RT). The growth performance was represented by the dry matter intake (DMI) and average daily water intake (ADW) of weaned lambs under temperatures from 21.5 to 35.5 $^{\circ}\text{C}$ at two humidity conditions of 60% and 80%. The threshold of inflection point ambient temperature and temperature-humidity index (THI) were predicted for each parameter using nonlinear regression. The results showed that: 1) RR ranged from 28 to 211 times/min, BT from 29.90 to 35.65 $^{\circ}\text{C}$, and RT from 38.38 to 41.42 $^{\circ}\text{C}$ under present experimental conditions. 2) Three physiological indexes (BT, RR, and RT) were relatively stable in the early period of the trial, and then increased linearly with increasing temperature under two humidity conditions. At the humidity of 60%, the threshold value of BT, RR, and RT were 22.99 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.98$), 23.25 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$), and 26.69 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$), respectively. At the humidity of 80%, the three physiological parameters inflection point ambient temperature were as follows: 22.33 ($R^2=0.97$), 23.02 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.99$), and 25.41 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.98$). 3) The threshold values of two growth parameters (DMI and ADW) were: the inflection point ambient temperature of DMI was 24.95 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.94$) at humidity of 60% and 23.21 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.89$) at humidity of 80%; the inflection point ambient temperature of ADW was 23.02 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.92$) at 60% and 22.43 $^{\circ}\text{C}$ ($R^2=0.92$) at 80%. Furthermore, the DMI decreased and ADW increased linearly when the ambient temperature exceeded inflection point ambient temperature. 4) With the increase in THI, each index of inflection was ranked in the order of: BT (69.84) < ADW (70.12) < RR (71.46) < DMI (72.11) < RT (74.83). According to the nonlinear regression between various parameters and THI, it was found that: with every 1 increase in THI, BT, RR, and RT increased by 0.30 $^{\circ}\text{C}$, 9.30 times/min, and 0.19 $^{\circ}\text{C}$, respectively. DMI decreased by 18.04 g, while ADW increased by 203.80 mL, as the THI increased by 1. The optimal threshold values were achieved by temperature, where the 21.5-22.99 $^{\circ}\text{C}$ at 60% or 21.5-22.33 $^{\circ}\text{C}$ at 80% was as a comfortable zone; 22.99-23.25 $^{\circ}\text{C}$ at 60% or 22.33-23.02 $^{\circ}\text{C}$ at 80% was as a non-HS zone; 23.25-24.95 $^{\circ}\text{C}$ at 60% or 23.02-23.21 $^{\circ}\text{C}$ at 80% was as an early-warning zone, 24.95-26.69 $^{\circ}\text{C}$ at 60% or 23.21-25.41 $^{\circ}\text{C}$ at 80% was as a HS zone, and above 26.69 $^{\circ}\text{C}$ at 60% or 25.41 $^{\circ}\text{C}$ at 80% was as alert zone. Besides, below 71.46 was defined as non-HS, 71.46-72.11 was as a critical HS zone, 72.11-74.83 was as an HS zone, and above 74.83 was as an alert zone. The findings can provide a strong reference for the HS evaluation in weaned lambs.

Keywords: temperature; animal; heat stress; temperature and humidity index; threshold; physiological index; growth performance; weaned lamb